

A detailed technical drawing of a watch movement, showing various gears, levers, and components. The drawing is rendered in a light brown or sepia tone, with fine lines and shading to indicate depth and texture. The components are arranged in a complex, interconnected manner, typical of a mechanical watch movement. The drawing is set against a background of a grid or coordinate system, with some letters and numbers visible, suggesting it is a technical drawing from a manual or a scientific publication.

Die Geschichte der Zeitmessung Uhren und ihre Anwendung

11.10.2023

**Dirk Ringhand
Hochschule Heilbronn**

Zeiteinheiten

Zeiteinheiten wurden aus astronomischen Beobachtungen abgeleitet.

Die Einteilung basiert auf dem babylonischen 60er Zahlensystem und der ägyptischen Einteilung in 24 h.

1 Jahr: Umlaufperiode der Erde um die Sonne

1 Tag: Zeiteinheit für eine Umdrehung der Erde um ihre Achse

1 h: $1/24$ eines Tages (Äquinoktiale Stunde)

1 min, *minuta prima*: $1/60$ einer h, (kleinster Teil erster Ordnung)

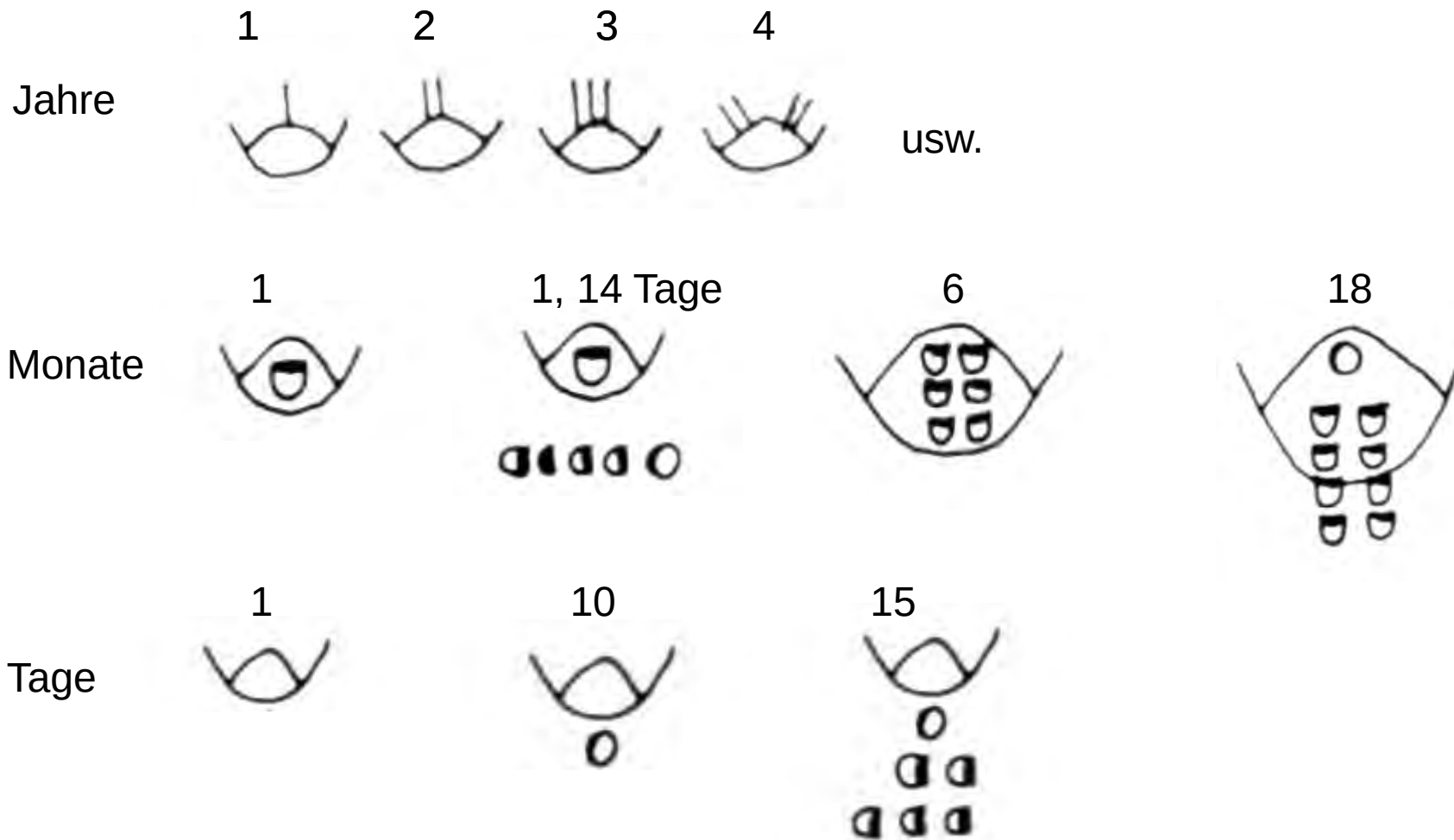
1s, *minuta secunda*: $1/60$ einer Minute, (kleinster Teil zweiter Ordnung)

=> 86400 s/Tag

Ephimeridensekunde auf Basis des tropischen Jahres

Zeiteinheiten

Zeiteinheiten der Uruk IV bis Uruk III Periode
(ca. 4000 bis 3000 v. Chr.) und deren Darstellung



Babylonische Zeiteinteilung

Die Tontafeln Mul.Apin behandeln neben astronomischen Beobachtungen auch den Einsatz einer Wasseruhr zur Zeitmessung.

Hiermit sollte u.a. das zeitliche Erscheinen von Sternen sowie das sichtbare Auftreten des Mondes gemessen werden.

Mondkalender mit 30 Tagen/Monat und 12 Monaten mit Schaltmonat

Zeitangaben mit Zeit- und „Gewichtsmaßen“

Zeitangaben:

1Tag = 12 bēru, mit 30 UŠ pro bēru

1 Nindan entspricht 1/60 eines UŠ = 4 s.



Tontafel Mul.Apin mit astronomischen Beobachtungen, ca. 1000 – 500 v. Chr. Bild: British Museum

Babylonische Zeiteinteilung

Zeitangaben mit Gewichten (für Wasseruhren):

auf Basis des Sexagesimalsystems

4. Jtsd: Grobe Einteilung des Tages in „*Morgen, Mittag, Abend*“

1 Tag + Nacht wurde in 6 Minas (jeweils ca. 0,5 kg bzw. 0,5 l Wasser) eingeteilt.

Das Verhältnis variiert jahreszeitlich bedingt zwischen $\frac{4}{2}$ und $\frac{2}{4}$ für die Tag- und Nachtanteile.

Laufzeit der Wasseruhr mit 1 Mina: 4 h

Tagsüber konnte die Zeit mit dem Schattenstab (Gnomon) bestimmt werden.

1/6 Mina entspricht 10 Shekel

=> 360 Shekel/Tag bzw. 1 Shekel/1° Grad Erddrehung = 4 min

Anmerkung: Die Zeiteinteilung variiert im Laufe der Zeit (3. Jtsd. bis ca. 500 v. Chr.)

vgl. Hunger, Hermann; Steele, John: The Babylonian Astronomical Compendium Mul.Apin

Welche Zeit?

Universal Time (UT) / Mittlere Sonnenzeit, bestimmt durch astronomische Beobachtungen, basiert auf der vergangenen Zeit seit dem Beginn des Jahres 1900

Seit 1972:

Coordinated Universal Time (UTC) Weltzeit, basierend auf Atomuhren gleicht die Schwankungen der Erdumdrehungen durch Schaltsekunden aus.

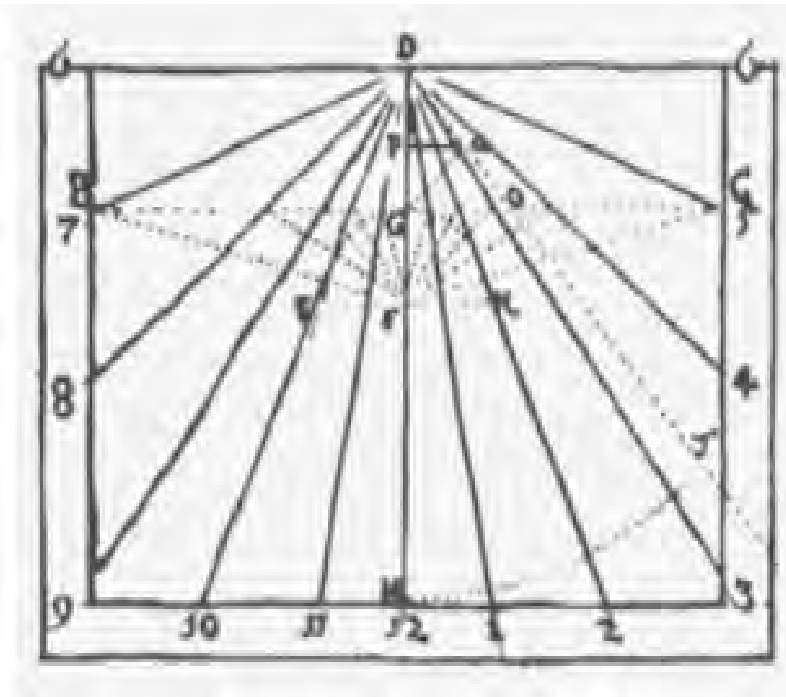
Greenwich Mean Time (GMT): Zeit für den Nullmeridian

Mitteleuropäische Zeit (MEZ) = GMT + 1 h



Royal Greenwich Observatory
Bild: Wikipedia Commons

Sonnenuhren



Wurden bereits in Mesopotamien, Ägypten Griechenland und Rom eingesetzt.

Diese sind Zeitanzeiger

Stundenlinien einer klassischen Sonnenuhr in Südausrichtung nach Hans Jakob Fäsi (1697), in: Joachim Heierli: Eine Sonnenuhr mit Stundenlinien in Erdgestalt. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR CHRONOMETRIE, JAHRESSCHRIFT Band 59 2020, S. 182.

Ausführungen von Sonnenuhren

Schattenstab bzw. Gnomon

(senkrechter Stab auf senkrechter Fläche)

Streiflichtuhren

Treppensonnenuhren

Skaphe

(halbkugelförmige Projektionsfläche)

Äquatoriale Sonnenuhr

(Ausrichtung der Stabachse zum Himmelsnordpol (Polarstern) und Ziffernblatt in der Ebene des Himmelsäquators, keine aufwändigen Berechnungen der Abstände ($15^\circ = 1 \text{ h}$), das Ablesen der Ober- oder Unterseite ist abhängig von der Jahreszeit.

Horizontale Sonnenuhren

(Ausrichtung der Stabachse zum Himmelsnordpol (Polarstern) und Ziffernblatt auf dem Boden, einfach abzulesen, die Richtung des Schattens hängt nur noch von der Tageszeit ab. keine 15° Abstände der Linien

Ägyptische Sonnenuhren

Schattenstab/Gnomon mit Zeitskala

Ägypten; Spätzeit 7.–4. Jh. v. Chr.
Fayence, blaugrün glasiert

Abmessung 1,4x7,5x6,9 cm



Foto: Ägyptisches Museum und Papyrussammlung,
Staatliche Museen zu Berlin SMB,

Replik aus Gips mit Stab



Foto: Deutsches Museum

Ägyptische Sonnenuhren

Stabförmige Sonnenuhr

Grauwacke, Länge 30,4 cm

ca. 7. bis 4. Jh. v. Chr., 26. bis 31. Dynastie

Ausrichtung vom Morgen bis zu Mittag
in Ost-West Richtung, danach nach Westen.

Die waagerechte Ausrichtung der Uhren war
für die genaue Zeitbestimmung entscheidend.

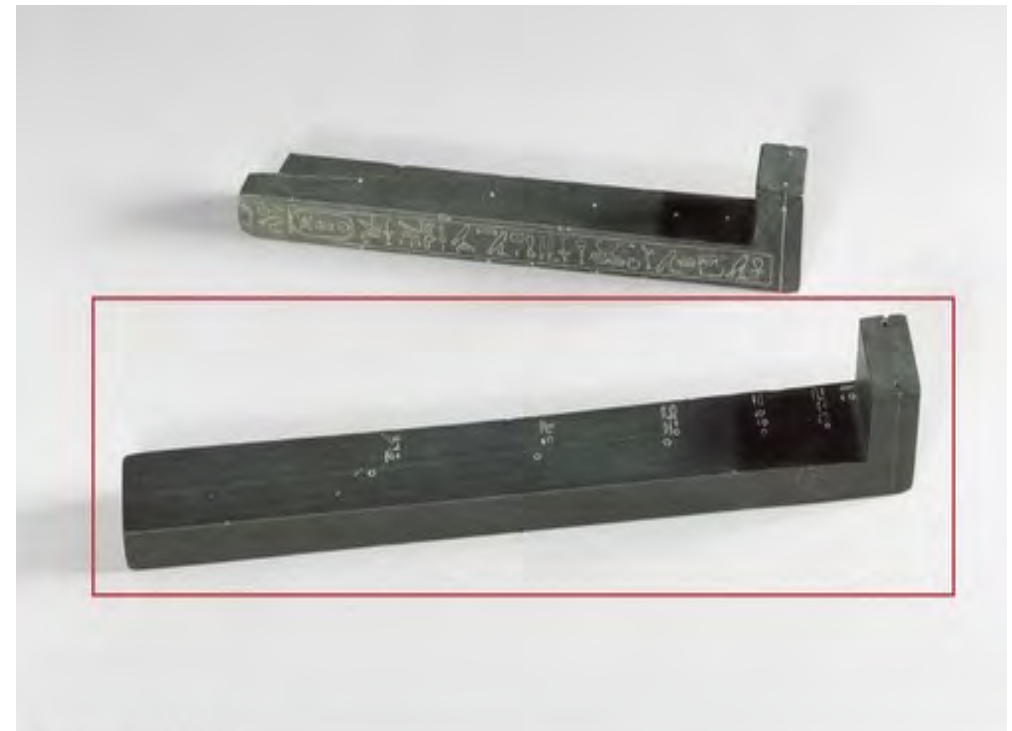
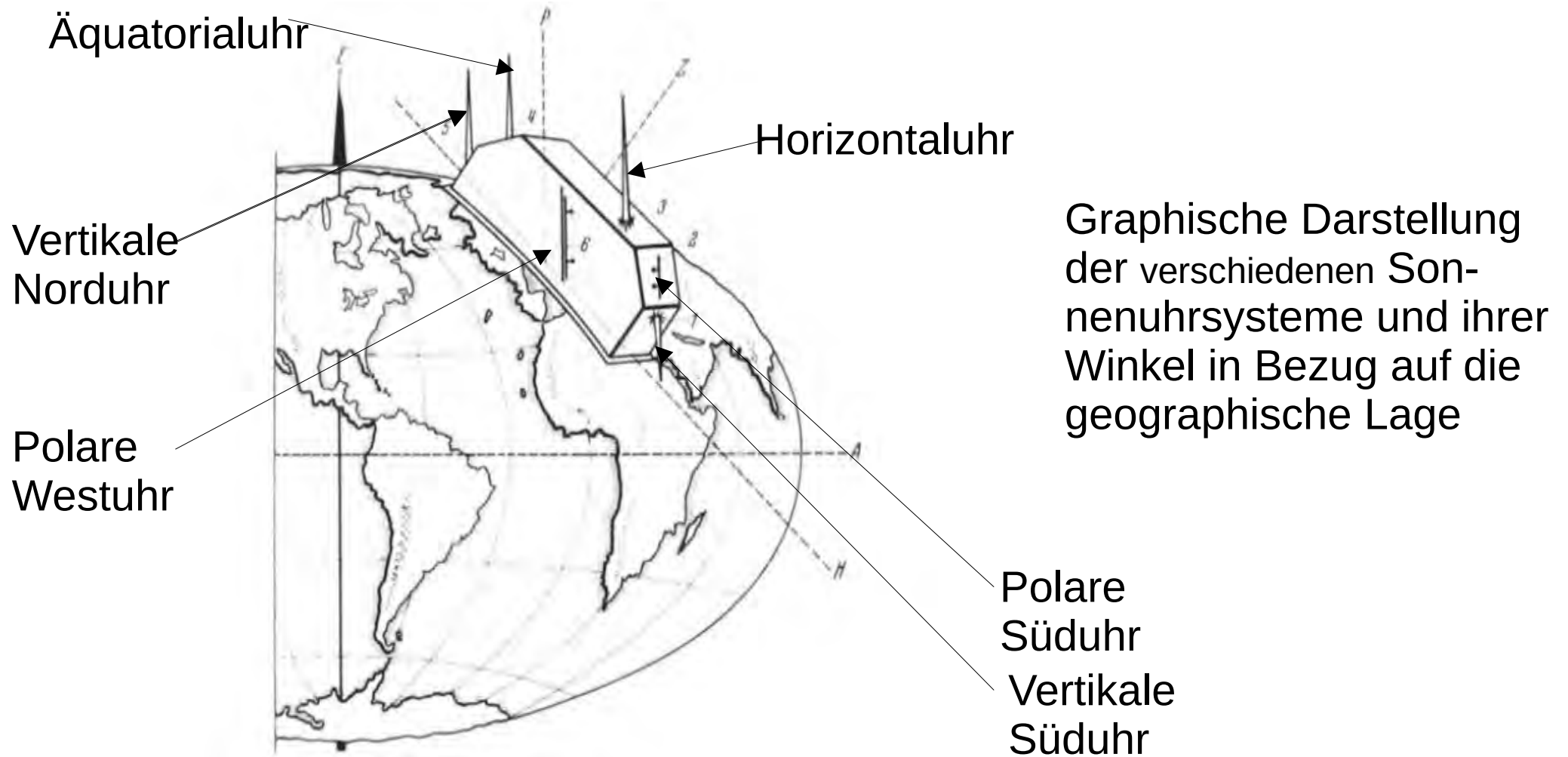


Foto: Ägyptisches Museum und Papyrussammlung,
Staatliche Museen zu Berlin / Margarete Büsing

Sonnenuhrsysteme



Etwas Mathematik

Sonnenuhren können nur die wahre Sonnenzeit für den jeweiligen Ort anzeigen.

Diese ist abhängig vom Ort und der Jahreszeit.

Die wahre Sonnenzeit w_Z muss in die mittlere Sonnenzeit m_Z mit Hilfe der Zeitgleichung – „aequatio temporis“ (von Chr. Huygens, 1665) umgerechnet werden:*

$$m_Z = w_Z - a$$

Mithilfe einer „fiktiven“ Sonne, die sich mit gleichmäßiger Bewegung über den Meridian bewegt, wurde die mittlere Sonnenzeit als konstantes Zeitmaß eingeführt.

*Die mittlere Sonnenzeit entspricht hierbei der Zeit bei einer Tageslänge von 24h und gleicher Stundenlänge (moderne Stundenteilung)

TABULA ÆQUATIONIS DIERUM.

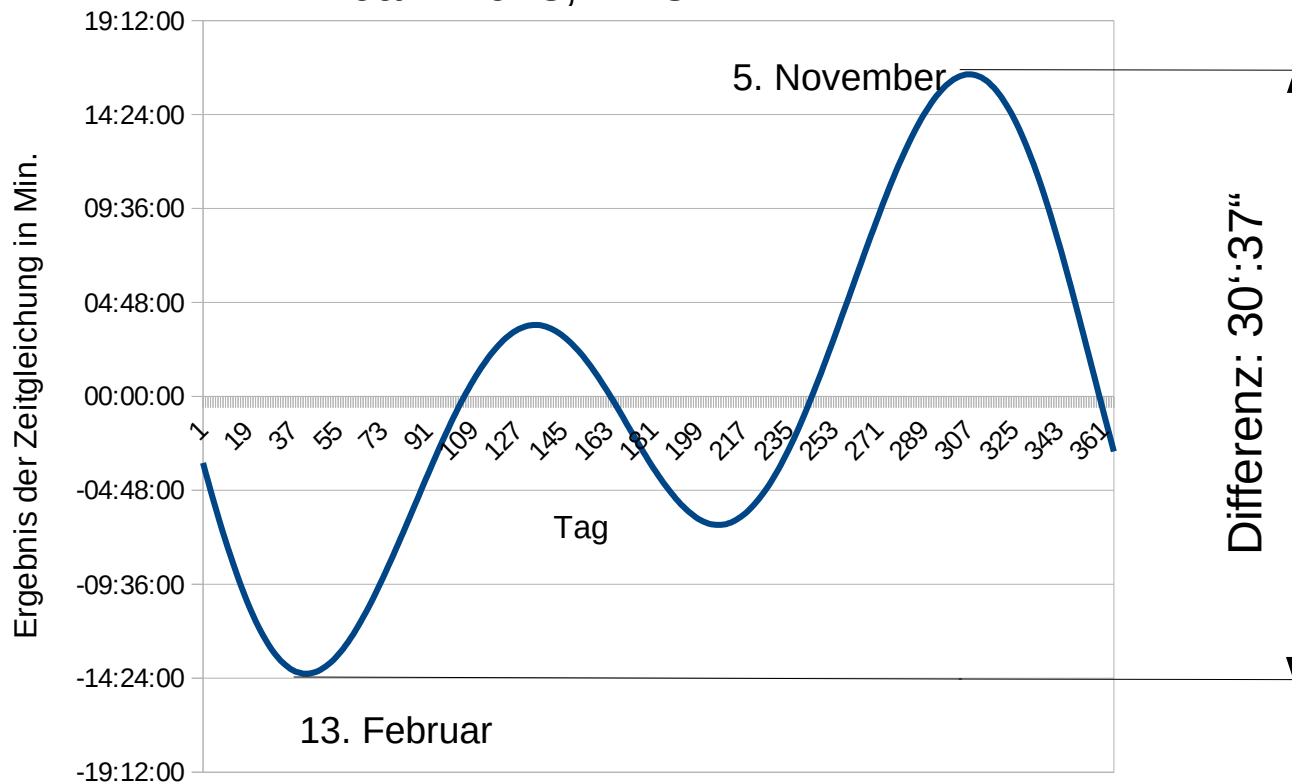
Dier.	Januar.	Febr.	Marz.	Apr.	Maj.	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Okto.	Nov.	Dec.	
Min.	Sec.	Min.	Sec.	Min.	Sec.	Min.	Sec.	Min.	Sec.	Min.	Sec.	Min.	Sec.
1	10	40	0	15	4	13	18	18	18	18	18	18	
2	10	10	0	14	4	12	17	17	17	17	17	17	
3	9	43	0	13	4	11	16	16	16	16	16	16	
4	8	16	0	12	4	10	15	15	15	15	15	15	
5	7	49	0	11	4	9	14	14	14	14	14	14	
6	6	22	0	10	4	8	13	13	13	13	13	13	
7	5	55	0	9	4	7	12	12	12	12	12	12	
8	4	28	0	8	4	6	11	11	11	11	11	11	
9	3	1	0	7	4	5	10	10	10	10	10	10	
10	2	34	0	6	4	4	9	9	9	9	9	9	
11	1	7	0	5	4	3	8	8	8	8	8	8	
12	0	40	0	4	4	2	7	7	7	7	7	7	
13	0	13	0	3	4	1	6	6	6	6	6	6	
14	0	46	0	2	4	0	5	5	5	5	5	5	
15	0	19	0	1	4	0	4	4	4	4	4	4	
16	0	52	0	0	4	0	3	3	3	3	3	3	
17	0	25	0	0	4	0	2	2	2	2	2	2	
18	0	58	0	0	4	0	1	1	1	1	1	1	
19	0	31	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	64	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
21	0	27	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
22	0	100	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
23	0	33	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
24	0	103	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
25	0	36	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
26	0	106	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
27	0	39	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
28	0	109	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
29	0	42	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
30	0	112	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	
31	0	45	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	

Quelle: Ch. Huygens, Horologium Oscillatorium, Paris 1673

Sonnenuhren – Die Zeitgleichung

Der Korrekturparameter a (Ergebnis der Zeitgleichung) wird üblicherweise in Tabellen angegeben und berücksichtigt die elliptische Form der Erdbewegung sowie die Neigung der Erdachse.

Jahr 2023, 12 Uhr MEZ



Ausschnitt aus dem Ziffernblatt der astronomischen Uhr in St. Nikolai, Stralsund von 1394 mit äquinoktialen und temporalen Stunden

Der Wert ist abhängig von der Position
=> damit wird die Sonnenzeit zur Ortszeit

Quelle: Schukowski, Manfred: Uhren aus Kirchen in hansischer Zeit. In: Deutsche Gesellschaft für Chronometrie, Jahresschrift 2009. S. 69.

Variable Zeit

Verhältnis der längsten zur kürzesten Tagesstunde bei 12 h Tageszeit



$$90/30 = 3$$

$$80/40 = 2$$

$$76/44 = 1,73$$

$$73/47 = 1,55$$

$$67/53 = 1,26$$

Äquatoriale Sonnenuhr

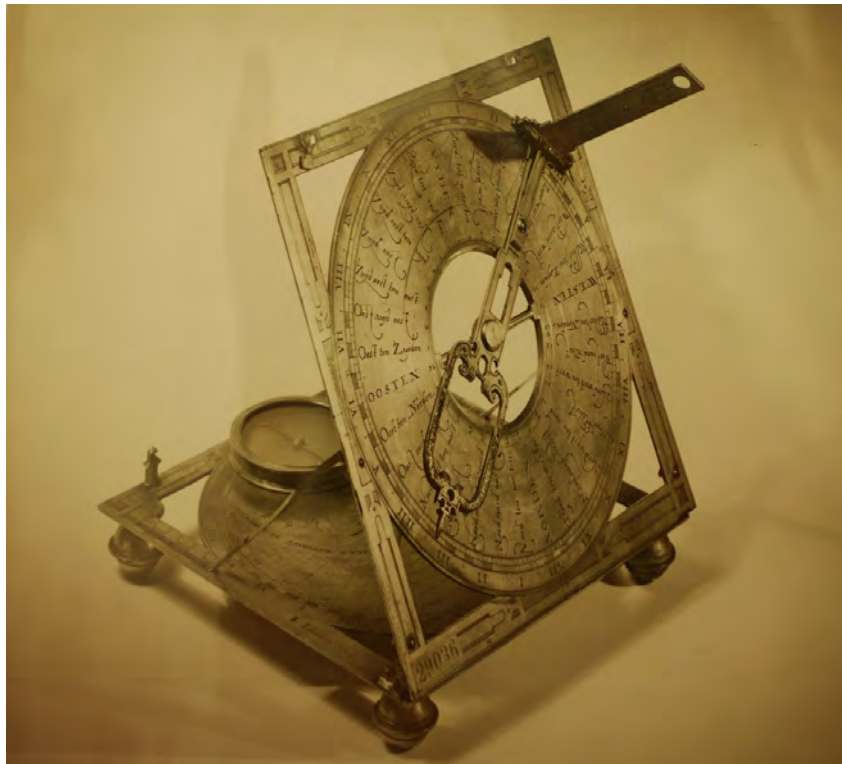


Foto: Deutsches Museum

Äquatoriale und waagerechte Sonnenuhr

mit Kompass von Erasmus Habermel,
16. Jhdt.

Ausrichtung der Stabachse zum
Himmelsnordpol (Polarstern) und
Ziffernblatt in der Ebene des
Himmelsäquators, keine aufwändigen
Berechnungen der Abstände ($15^\circ = 1 \text{ h}$). Das
Ablesen der Ober- oder Unterseite
ist abhängig von der Jahreszeit.

Höhepunkte der Sonnenuhren

16. Jahrhundert

Bedeutende Ort der Herstellung von Sonnenuhren:

Nürnberg

Augsburg

Paris

Antwerpen

Moderne Ringsonnenuhr von H.M. Kala



Foto: <https://www.helios-sonnenuhren.de/de/taschensonnenuhr-kala>

Taschensonnenuhren für Reisende und Seefahrer mussten in Nord-Süd Richtung ausgerichtet werden.

Die Herstellung erfolgte häufig durch Kompassmacher.

Uhren und Zeiten



Carl Spitzweg:
Der Nachtwächter

Wie bereits in der Antike wurden auch im Mittelalter Tag und Nacht jeweils in zwölf Temporalstunden eingeteilt.
Tag: Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang

Jahreszeitliche Dauer einer Tag-Stunde:

Jahreszeit/ Datum	Dauer des Lichttags*	Vergleich
Sommer, 15.6.	15h 01 min	1h \triangleq 1h 15 min*
Herbst, 15.11.	7h 41 min	1h \triangleq 38 min*

*nach moderner Einteilung (24 gleiche, äquinoktiale, Stunden)

Für die Organisation des täglichen Lebens und Koordination der Abläufe fehlte ein einheitlicher Zeitmaßstab.

Clepsydra - Wasser als Antrieb

Clepsyden wurden in Ägypten, Griechenland sowie in Rom eingesetzt und dienten u.a. der Begrenzung von Redezeiten.

Varianten:

- Auslauf- Wasseruhr (seit dem 1. Jtsd. v. Chr., in China/ Indien)
- Schwimmer-Wasseruhr

Die Anpassung der jahreszeitlich veränderlichen Zeit erfolgte u.a. durch Variation der Füllmenge.



Fragment einer Clepsydra,
Basaltstein, Ägypten (Tell el-Yahudiya), 4. Jhdt v. Chr.

Die Himmlische Waage

Astronomische Wasseruhr für den chinesischen Hof in Khaifeng mit mehreren Automaten.

Antrieb durch 3 m hohes Wasserrad und
36 Schöpfgefäße

Höhe > 10 m

Höhepunkt und Abschluss einer Entwicklungsarbeit
über mehrere Jahrhunderte (G. Dohrn-van Rossum).

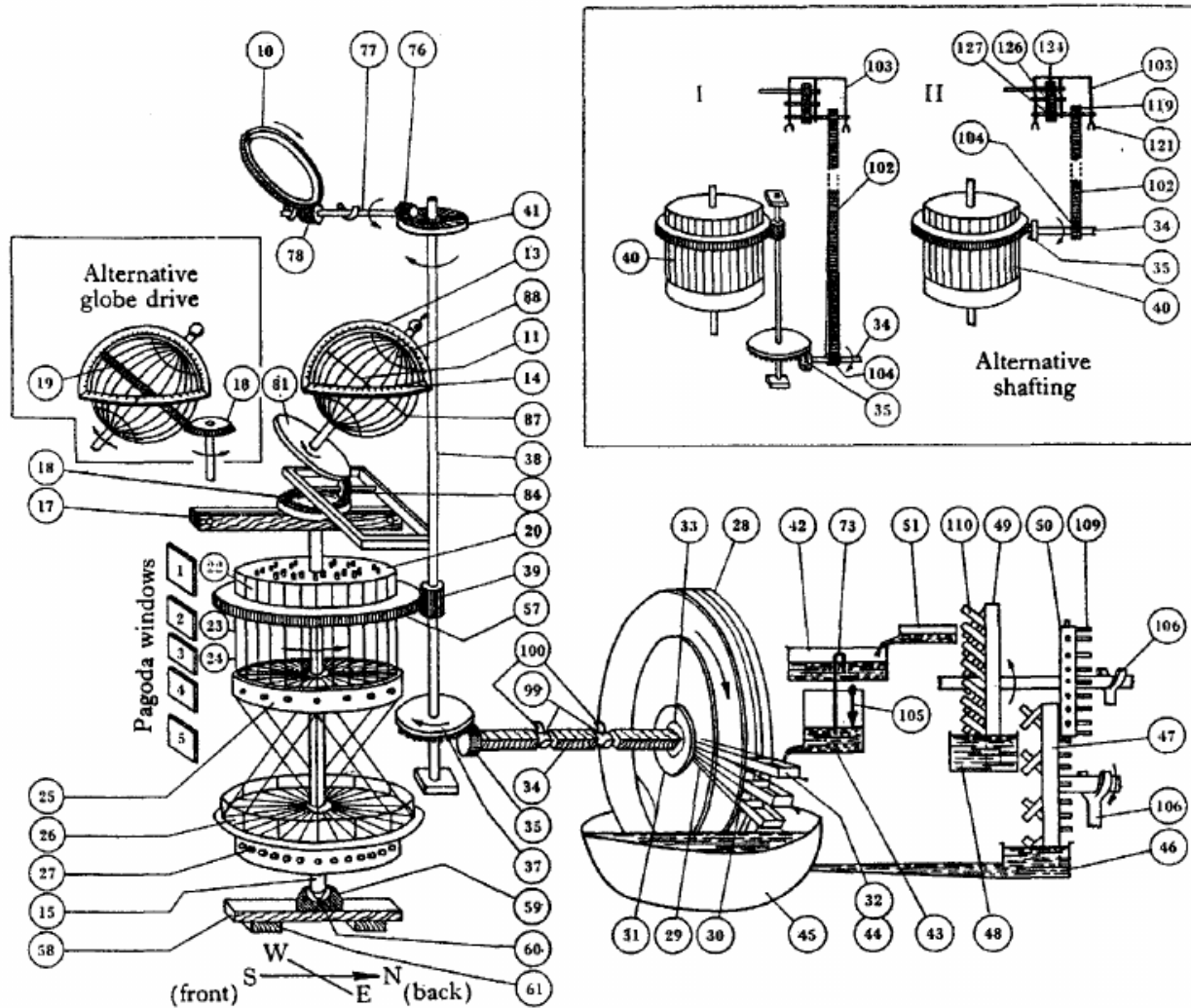
Seit dem 2. Jhdt. waren Wasseruhren in Gebrauch.



Wassergetriebene Turmuhr
von Su Song, 1090

Bild: Needham, John: Science and
Civilisation in China Vol 4.2. S. 449.

Die Himmlische Waage



1 Umdrehung / Tag

Die intermittierende Bewegung durch Sperrmechanismus

Explosionsskizze der Wasseruhr von Su Song, Bild: Needham, John: Science and Civilisation in China Vol .4.2. S. 452.

Die Wasseruhren von Al Dschazari

Skizze einer Wasseruhr mit Pfauenfiguren, die sich halbstündlich bewegen und damit die Zeit anzeigen.

Variation wassergetriebener Automaten, bei denen die Zeitanzeige nur eine Teilfunktion darstellt.

Weiterentwicklung der spätantiken hellenistischen Automaten aus Alexandria (Ktesibus, 3. Jhdt v. Chr.).



Quelle: Ibn al-Razzaz al-Jazari (Übersetzung Donald Hill):
The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices

Uhren im arabischen Raum

Die Entwicklung der arabischen Wasseruhren, lässt sich wahrscheinlich bis auf Archimedes zurückführen.

Nach der Eroberung von Konstantinopel 1453 wurde das späthellenistische Wissen von den Osmanen übernommen und weiterentwickelt.

Über den Austausch mit dem islamischen Spanien gelangten Techniken wie die Papierherstellung und Wasseruhren (887 n. Chr.) nach Europa.

Im Mittelalter wurden astronomische Uhren in Europa eingeführt.

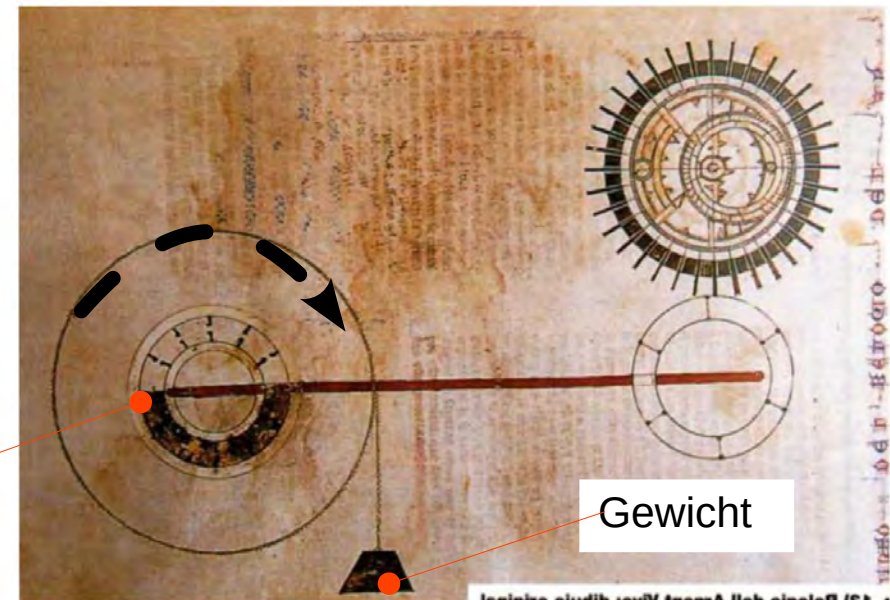
Erst durch die Erfindung der Selbsthemmung im 16. Jhdt. konnte ein gleichmäßiger Gang der Uhr auf Basis einer mechanischen Schwingung erreicht werden.

Technologietransfer

Alfons X von Kastilien (1221 - 1284) wollte das Wissen der islamischen Welt für das christliche Europa erschließen.

In den „*Libros del saber de astronomía*“ sind u.a. Wasseruhren und eine Quecksilberuhr dargestellt, die möglicherweise bereits im 11. Jhd. gebaut wurde.

Holztrömmel mit 12 Kammern, teilweise mit Quecksilber befüllt und mit Verbindungsöffnungen.



Gewicht

Skizze einer Quecksilberuhr nach islamischem Vorbild, Granada 1277

Quelle: Moreno, Manuel Espinmar (Hrsg.): *Libros del saber de astronomía del rey D. Alfonso X de Castilla*. Granada 2020, S. XXXV.

Sanduhren



Ausschnitt aus dem Bild
"Il buon Governo" von
Ambrogio Lorenzetti ,
zwischen 1338 und 1339,
Palazzo Pubblico, Siena
Bild: Wikipedia Commons

Anwendungen im Mittelalter:

- Organisation wissenschaftlicher Arbeit
- Regulierung des Klosteralltags
- Einsatz als Stundenglas auf Schiffen
- Pulsmessung

Merkmale:

- Einfach herstellbar
- wiederverwertbar
- Keine Betriebskosten
- robust

Entwicklungsschritte der Sanduhr

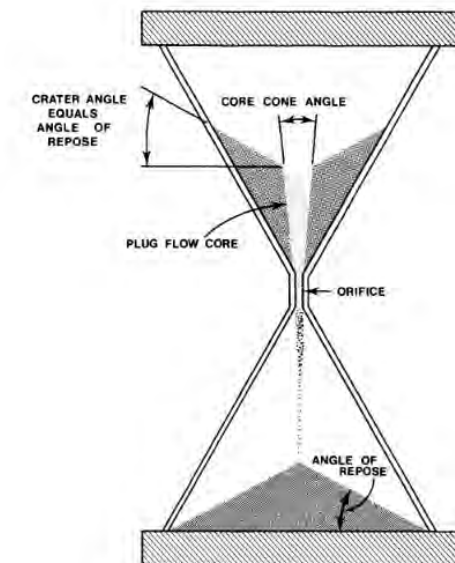


Halbstunden Sanduhr,
1500 – 1525

Photo: Metropolitan Museum of Art

Herstellung der Kolben aus einem Stück, ab 1760
Einsatz unterschiedlicher Rieselstoffe (Marmorpulver, Silberpulver, Zinnpulver, Eisen, Kupfer, Blei, venetianischer Sand, Eierschalen, Zimt...)

Automatischer Wendemechanismus
von Stephan Farfler (1633-89) und
Grollier de Serviere (1593-1686)



Quelle: Balmer, R, T.: The Operation of Sand Clocks and Their Medieval Development. Technology and Culture, Vol. 19, No. 4 (Oct., 1978), S. 615-632.

Zeitmessung mit mechanischen Uhren

Zunächst als Luxusprodukt/Statussymbol für Reiche, werden Uhren zunehmend im öffentlichen Raum eingesetzt (Turmuhr, Rathaus).

Der Tagesablauf orientierte sich nach den standardisierten Uhrzeiten der Städte. Es wurden zunächst nur Stunden angegeben.

Der Tag wurde nun **unabhängig von Sonnenaufgang und Untergang** in 24 gleich lange Stunden eingeteilt.

Festlegung von Arbeitsbeginn und Ende, insbesondere im Bergbau. Grundlage für Fahrpläne.

Grundlage für die Erfassung von Arbeitszeiten und der zeitabhängigen Entlohnung.



Astronomische Uhr
am Rathaus von Ulm

Bild:http://www.astrouhr.telebus.de/die_uhr/die_uhr.html

Zeitliche Organisation des Alltags

Glockengeläut der Kirchen und Klöster

Ab dem 7. Jhdt. Wurden Glocken tagsüber anlässlich der 7 Stundengebete (+ Nokturn) geläutet, vgl. Ps. 119.

Nürnberger Satzungenbücher des 13. Jahrhunderts:
Der Arbeitsbeginn der Schlachter und Schmiede wurde mit dem Geläut der Frühmesse festgelegt.

In England wurde mit dem Läuten der Feuerglocke das Löschen der Feuer angeordnet.

In Flandern wurde Arbeitsbeginn und -ende der Tuchindustrie durch Glockengeläut verkündet.

Im Bergbau war die akustische Signalgebung zur Regelung der Arbeitszeiten unter Tage die einzige Orientierungsmöglichkeit.

In der küstenfernen Schifffahrt war die sichere Navigation nach den Gestirnen von der Kenntnis der aktuellen Ortszeit angängig (Längengradproblem).

Literatur: G. Bayerl, Technik im Mittelalter und Früher Neuzeit, S. 76 ff



Darstellung der Klosteranlage St. Gallen, Karl Laisus, 1876, in: J. Rudolf Rahn, Geschichte der bildenden Künste in der Schweiz, Zürich 1876, 87 – 98.

Räderuhren

Aufgabe:

Automatische Maschine zur Anzeige der Zeit,

Anforderung:

Gleichmäßiger Lauf unabhängig von äußeren Einflüssen

Merkmale:

Einsatz eines mechanischen Schwingers (Pendel, Unruhe)

Antrieb durch Energiespeicher (Lageenergie, Federenergie)

Selbsthemmung (Bremse) ermöglicht gleichmäßigen

Lauf des Räderwerkes unabhängig von der verbleibenden Gangreserve.



Dosenuhren 16. Jhdt,
restituiert nach Provinienzforschung
Württembergisches Landesmuseum Stuttgart

Entwicklung der mechanischen Räderuhr

Ab 1290: Gewichtsräderuhren mit Waag, Einsatz der mechanischen Räderuhr durch englische Mönche (Wallingford)

1330: Erfindung der Unruhe

14. Jhdt. Italien: automatisches Stundenschlagwerk

15. Jhdt.: Federwerk als Energiespeicher

1430: Ausführung mit „Schnecke“ zur Regulierung der Ganggeschwindigkeit

1586: Gewichtsuhr mit Anzeige von Stunden, Minuten und Sekunden (Kassel)
erstmaliger Einsatz der Uhr als astronomisches Instrument
(Messung von Zeiten bei der Beobachtung der Himmelskörper)

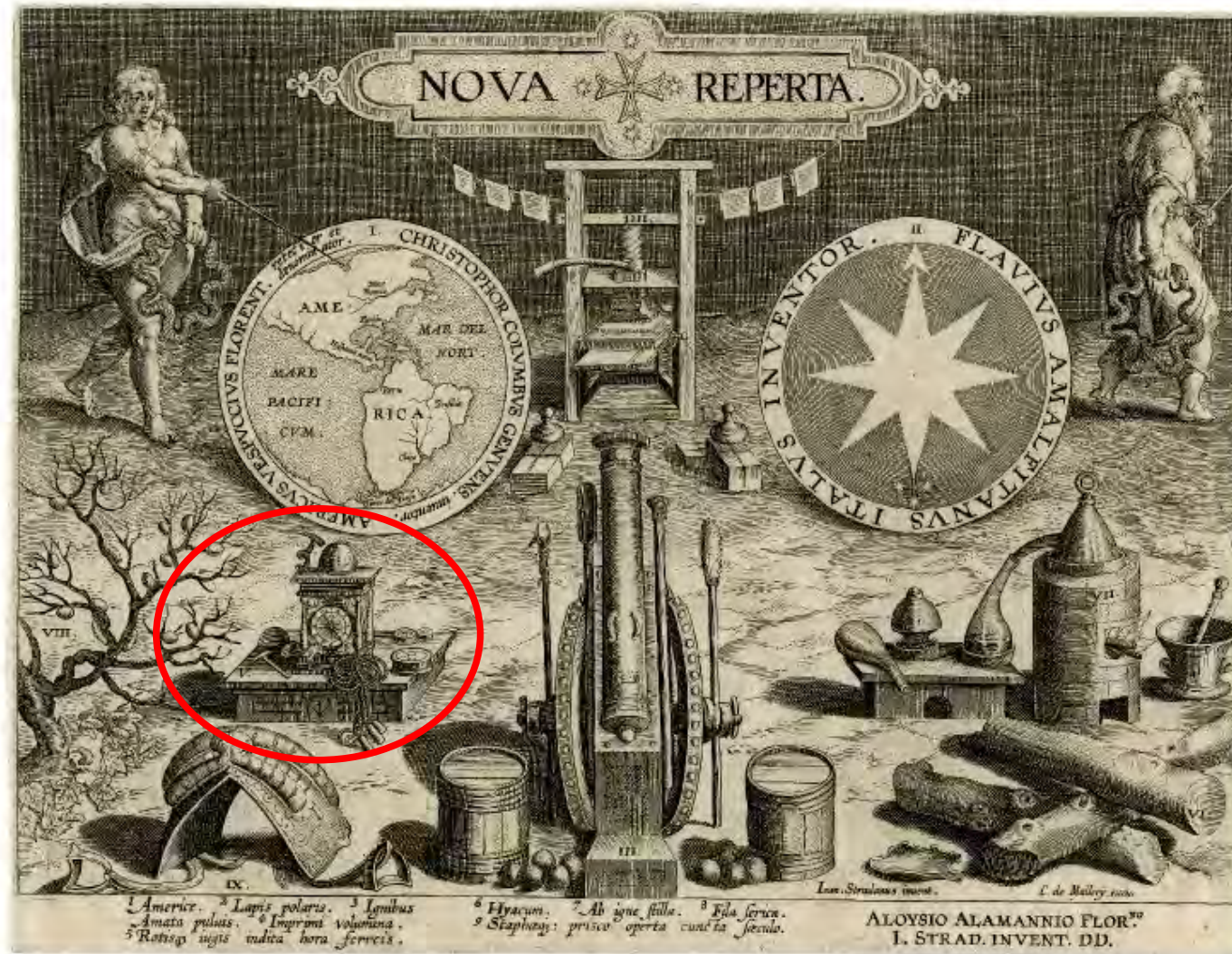
17. Jhdt.: Pendel für stationäre Uhren



Eiserne Turmuhr mit Stundenschlagwerk, ca. 1570

Bild: Crott Auktionen Nr. 96

Technikentwicklung im Mittelalter



Darstellung der Erfindungen und Entdeckungen des Mittelalters, aus der "Nova Reperta" von Jan van der Straat, ca. 1580, Quelle: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>

Mittelalterliche Uhren

Die ersten mechanischen Räderuhren sind ab 1238 (Dunstable, GB) dokumentiert.

1284 Exeter

1286 Old St. Paul, London

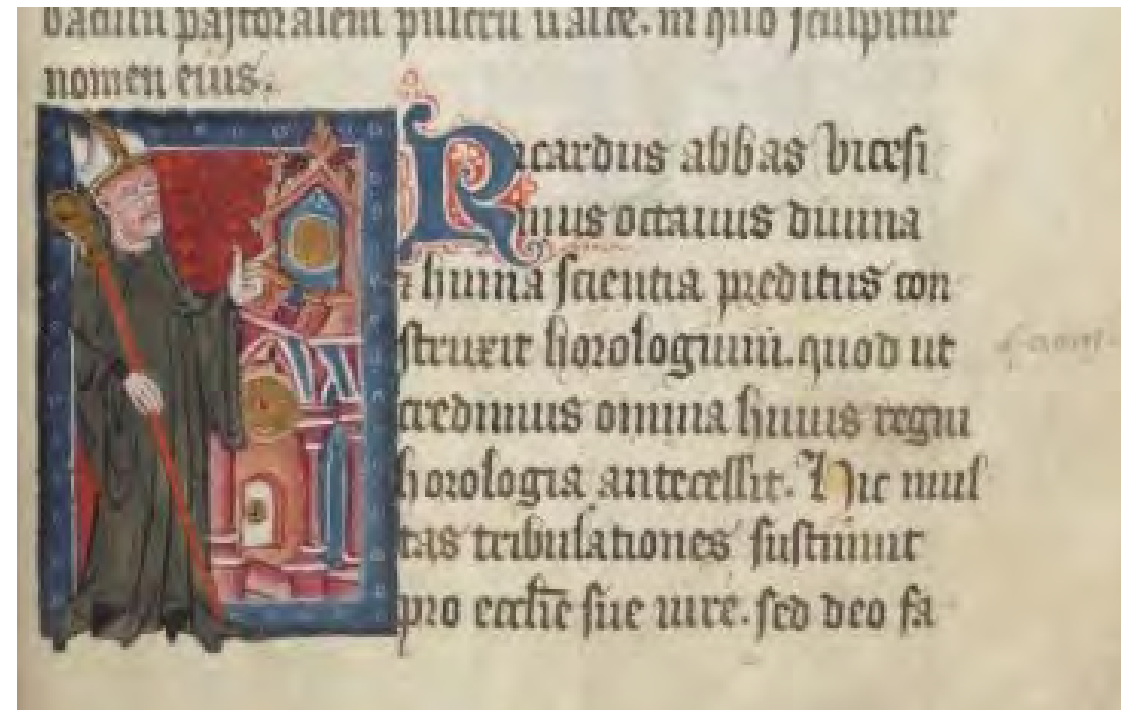
1290 Oxford

1290 Norwich

1292 Salisbury

Die Uhren hatten einen Glockenschlag, jedoch noch kein Ziffernblatt.

Zwischen 1379 und 1472 entstanden in zahlreichen Hansestädten monumentale Kirchenguhren mit astronomischen und astrologischen Anzeigen.



Abt Richard von Wallingford mit astronomischer Uhr, Golden Book of St Albans 1380
Quelle: British Library

Mechanisches Uhrwerk mit Foliot / Waag

Die Uhrwerkshemmung: Meilenstein der Uhrentwicklung

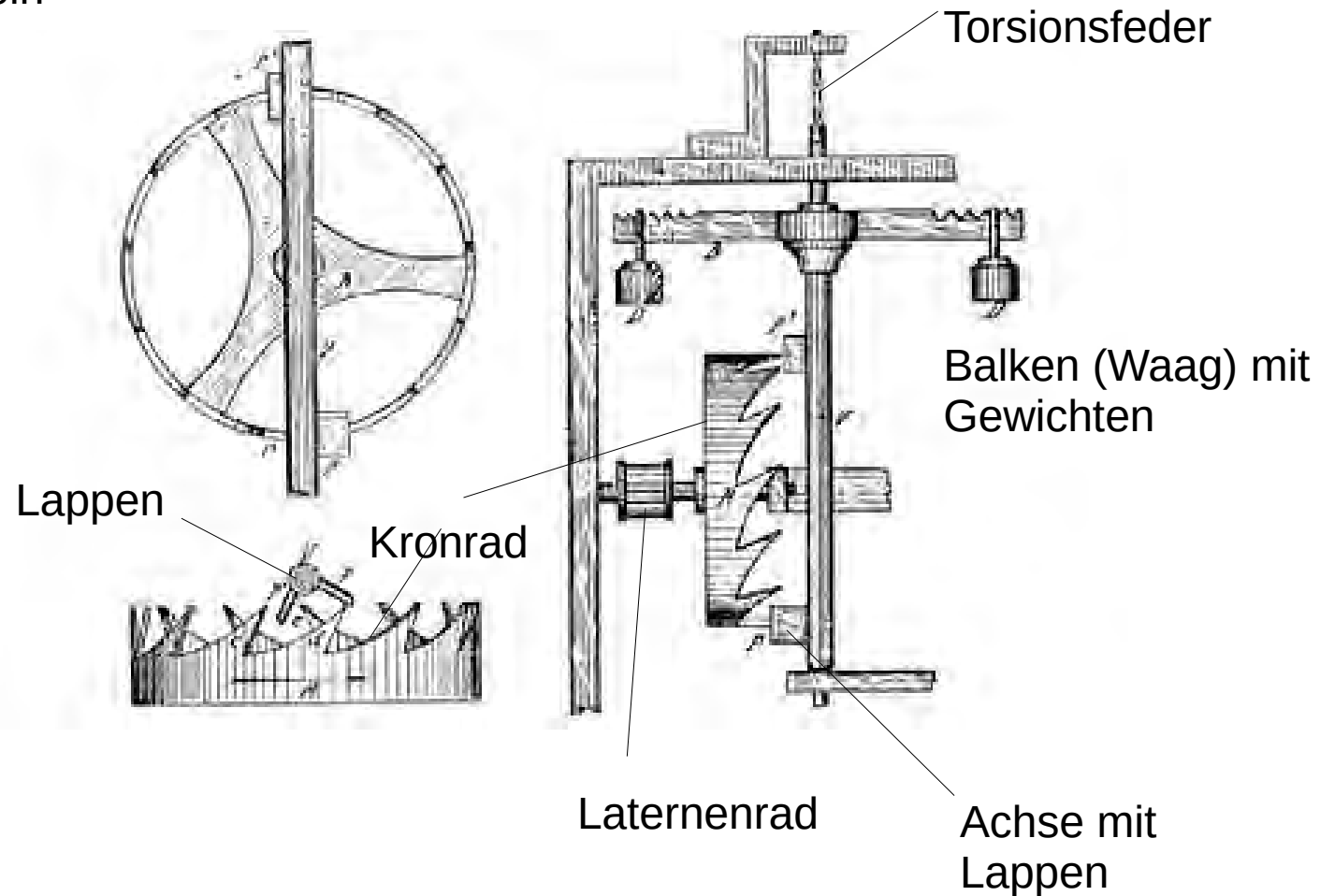
Klinkenmechanismus zur

-Steuerung des Taktes

-verhindert das unkontrollierte Absinken des Gewichtes bzw. schlagartige Zurückfedern der Spiralfeder

Gewichtsuhr mit Waagbalken:

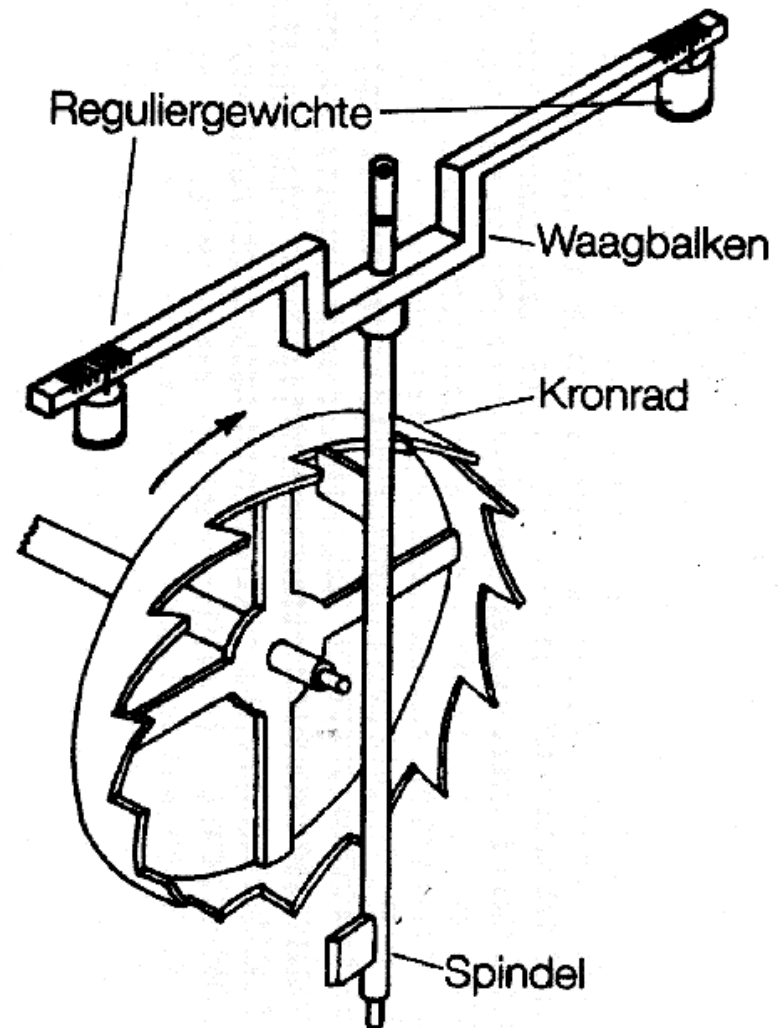
Die Waag oszilliert um ihre Achse, hierbei lassen die Lappen jeweils eine kleine Drehung des Kronrades zu und blockieren dieses danach (Hemmung).



Mechanisches Uhrwerk mit Foliot / Waag

Der Takt der Waag bestimmt die „Drehzahl“ des Kronrades, die über das Laternenrad zur Anzeige übertragen wird.

Das Konstruktionsprinzip wurde durch Pendel und Unruh (Kleinuhren) abgelöst.



Uhrenherstellung

Uhrmacher entstammen Berufen der Metallverarbeitung (Schmiedehandwerk).

Selbständiges Handwerk ausgehend von Geschützgießern und Schlosser ab 1441.

Die zunächst geringe Nachfrage führte zu wandernden Uhrmachern

Ab 1540 entsteht ein eigenes Uhrmacherhandwerk in Europa (z.B. Augsburg, Nürnberg, Genf, Paris, London).



Uhrmacherwerkstatt, Kupferstich Johannes Stradanus (Jan van der Straet), Nova Reperta, ca 1580
<http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de>

Uhren als Statussymbol und wissenschaftliches Instrument

Von Uhrwerken angetriebene Himmelsgloben und astronomische Uhren dokumentieren die Abkehr vom geozentrischen Weltbild.

Statussymbol für Reichtum und Macht und technischen Fortschritt.

Uhren als Messinstrument, z.B. für die Astronomie (vgl. Galilei) ermöglichen die Bestimmung von Relativgeschwindigkeiten.



Planetenlaufuhr des Kurfürsten August von Sachsen
erbaut von Eberhard Baldewein, 1563-1568
Photo: Mathematisch-Physikalischer Salon Dresden

Schwingungen als Basis der Zeitmessung

Eine neue Idee setzt sich durch:

Messung von Zeitintervallen (Tage, Stunde, Min. Sekunde)
durch periodisch wiederkehrende Ereignisse (Schwingungen).

Anforderung:

- Konstante Periode (Frequenz) der Schwingung über der Laufzeit
- Reproduzierbare Einstellung der Frequenz

Umsetzung und physikalische Effekte:

- mechanisch
- elektronisch
- optisch
- atomar

Anwendungsbereiche:

Taktgeber für elektronische Geräte, Musik, Radiowellen,
Zeit- und Entfernungsmessungen.....



Metronom von Johann Nepomuk Mälzel mit Sekundenskala, Paris um 1816
Historisches Museum Basel,
Foto: HMB Natascha Jansen



Miniature chip-scale packaged Resonator
Quelle Kuypers, J.H. :High Frequency Oscillators for
Mobile Devices. In: Bhugra, H.; Piazza, G. (Hrsg.):
Piezoelectric MEMS Resonators. Microsystems and
Nanosystems. Springer, Cham. S. 336.

Schwingungen als Basis der Zeitmessung

Galileo Galilei machte die Beobachtung, dass die Frequenz eines schwingenden Pendels nur von der Länge des Pendels abhängt.

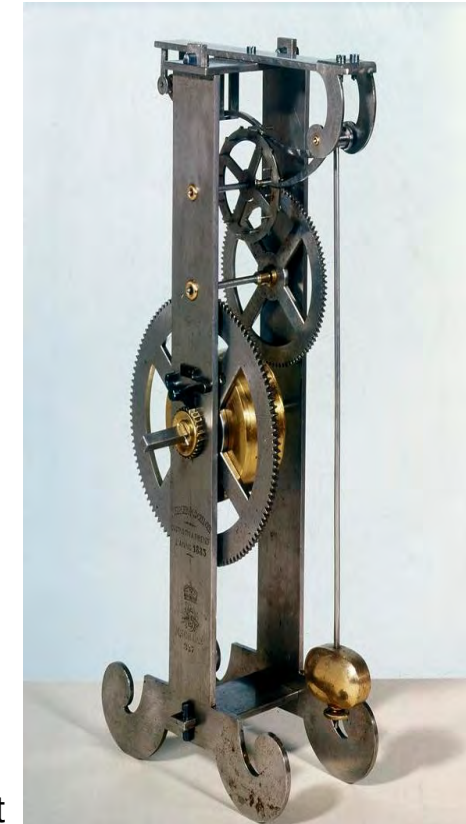
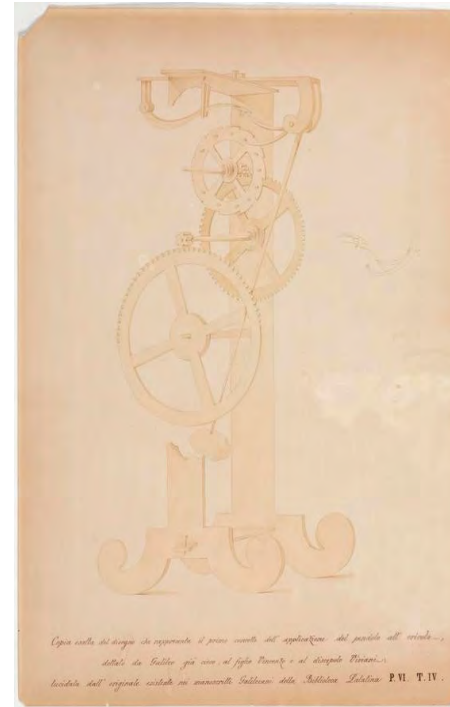
Christaan Huygens gilt als Erfinder des Torsionsschwingers, d.h. eines mechanischen Feder-Massesystems, das mit konstanter Frequenz um seine Achse oszilliert (Unruh).

Die Frequenz ist hierbei von der Federsteifigkeit (Länge der Spiralfeder) und dem Massenträgheitsmoment abhängig.

Zeitmessung durch Schwingungen

Galileo Galilei (1564 -1641) entdeckte, dass die Frequenz eines schwingenden Pendels nur von dessen Länge abhängt.

Er entwickelte die Idee, diesen Effekt zu nutzen, um eine isochrone Bewegung zu erzeugen.



Uhrwerk mit Pendel und Räderwerk mit Stift-Hemmung nach Galileo Galilei/
Vincenzo Viviani Skizze und Modell
von 1883

Bilder: Science Museum

Christaan Huygens

Christaan Huygens (1629 – 1695)

Uhrmacher, Physiker, und Mathematiker,
Theorie mechanischer Wellen (Huygenssches Prinzip)

Gilt als „Erbauer“ der ersten Pendeluhr

Hinzufügen eines mechanischen Pendels
an Gewichtsuhrn zur Gangregulierung 1656

Pendeluhr mit Zykloidenpendel (1656)
(Frequenz unabhängig vom Ausschlag)

Gekoppelte Pendeluhr 1657

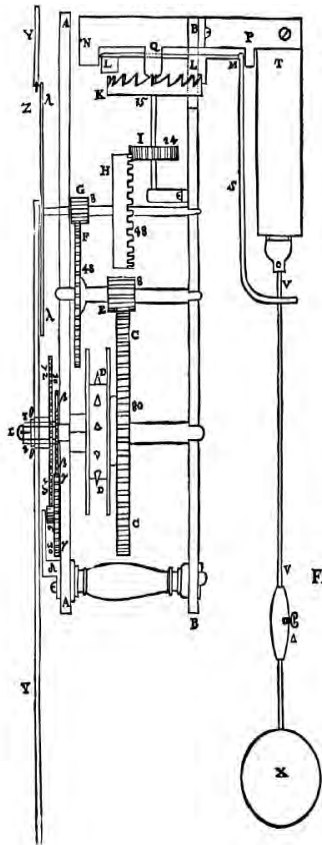
Unruh-Spiralsystem 1675
Taschenuhr mit Spiralfeder, angefertigt von
Isaac Thuret (parallel zu Robert Hooke/Thomas Tompion)



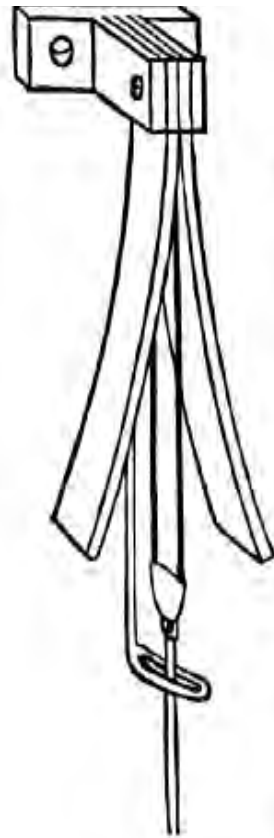
Bild: <https://www.hofwijck.nl>

Uhrentwicklungen von Christaan Huygens

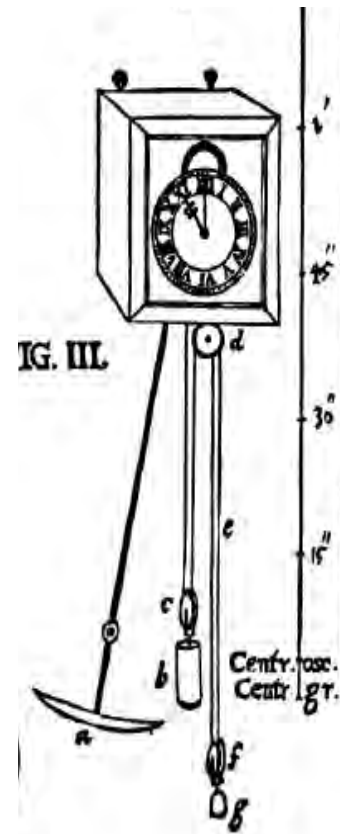
Räderwerk mit Hemmung



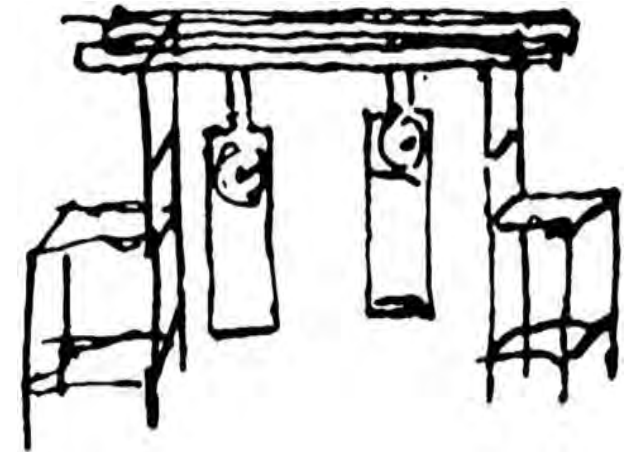
Zykloidenuhr mit Fadenpendel



Gewichtsuhr mit Pendelschwinger



Gekoppelte Pendeluhren



Quelle: Ch. Huygens, Horologium Oscillatorium, Paris 1673

Die gekoppelte Pendeluhr

Huygens wollte mit Hilfe einer gekoppelten Pendeluhr die Ganggenauigkeit erhöhen und diese für maritime Anwendungen (Längengradproblem) einsetzen.

Eine Untersuchung der Royal Society kam 1665 zu dem Schluss, dass diese Ausführung einer Pendeluhr zu empfindlich für die Verhältnisse auf See ist.

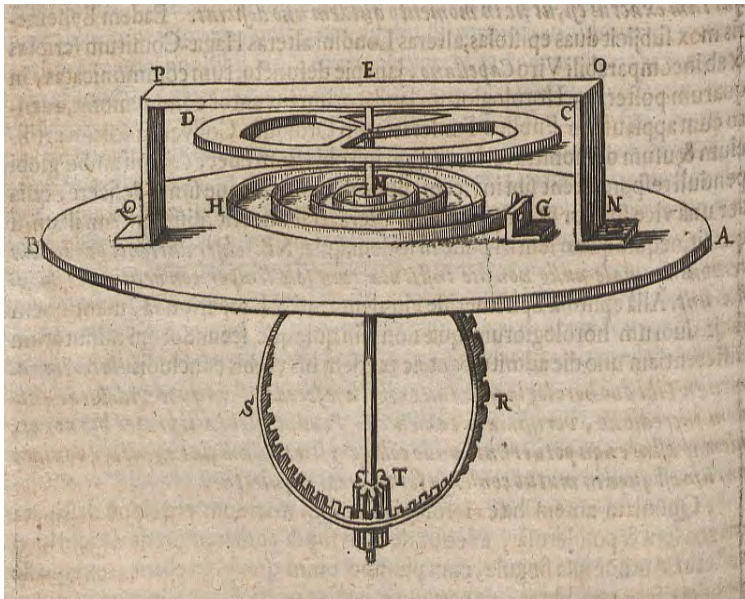
Untersuchungen von Ramirez et al bestätigten Huygens' Theorie der gekoppelten Pendel.



Ramirez, Jonatan Peña; Olvera, Luis Alberto; Nijmeijer, Henk; Alvarez; Joaquin:
The sympathy of two pendulum clocks: beyond Huygens' observations.
Nature.com. Scientific Reports | 6:23580 | DOI: 10.1038/srep23580

Unruh mit Flachfeder

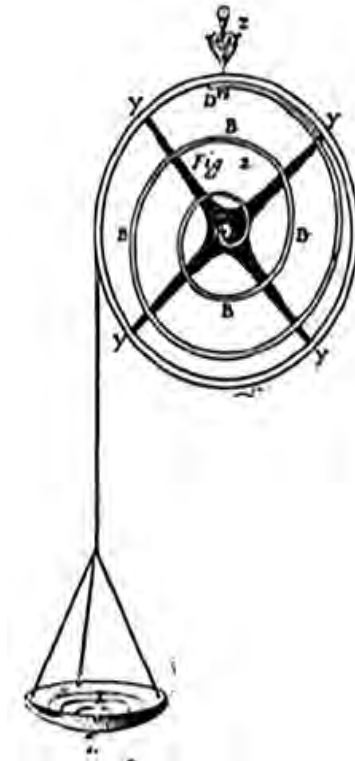
Skizze einer spiralförmigen Flachfeder mit Unruh von Chr. Huygens.



Quelle: Deutsche Fotothek

Quelle: Deutsche Fotothek

Torsionsfeder für Uhren mit Gewicht von Robert Hooke



Quelle: Robert Hooke, Of Springs 1678

Taschenuhren

Die Verwendung einer spiralförmigen Flachfeder in Verbindung mit einer Unruh nach Huygens / Hooke ermöglichte den Bau flacher Taschenuhren und machte die bestehenden Uhren obsolet (D. Landes).

Minuten- und Sekundenanzeige konnten damit realisiert werden.



Thomas Tompion
Uhrwerk ohne Unruh
London 1671
Bild: Sciencemuseum



Thomas Tompion Taschenuhr von 1697
Bild. <https://www.bbc.com/news/magazine-29361959>

Daten-Zeit Synchronisation

Die Bestimmung der nautischen Koordinaten alleine ist jedoch für die sichere Navigation abseits von Küsten und Leuchttürmen noch unzureichend.

Die **Zeitbasis** der Tabellenwerke musste zu den gemessenen **Zeiten** der Schiffe passen.



Bild: Erfolgreich ans Ziel: Navigation - Dokumentation von NZZ Format (2004)

Neben der Winkelmessung ist die möglichst exakte Bestimmung der Zeit (GMT) eine wesentliche Voraussetzung für die präzise Navigation.

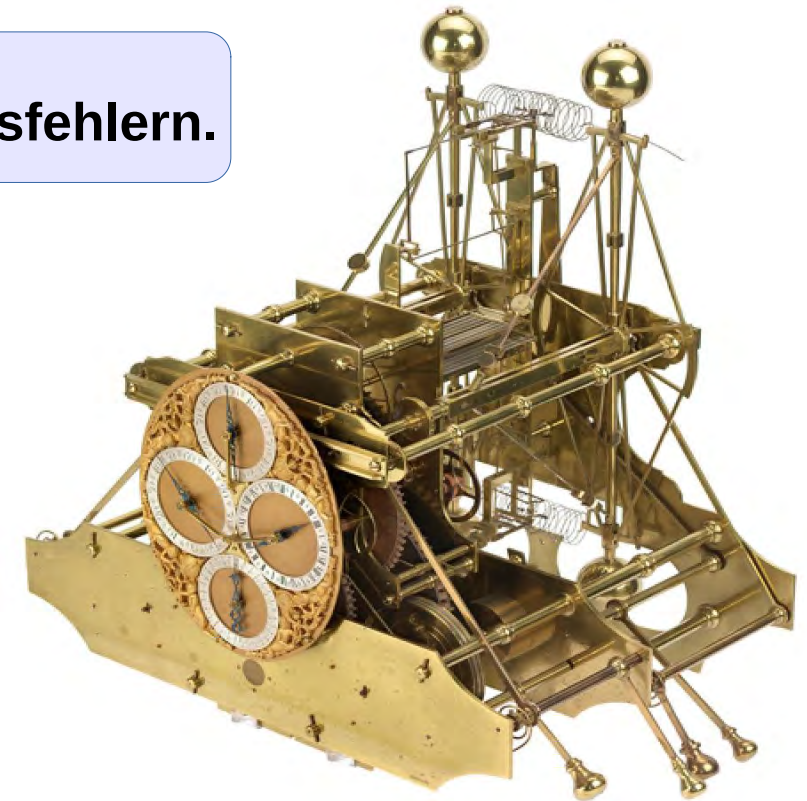
Bedeutung der Zeitmessung für die Navigation

Abweichungen der Uhrzeit führen zu Navigationsfehlern.

Das Problem bestand insbesondere in der Bestimmung des Längengrades (Längengradproblem).

Auslobung eines Preises für die Herstellung genauer Uhren zur Berechnung der nautischen Daten durch das englische Parlament 1714 nach einer Schiffskatastrophe bei den Scilly-Inseln 1707 mit 1550 toten Seeleuten.

Der Uhrmacher John Harrison erhält nur einen Teil des ausgeschriebenen Preises des Longitude Act für seinen Chronometer H1 sowie 1773 nach Intervention von King George III weitere Zahlungen für seinen Chronometer H4.



Harrison H1 von 1735
Bild: Royal Museums
Greenwich

H4 – Uhrahn der Schiffsuhren

Mit der Harrison H4 entwickelt John 1759 Harrison eine für die Seefahrt praktisch einsetzbare Uhr mit bisher unerreichter Genauigkeit (< 2min in 147 Tagen).

Trotz der anfänglich sehr hohen Kosten (ca. 3% eines Schiffes) setzt sich die zeitbasierte Längengradmessung gegen astronomische Methoden durch.

In der Folge werden Schiffe mit mehreren Uhren ausgerüstet, um Redundanz sicherzustellen. James Cook setzte einen Nachbau der H4 auf seinen Reisen ein.



Photo: National Maritime Museum, Greenwich

Positionsbestimmung auf hoher See

Geografische Breite:

Winkelmessung der Sonne oder des Polarsterns
(vergleichsweise einfach)

Geografische Länge:

Bestimmung des Momentes des höchsten Sonnenstandes
=> 12 Uhr

Vergleich mit der Werte mit denen der *Referenzzeit* der mitgeführten Borduhr (diese zeigt Greenwich Mean Time an)*.
=> Die Zeitdifferenz ist proportional zum Längengrad:

Beispiel zur Längengradbestimmung:
12 Uhr Ortszeit (astronomisch), GMT = 3:30 PM
 $\Delta t = 3,5 h$
$$\text{Längengrad} = \frac{3,5 h}{24 h} \cdot 360^\circ = 52,5^\circ \text{ östlicher Länge}$$

[48] APRIL 1767.		Distances of \odot 's Center from \odot , and from Stars west of her											
Days	Stars Names.	12 Hours.			15 Hours.			18 Hours.			21 Hours.		
		°	'	"	°	'	"	°	'	"	°	'	"
1	The Sun.	40.	59.	11	42.	34.	44	44.	9.	51	45.	44.	55
2		53.	32.	7	55.	4.	24	56.	36.	16	58.	7.	45
3		65.	39.	18	67.	8.	27	68.	37.	14	70.	5.	39
4		77.	22.	36	73.	48.	58	80.	15.	1	81.	40.	46
5		88.	45.	20	90.	9.	27	91.	33.	21	92.	57.	0
6		99.	52.	6	101.	14.	34	102.	36.	52	103.	59.	1
7		110.	47.	42	112.	9.	6	113.	30.	25	114.	51.	40
6	Aldebaran	50.	36.	10	52.	4.	5	53.	31.	57	54.	52.	44
7		62.	17.	43	63.	45.	10	65.	12.	34	66.	39.	57
8	Pollux.	31.	25.	48	32.	53.	11	34.	20.	40	35.	48.	12
9		43.	7.	5	44.	35.	4	46.	3.	8	47.	31.	15
10	Regulus.	17.	51.	57	19.	20.	36	20.	49.	25	22.	18.	27
11		29.	45.	36	31.	15.	26	32.	45.	26	34.	15.	35
12		41.	48.	49	43.	19.	55	44.	54.	10	46.	22.	36
13		54.	2.	11	55.	34.	36	57.	7.	12	58.	39.	59
14		66.	26.	28	68.	0.	18	69.	34.	20	71.	8.	33
15	Spica μ	25.	4.	34	26.	39.	23	28.	14.	26	29.	49.	44
16		37.	49.	37	39.	26.	14	41.	3.	5	42.	40.	8
17		50.	43.	40	52.	26.	59	54.	5.	31	55.	44.	15
18		64.	1.	2	65.	41.	3	67.	21.	18	69.	1.	48
19	Antares.	31.	37.	14	33.	19.	7	35.	1.	13	36.	43.	32
20		45.	18.	29	47.	2.	10	48.	46.	5	50.	30.	12
21		59.	14.	6	60.	59.	31	62.	45.	11	64.	31.	2
22		73.	23.	37	75.	10.	43	76.	58.	2	78.	45.	31
23	Capri-	33.	17.	26	35.	4.	38	36.	52.	4	38.	39.	45
24	corni.	47.	41.	9	49.	29.	53	51.	18.	44	53.	7.	40
25	z Aquilæ.	65.	57.	35	67.	29.	54	69.	2.	36	70.	35.	39
26		78.	24.	51	79.	59.	9	81.	33.	29	83.	7.	45

Seite für den Monat April des Nautical Almanac von 1767 mit Angabe der Abstände von Gestirnen für **feste Uhrzeiten** an den Tagen des jeweiligen Monats

*Die Uhr kann erst nach der Ankunft im Hafen nachgestellt werden

Auswirkungen der Normalzeit

„Telegraphie und Eisenbahn sorgten gemeinsam für eine Vereinheitlichung des Zeitsystems in Deutschland und für eine Veränderung des Zeitbewusstseins.“



Foto Fritz Grünwald, fotocommunity.de

König, Wolfgang: Die Entwicklung der Technik in Deutschland im 19. Jahrhundert. S. 283 bis 302.
in Wolfgang König, Helmuth Schneider (Hrsg.): Die technikhistorische Forschung in Deutschland von 1800 bis zur Gegenwart. 2006.

Taschenuhr

Die Entwicklung der Taschenuhr vom Prestigeobjekt zum Präzisionsinstrument
(Änderung der technischen Funktion)

Harrison (1693-1776)

John Arnold (1739-1799)

Abraham Louis Breguet (1747-1823)

Entscheidende Erfindungen:

Schwingen der Spirale

Kompensation temperaturbedingter

Einflüsse auf die Unruh

Verbesserte Hemmungen

Aufzug mittels Krone

Automatischer Aufzug



Taschenuhr für Marie Antoinette,
1827 fertiggestellt.
Photo: Breguet



„Dollar Watch“,
USA, Ende 19. Jhdt.
Photo: Wikipedia Commons

Armbanduhren

1810 konzipierte Abraham Louis Breguet im Auftrag der Königin von Neapel eine erste Armbanduhr.

Die Armbanduhr wurde im 19. Jhdt. bevorzugt von Frauen getragen und ersetzte die Uhr an Ketten.



Bild: Chateau Versailles

Bis zu Beginn des 20. Jhdts. wurde dagegen die Taschenuhr von Männern bevorzugt.

Die aufkommende Luftfahrt und der Einsatz im ersten Weltkrieg führten dazu, dass die einfach abzulesende Armbanduhr vermehrt von Männern getragen wurde.

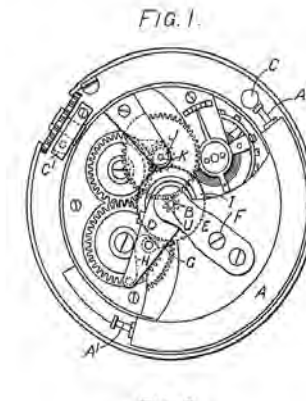
Die Produktion von Armbanduhren stieg nach 1918 stark an und versorgte die Bevölkerung mit einem wichtigen Instrument der aufkommenden „*Tempo-Gesellschaft*“*

*vgl. Borscheid, Peter: Die Tempomacher. Zeitschrift für Unternehmensgeschichte , 41. Jahrg., H. 2. (1996), S. 125-138.

Automatischer Aufzug



John Harwood ließ sich mit Harry Cutts 1924 den automatischen Aufzug einer Armbanduhr in der Schweiz patentieren. Hierbei wird eine Schwungmasse durch die Handbewegung in Drehung versetzt und spannt die Feder des Werkes.



Zeichnung aus Patent 106583

Die Fortis AG brachte 1926 die erste serienmäßige Armbanduhr mit automatischem Aufzug auf den Markt.



Photo: Fortis AG

Elektrische Uhren

Entwicklungen im 19. Jahrhundert (Auszug):

Alois Ramis, 1815 elektrostatische Pendeluhr

Carl August von Steinheil, 1839, elektrische Nebenstellenuhr

Alexander Bain 1841: Elektromagnetische Pendeluhr

Steinhauer und Rabe, 1889, Uhr mit elektrisch angetriebenem

Torsionspendel



Die elektronische Armbanduhr

Technische Voraussetzungen

Verfügbarkeit geeigneter Miniaturbatterien (Quecksilber-Zinkoxid Knopfzellen ab 1942)

1948: Transistortechnik für elektronische Schaltkreise, ab 1959 ICs, ab 1967 C-Mos ICs

Quarzkristalle und deren Fertigungstechnik

Soziale Bedingungen

Wunsch nach höherer Präzision

Teilhabe am technischen Fortschritt

Symbol für Innovation

Kaufkraft

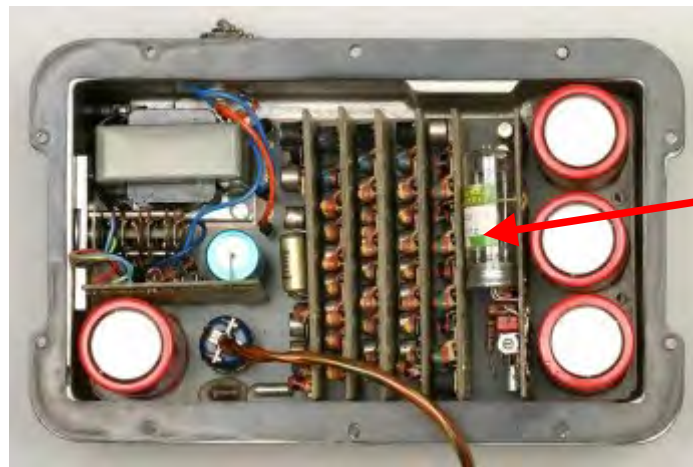


Kommerzielle Quarzuhren

Kommerzielle Quarzuhr (Schiffs-Chronometer von Patek Philippe).
Zu hoher Stromverbrauch führte zu einer kurzen Lebensdauer der Batterie.



Patek Philippe Chronotome 1962



Quarz in Glaskolben
mit $f = 10$ Hz

Quarzuhren steigern die Genauigkeit der Zeitmessung bei Sportveranstaltungen

Erste tragbare Quarzuhr
(Crystal Chronometer QC-951)
Preis 1964: 1500 DM



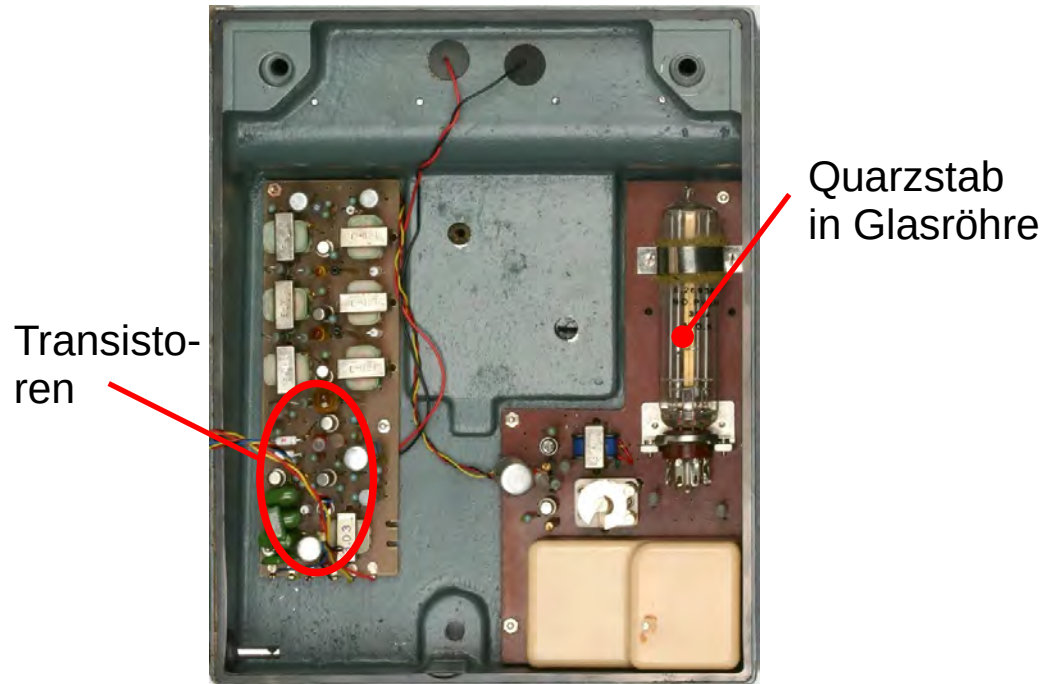
Einsatz bei Messungen



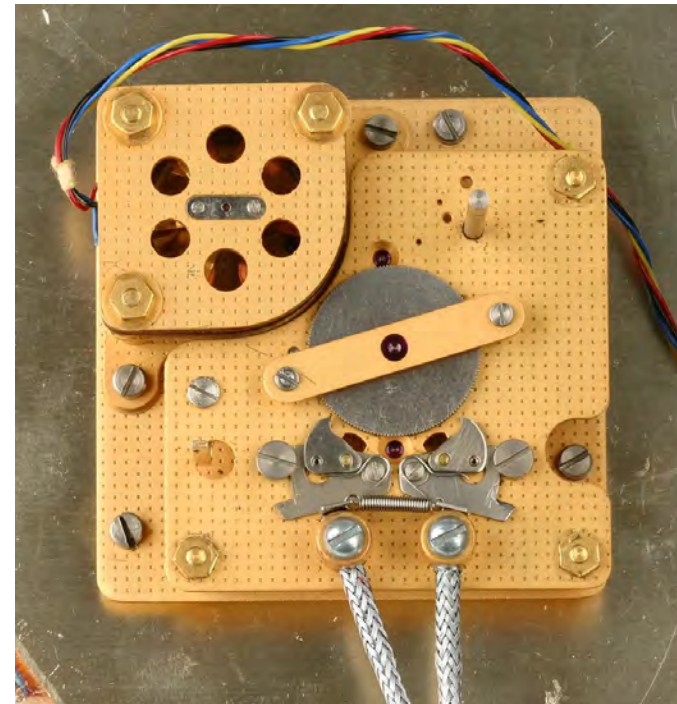
Bilder: Seiko Museum

Crystal Chronometer QC-951

Innenansicht des Chronometers



Zeigerwerk mit Synchronmotor



Bilder: Deutsches Uhrenmuseum Furtwangen

„Scientific Olympics“

Für die Olympischen Spiele 1964 wurde die Fa. Seiko als offizieller Lieferant der Zeitmesser ausgewählt.

Seiko lieferte 36 verschiedene Ausführungen und 1278 Zeitmesser, die auf der damals neuesten Technologie basierten.

Ziel war es, der Weltöffentlichkeit die wissenschaftliche und technische Leistungsfähigkeit nach dem Wiederaufbau des Landes zu demonstrieren.

Für die Entwicklung der Quarz-Stoppuhr für Sportereignisse wurden 1961 drei Teams aus den Firmen Seikosha Clock Factory, Daini Seikosha und Suwa Seikosha beauftragt.

Die neu entwickelte tragbare Stoppuhr wurde intensiv getestet und sehr positiv bewertet (0,2 s). Durch die eingesetzte Transistortechnik und den sparsamen Synchronmotor konnte der Stromverbrauch drastisch gesenkt werden (Laufzeit 1 Jahr).

Seiko wurde 1963 zum offiziellen Lieferanten der Olympischen Spiele 1964.



Elektronische Armbanduhren

Voraussetzungen

Geeignete Energiequelle: Silber Zink-Knopfzelle

Stromsparende Schaltkreise: CMOS ICs

Miniatur-Schrittmotor als Antrieb

Automatisierung der Fertigung

Miniaturisierung der elektronischen Komponenten

Kaufbereitschaft der Kunden



Werk zu Armbanduhr Junghans
Astro Quartz um 1974
Photo: Deutsches Uhrenmuseum

Elektronische Armbanduhren

Evolution der mechanischen Armbanduhr

Amerikanisch-Französische Kooperation zwischen Elgin und Lip:

Entwicklungsarbeiten seit 1946

19.03.1952, Ankündigung der Uhr

1958: Verkaufsstart

Elektromechanische Uhr, bei der die Unruhe durch eine feststehende Spule angeregt wird (fixed coil system)

Die Erregung der Spule erfolgte durch Kontakte, die jedoch verschleißanfällig waren.

Gegenüber konventionellen mechanischen

Uhren konnte jedoch keine wesentliche Steigerung der Ganggenauigkeit erreicht werden.



Elektronische Armbanduhren

Hamilton Electric 1957 – 1969

Mechanisches Werk mit Schwungrad,
das von Elektromagneten angeregt wurde
(Moving Coil System).

Preis 89,50 US\$ (400 DM)

Der Antrieb basiert auf einer Entwicklung von
Helmut Epperlein aus Ersingen bei Pforzheim.

Schwachpunkt waren die elektrischen Kontakte zum
Einschalten der Spule.

Die Schweizer Uhrenindustrie äußerte sich sehr zurückhaltend
und favorisierte weiterhin die mechanische Automatikuhr.



Hamilton—the world's first electric watch!

It's no secret that electricity is the best way to run a wrist watch. Greater accuracy. Fewer parts. Less cost. But it was not until only this year that Hamilton was first to produce the electric watch. Your Hamilton dealer will tell you more about this, the biggest watch news in 617 years. (Ask in night.) Approx. \$130; Women's \$120; See also \$175. Hamilton Watch Company, Lancaster, Pennsylvania.

HAMILTON



Abbildungen: Science Museum London

Elektronische Armbanduhr

Bulova Accutron, Stimmgabeluhr mit elektromagnetischer Anregung, entwickelt von dem Elektroingenieur Max Hetzel.

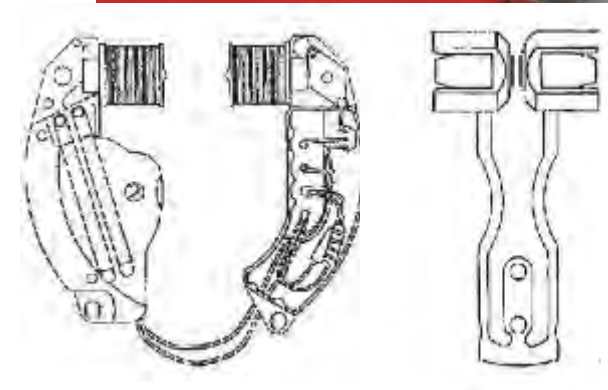
Frequenz der Gabel: 360 Hz

Verkaufspreis 1960: 175 US\$

Eingeführt 1960, Ganggenauigkeit: einige Sekunden / Tag

Steigerungen der Ganggenauigkeit um den Faktor 10 gegenüber einer gut einregulierten mechanischen Uhr.

Die ersten Damenuhren kamen 1970 auf den Markt.



Abbildungen: Bulova

Quarzuhren – Eine disruptive Entwicklung

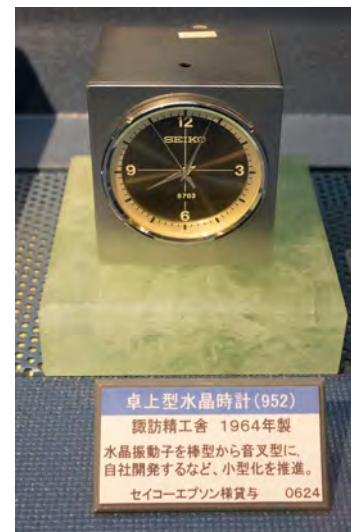
Seiko brachte 1964 mit dem Modell 952 eine Quarz-Taschenuhr auf den Markt.
1966 und 1967 wurden Prototypen entwickelt.

Ab 1969 wurde die Seiko Astron verkauft.
Diese gilt als erste Quarz-Armbanduhr der Welt und
verschaffte Seiko die Technologieführerschaft
bei elektronischen Armbanduhren.

Die Uhr wurde in kleiner Stückzahl in Handarbeit
gefertigt und war deutlich teurer als mech. Uhren.

Die Frequenz des Quarzes betrug zunächst 8,192 Hz,
danach 16,384 Hz und schließlich 32,768 Hz.

Seiko 952 (1964)



Seiko Astron 35 SQ (1969)



Bildquelle: Seiko Museum
<https://www.plus9time.com/gishodo-watch-clock-museum>

Die Schweizer ziehen nach

Seiko hatte aufgrund einer starken Marktposition in Japan ausreichend Kapital, um wesentliche Komponenten der analogen Quarzuhr (Quarz, IC, Motor) selbst zu entwickeln.

Die kleineren Betriebe der Schweizer Uhrenindustrie versuchten im Rahmen von Kooperationen zusammen mit dem neu gegründeten Forschungsinstitut CEH ein elektronisches Uhrwerk auch gegen interne Widerstände zu entwickeln.

Die getesteten Prototypen übertrafen die mechanischen Werke deutlich in Bezug auf gleichmäßigen Lauf.

Das kommerzielle Kaliber Beta 21 wurde in verschiedenen Uhren verbaut und war ein finanzieller Misserfolg.

Rolex 5100 mit Beta 21 Werk



Bild: World of time

Die vollelektronische Armbanduhr

Die ersten elektronischen Armbanduhren wiesen äußerlich nur geringe Unterschiede zu den mechanischen Ausführungen auf. Bei beiden Typen wurden die Uhrzeit i.d.R. durch Zeiger, die sich über einem Ziffernblatt drehen angezeigt.

Der Antrieb der Zeiger erfolgte bei der Quarzuhr über einen Miniatur-Schrittmotor.

Die Schwingfrequenz des Quarzkristalls wurde über Frequenzteiler auf den benötigten Wert herabgesetzt.

Bei den Olympischen Spielen 1964 setzte Seiko auch eine Digitalanzeige ein, bei der einzelne Segmente der Anzeige durch eine elektronische Schaltung angesteuert wurden.

Die digitale Anzeige wurde in der Folge bei Armbanduhren mit LED- und LCD-Anzeige zum Standard.



Bild: Seiko

Uhren ohne Zeiger – der Time Computer

1972: Pulsar, der „Time Computer“
Entwickelt in einer Zusammenarbeit zwischen
Hamilton und Electro Data

Abkehr von der analogen Anzeige,
der Markt war dominiert von Seiko und
den schweizerischen Herstellern.

Anzeige der Uhrzeit bei Drücken
eines Knopfes mit LEDs.

Kaufpreis 2100 US\$, entsprach dem
Preis eines Chevrolet Vega.

1977 Produktionsende mit Aufkommen
der stromsparenden LCD Anzeigen.



Zeit des Umbruchs

Die 1960er bis Mitte der 1970 Jahre waren die Blütezeit der mechanischen Armbanduhren

Die ersten Quarzuhren wurden noch nicht als ernsthafte Konkurrenz angesehen.

1970 wurden 98% des Umsatzes mit mechanischen Uhren erzielt.

1974 erzielten die japanischen Hersteller 6% des Umsatzes mit Quarzuhren.

Zwischen 1974 und 1978 stieg die Anzahl der verkauften Exemplare von 1,8 auf 19,7 Millionen an.

Reduzierung des Stromverbrauches der Seiko-Uhren um 60% zwischen 1973 und 1979, max. 90% bei einem analogen Modell.

Verdreifachung der Segmentanzahl => Mehr Funktionen (Taschenrechner)

Reduzierung der Dicke von 5 mm auf unter 3 mm, Reduzierung des Volumens auf 1/8.

Einsatz photolithografischer Verfahren zur Herstellung des Quarzes

ermöglicht die Massenproduktion, Preisverfall auf 2 bis 3% der ersten Quarzuhren.



Photo: Seiko

Elektronische Armbanduhren

Auswirkungen

Kostenreduzierung durch Massenproduktion.

Reduzierung von Gewicht und Abmessungen.

ermöglicht Uhren mit kurzlebigen modischen Designs.

Preisverfall der Quarzuhren führt zu Absatzproblemen

mechanischer Uhren.

Mechanische Uhren nur noch im mittleren und oberen Preissegment (haute gamme).

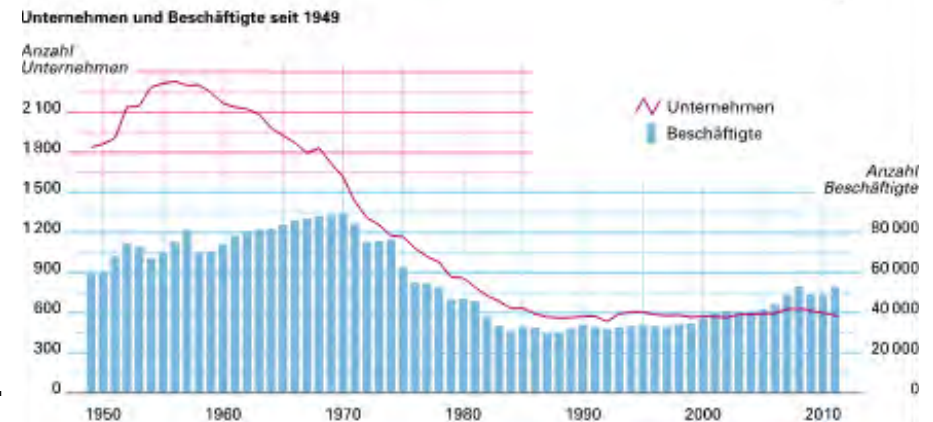
Mechanische Uhren werden nicht mehr wegen möglichst hoher

Ganggenauigkeit gekauft, ästhetische und symbolische Funktion werden

ausschlaggebend.

Deutliche Veränderung der Marktanteile zugunsten asiatischer Elektronik-Hersteller.

Krise der Schweizer Uhrenindustrie und Neuordnung durch Nikolaus Hayek (SMH).



Betriebs- und Beschäftigtenzahlen in der Schweizer Uhrenindustrie 1882-2011

Quelle: <https://hls-dhs-dss.ch/de/articles/013976/2020-08-11/>

Präzisionsuhren Zeitnormale



HOCHSCHULE HEILBRONN

Pendeluhren als Präzisionsinstrumente

Einsatz als Zeitstandard

Problem des Pendelschwingers: Eine Temperaturänderung bewirkt eine Änderung der Pendellänge und damit der Frequenz.

Um eine Gangabweichung $< 1 \text{ s /Tag}$ zu erreichen, muss die Temperatur innerhalb einer Toleranz von 1 K gehalten werden oder die thermische Längendehnung kompensiert werden.

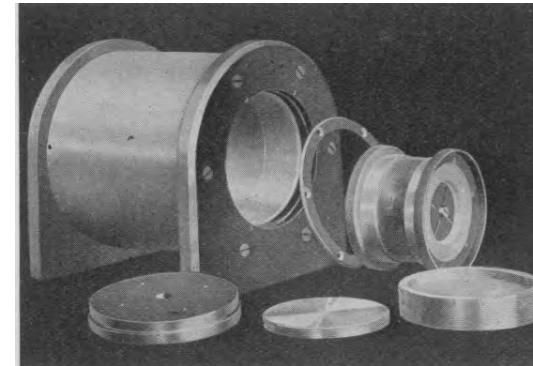
Riefler Uhr Nr. 98 mit
Kompensationspendel aus
Nickelstahl

Bild: Deutsches Museum

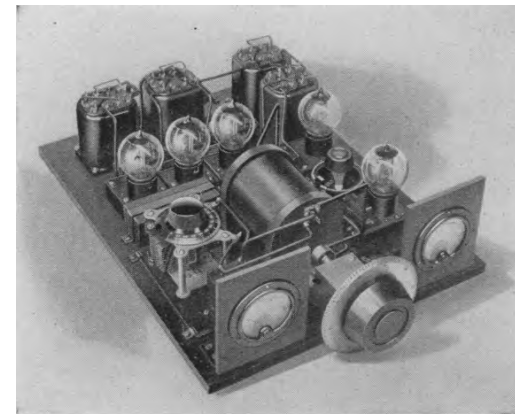


Quarzkristalle als Taktgeber

Quarzgesteuerter Oszillator von Marrison 1929



Temperierkammer
mit Quarzkristall



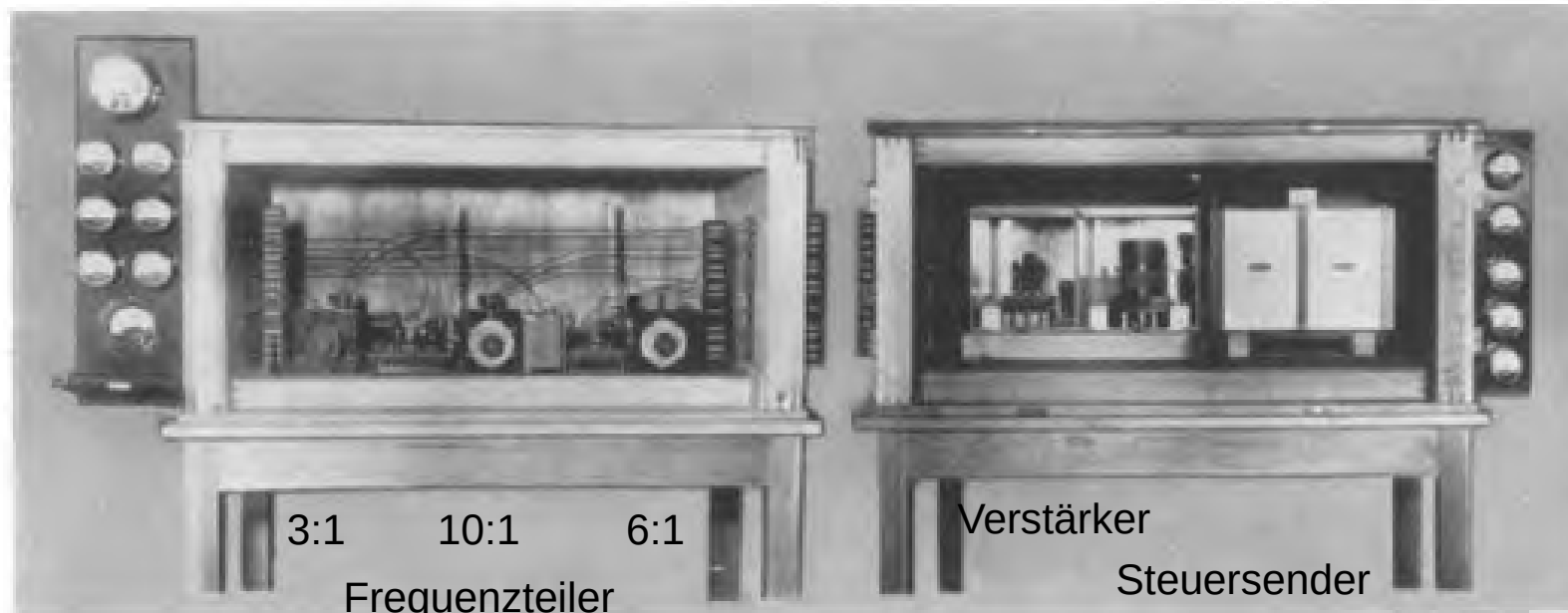
Steuerelektronik

Fig. 12—Standard Frequency Oscillator without Shield.

Marrison, W. A.: A high precision standard of frequency. in: Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Volume 17, Nr. 7 Juli, 1929, S. 1103 - 1122

Quarzuhren

Quarzuhr der Physikalisch Technischen Reichsanstalt (PTR) nach 1935



innerer Thermostat
mit Schwingquarz

Deutlich gesteigerte Ganggenauigkeit gegenüber
den bisherigen mechanischen Pendeluhrn (Riefler)

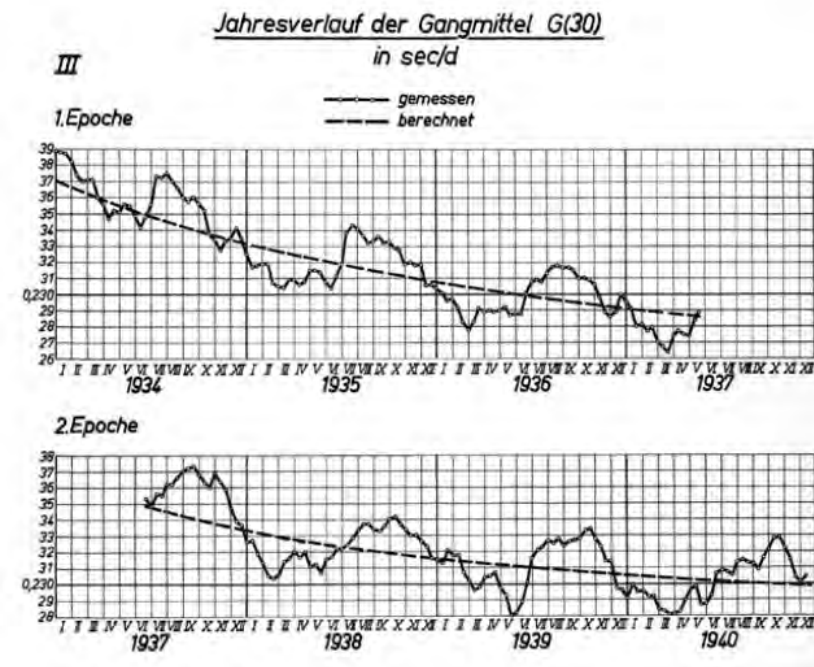
Quelle: Scheibe, A.: Genaue Zeitmessungen, in:
Trendelenburg, F; Hund, F. : (Hrsg.): Ergebnisse der
exakten Naturwissenschaften, Bd.. 15, Berlin 1936,
S.262-310.

Auswirkungen der Quarzuhr

Periodisch auftretende Abweichungen der Zeitmessung mit Quarzuhren gegenüber den per Funk empfangenen Zeitzeichen astronomischer Leituhren führten zu der Erkenntnis, dass die Erdrotation schwankt.

Man führte die Ursache auf periodische Schwankungen und Veränderungen des Rotations-Trägheitsmomentes der Erde zurück.

Gangabweichung der Quarzuhr III der PTR bezogen auf eine mit astronomischer Zeitskala verbundenen Leituhr.



Quelle: Scheibe, A.: Genaue Zeitmessungen, in: Trendelenburg, F; Hund, F. : (Hrsg.): Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Bd.. 15, Berlin 1936, S.262-310.

Die Atomuhr und die Neudefinition der Zeit



HOCHSCHULE HEILBRONN

13. Oktober 1967: Internationale Neudefinition der Sekunde durch die 13. Generalkonferenz für Maß und Gewicht:

“Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids Cs-133 entsprechenden Strahlung.”

2018 (Richtlinie 2019/1258 der Europäischen Kommission):

Die Sekunde, Einheitenzeichen s, ist die SI-Einheit der Zeit.

Sie ist definiert, indem für die Cäsiumfrequenz $\Delta\nu$, der Frequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms 133, der Zahlenwert 9 192 631 770 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit Hz, die gleich s^{-1} ist.“

Atomuhren

Konzept

Lord Kelvin schlug 1979 vor, die Resonanzschwingungen von Atomen, die beim Übergang von einem Energieniveau auf ein anderes emittiert werden, als Grundlage für die Zeitmessung zu verwenden.

Umsetzung

Von Isidor Rabi wurde in den 1930er Jahre erste Konzepte für Atomuhren entwickelt und 1945 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Während Rabi Cäsium als Element vorsah, realisierten Harold Lyons und seine Kollegen vom NBS 1948 die erste Atomuhr mit Ammoniak, mit dem die Frequenz eines Quarzkristalls reguliert wurde ($f = 21,9 \text{ Ghz}$).

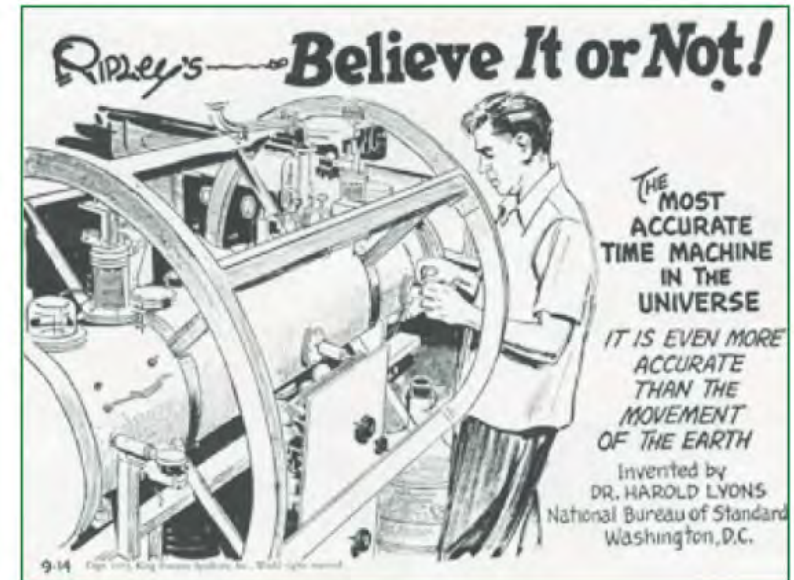


Erste Atomuhr mit Ammoniak Molekülen, Harold Lyons (rechts) mit Edward Condon (NBS direktor)

Bild: Measure, Vol. 2, Nr. 4, December 2007, S. 78.

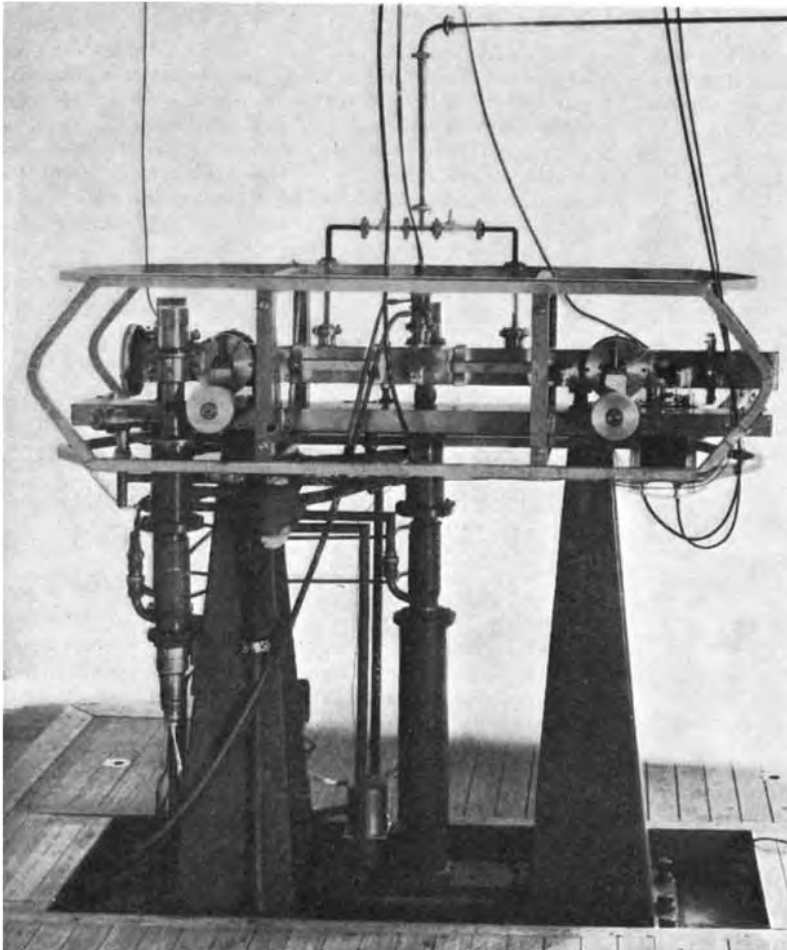
Die Entwicklung der Atomuhr

Trotz der prinzipiell möglichen Steigerung der Ganggenauigkeit konnten die beiden Ammoniak-Atomuhren von Lyons die Genauigkeit der besten Quarzuhren nicht übertreffen. Die Arbeiten an dem dritten Gerät wurden zugunsten einer Ausführung mit Cäsium nicht weitergeführt. 1955 wurden die Arbeiten des NBS aus finanziellen Gründen und wegen anderer Projekte unterbrochen.



Louis Essen und seine Kollegen am National Physical Laboratory (NPL) in Teddington (GB) stellten 1955 die erste Atomuhr auf Cäsiumstandard vor. (340 Hz, Ganggenauigkeit 10^{-9})

Atomuhren – Der neue Zeitstandard



Cäsium Resonator von Essen und Parry 1955

Auf Basis der Schwingungen einer emittierten elektromagnetischen Strahlung mit der Frequenz f wurde eine Neudefinition der Zeiteinheit vorgeschlagen mit der Periodendauer $1/f$ als Basis.

In der Folge wurde die Ephemeridensekunde als Zeiteinheit durch ein Frequenznormal abgelöst

Essen, L; Parry, J. V. L.: An atomic standard of frequency and time interval, Nature, 176, (1955) S. 280–284.

Atomuhren



Die Atomuhren der PTB:

Cäsium Atomuhren CS1 (1969) und CS2 (1985) sowie die Cäsium-Fontänen CSF1(1999) und CSF2 (2009).

Bild: PTB Braunschweig

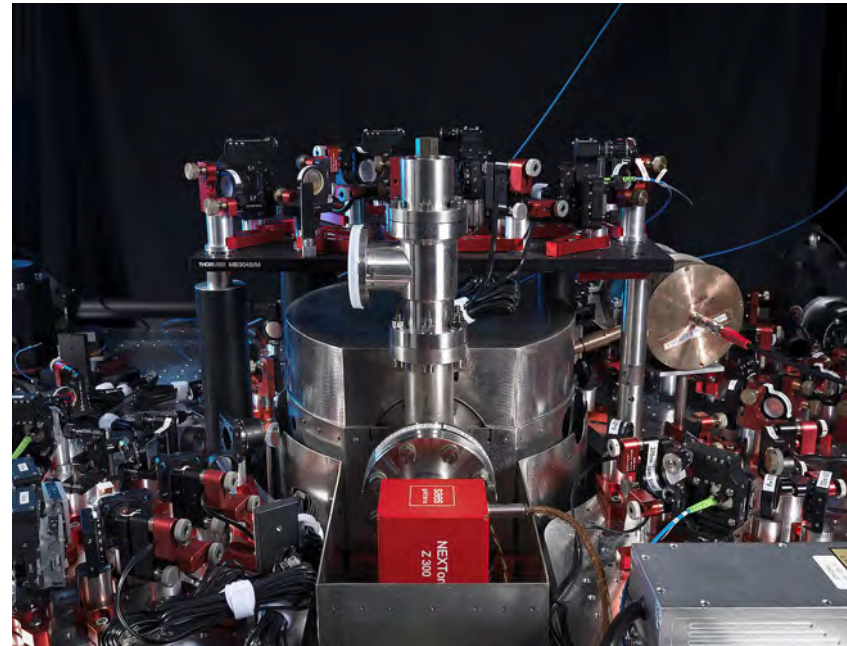
Zukünftige Entwicklungen

Optische Atomuhren:

Anregung der Ionen oder Atome durch optische Schwingungen (Laserlicht).

Hierdurch werden Quantensprünge auf zwei unterschiedliche Energieniveaus ausgelöst, bei denen eine elektromagnetische Strahlung mit konstanter Frequenz entsteht.

Optische Uhr mit Strontium-Ionen



Quelle: PTB Braunschweig

Arbeits-Zeit

Thomas Morus: Vom Handwerk

„Diese teilen nämlich den Tag mitsamt der Nacht in vierundzwanzig gleiche Stunden ein und kennen eine Arbeitszeit von nur sechs Stunden.

Drei Stunden arbeiten sie am Vormittag; danach essen sie zu Mittag und halten eine Rast von zwei Stunden.

Dann arbeiten sie wieder drei Stunden und beschließen den Tag mit dem Abendessen.

Da sie die erste Stunde von Mittag an rechnen, gehen sie gegen acht Uhr zu Bett; acht Stunden brauchen sie zum Schlafen.“

Quelle: Morus, Thomas: De optimo reipublicae statu deque nova insula Utopia libellus vere aureus, nec minus salutaris quam festivus, ... Basel 1518, S.80 – 81.
Übersetzung: Projekt Gutenberg



Ambrosius Holbein:
Die Insel Utopia, Titelbild
der dritten Auflage 1518.
Aufnahme: British Library



Der Drahtzieher, 1425.
Bild: Historisch-Wissenschaftliche
Stadtbibliothek Nürnberg

Arbeitszeiten im Mittelalter

Lichttag als Maß für Arbeitszeiten
von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang

Organisation z.B. über vier Signale:

Arbeitsbeginn, Mittagspause, Ende der Mittagspause, Arbeitsende
Kirchliche oder städtische Glocken als Referenz (Horengeläut).

Werkglocken sind seit dem 13. Jhdt. bekannt.

Moderne Uhrzeitangaben finden sich erst ab 1377
in den Arbeitsordnungen der Zünfte (Frankfurt / Köln).

Konkrete Stundenangaben finden sich bei kleinen Aufträgen
und bei Abweichungen (Überstunden / Fehlstunden).

vgl. G. Dohrn-van Rossum, S. 377 ff.



Der Tagwerker, 1425.

Bild: Historisch-Wissenschaftliche
Stadtbibliothek Nürnberg

Arbeitszeit und Frühindustrialisierung

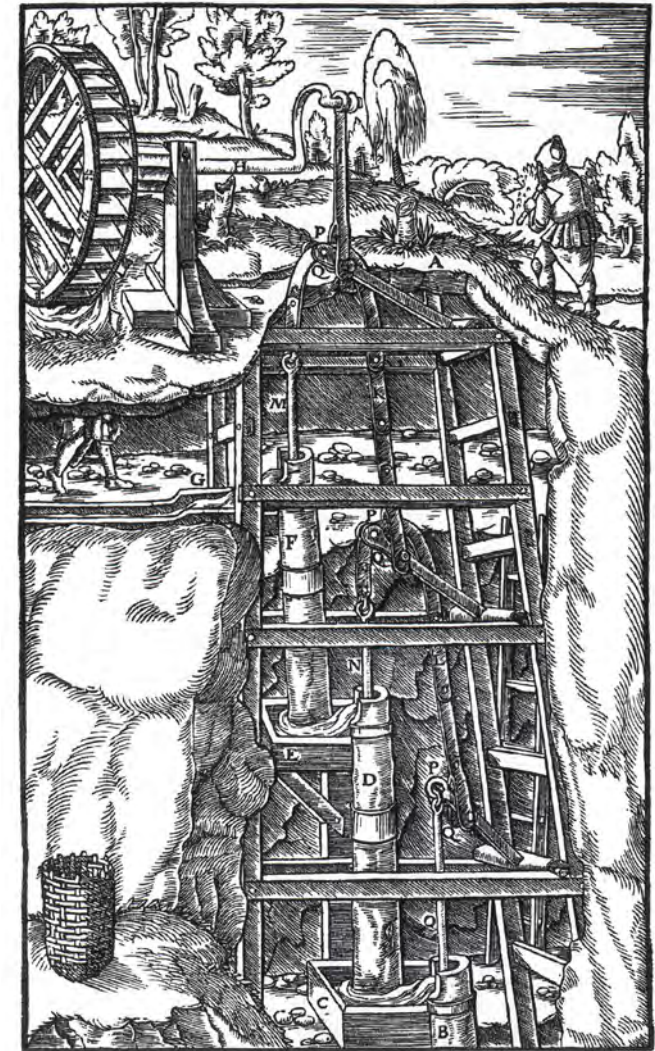
Bergbau

Arbeitszeiten mussten unabhängig vom „*Lichttag*“ und dem Läuten städtischer oder kirchlicher Glocken organisiert werden. „*Hora*“ als Begriff der bergmännischen Schicht.

Geregelte Arbeitszeit und moderne Stundenrechnung im 14. Jhdt. in der Bergordnung des Johann von Üsenberg, im Auftrag von Albrecht III., Herzog von Österreich und Graf von Tirol 1372:

„item der hüttmann und ein arbeiter er sye im berg uff der Erzmuly im Schmelczhoff etc. zum tag acht stunden werken vier stund vor mittag und vier stund noch mittag, diss ist die recht berggeschicht alles ungevarlichen.“

siehe hierzu: Zeitschrift für die Geschichte des Oberrheins, Band 2, Freiburg 1887, S. 447.



Bergwerk mit Saugpumpe und Wasserradantrieb,
G. Agricola: Vom Bergwerk. Basel 1557

Zeitmessung im Industriezeitalter

Uhren dienen der Koordination von
Abläufen der Industriegesellschaft

- Transport und Verkehr
- Militär
- Wissenschaft
- Kommunikation
- Taktung von Produktionsprozessen
- Basis für Lohnsysteme



T&N Uhr

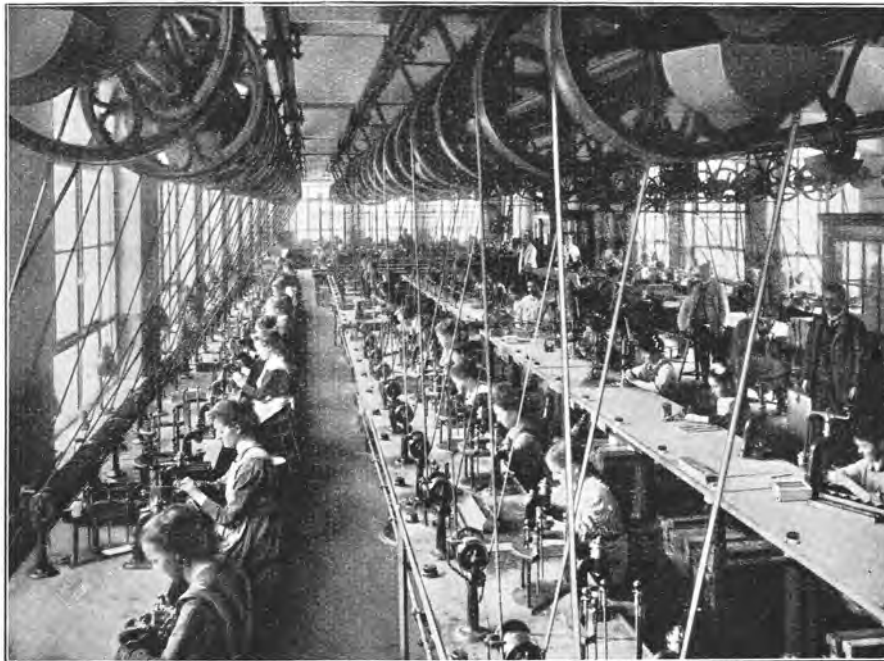
Bild: wikipedia commons

Arbeitsteilung und Zeiterfassung werden wesentliche
Elemente der industriellen Arbeit.

Zeitmessung und Industrialisierung

„Die Uhrenkultur und das industrielle System reisten gemeinsam in die Zukunft, zwei untrennbar verbundene Kräfte, die sich gegenseitig definieren und formen halfen.“

Jeremy Rifkin, Uhrwerk Universum. Die Zeit als Grundkonflikt des Menschen, S. 162.



Junghans Uhrenfabrik 1925

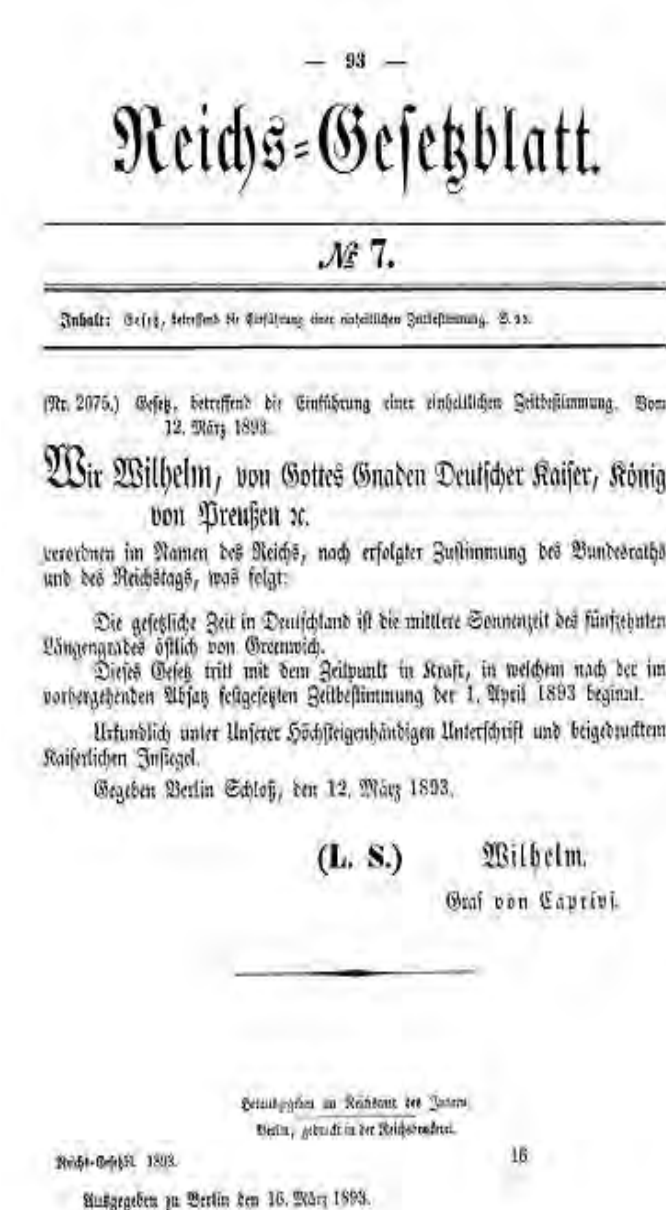
Quelle: Adolf Kistner: Die Schwarzwälder Uhr;
Karlsruhe 1927, Wikipedia Commons

Die „Normalzeit“

1891 werden die Fahrpläne der deutschen Bahnunternehmen nach der Mitteleuropäischen Zeit (MEZ) ausgerichtet.

12. März 1893: Gesetz betreffend die Einführung einer einheitlichen Zeitbestimmung

Als gesetzliche Uhrzeit wurde die mittlere Sonnenzeit für den 15. Längengrad östlich von Greenwich (bei Görlitz) festgelegt.



Auswirkungen der Normalzeit

Beschleunigung der Informationsübermittlung durch optische und später elektrische Telegraphen.

Beschleunigung des Reisens durch die Eisenbahn.

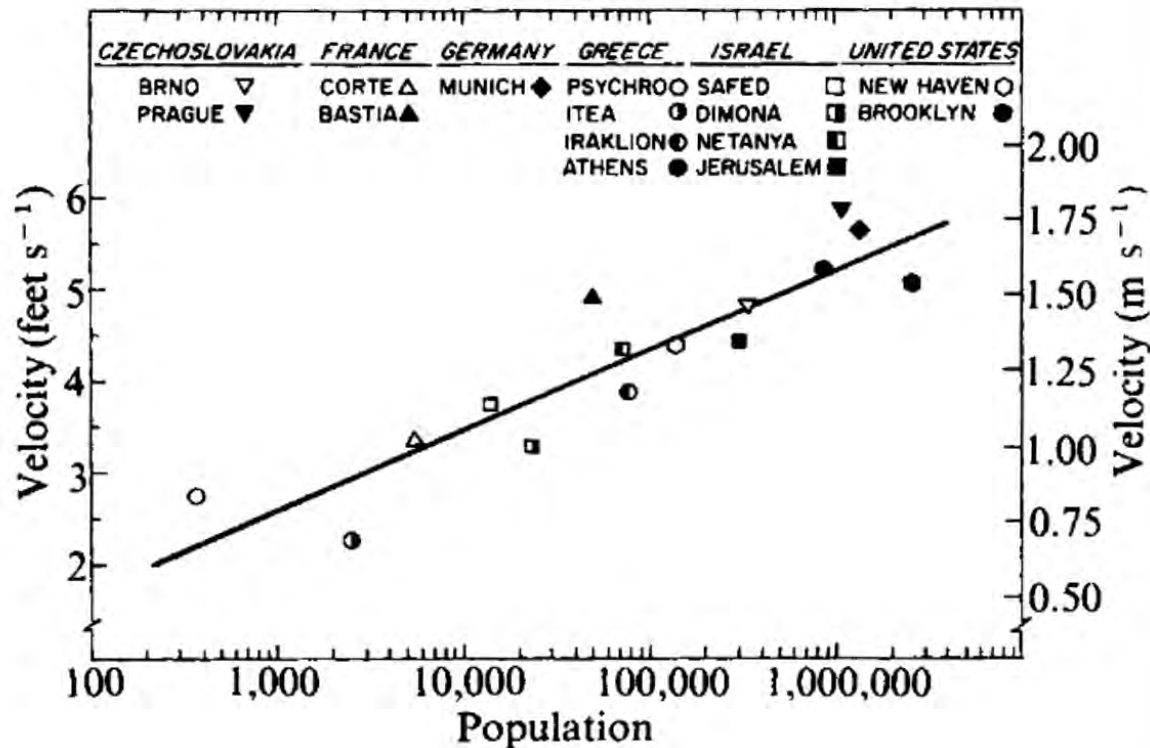
„Telegraphie und Eisenbahn sorgten gemeinsam für eine Vereinheitlichung des Zeitsystems in Deutschland und für eine Veränderung des Zeitbewusstseins.“



Foto Fritz Grünwald, fotocommunity.de

König, Wolfgang: Die Entwicklung der Technik in Deutschland im 19. Jahrhundert. S. 283 bis 302.
in Wolfgang König, Helmuth Schneider (Hrsg.): Die technikhistorische Forschung in Deutschland von 1800 bis zur Gegenwart. 2006.

Beschleunigung der Arbeit – Beschleunigung des Lebens



*„Zeit wird damit zum Inbegriff
der Ökonomie, Zeit sparen zum
ersten Imperativ aller ökonomischen
Tätigkeiten.“*

Quelle: Deutschmann, Christoph: Der Normalarbeitstag.
Historische Funktion und Grenzen des industriellen
Zeitarrangements in: König, Helmut; von Greiff, Bodo;
Schauer, Helmut (Hrsg.): Sozialphilosophie
der industriellen Arbeit, S. 77-95, hier S. 81.

Gehgeschwindigkeit für Entfernungen über 15 m (50 ft)
als Funktion der Bevölkerungsgröße

Quelle: Bornstein, Marc, H; Bornstein, Helen, G.: The pace of life
Nature, Vol. 259 (1976), S. 557–559.

Die Vermessung der Arbeitszeit



Charles Chaplin in: „Modern Times“

Zeit und Arbeit

Die Beobachtung periodisch wiederkehrender Ereignisse führte bereits in der Antike zu einer zunehmenden zeitlichen Organisation des Alltagslebens.

Mesopotamien:

Unterscheidung zwischen kultureller Zeiteinteilung und administrativer Zeiteinteilung zur Quantifizierung der Arbeitsleistung

2100 bis 2000 v. Chr. (Ur III Periode) : 60 Shekel (Zeiteinheiten) pro Werktag

Die Arbeitsleistung wurde in „Personentagen“ aus der Anzahl der Personen und der geleisteten Arbeitstage berechnet.

Unterteilung eines Arbeitstages in artifizielle 60 gin₂ (Einheiten) für den Tag bzw. die Nacht.

Hiermit wurde die Arbeitszeit / -tag ggf. auf bestimmte Anteile eines „vollen Arbeitstages“ bezogen, z.B. $\frac{2}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{6}$ der normalen Arbeitszeit („Teilzeit“).

Arbeitsplanung in der Antike

Tontafel aus Girsu
(mod. Tello), ca.
2500-2340 v. Chr.

Mit Angabe eines
Plans zur Fütterung
von Schweinen mit
Aufstellung der
Futtermenge pro
Zeiteinheit je nach
Größe und Alter
der Tiere.

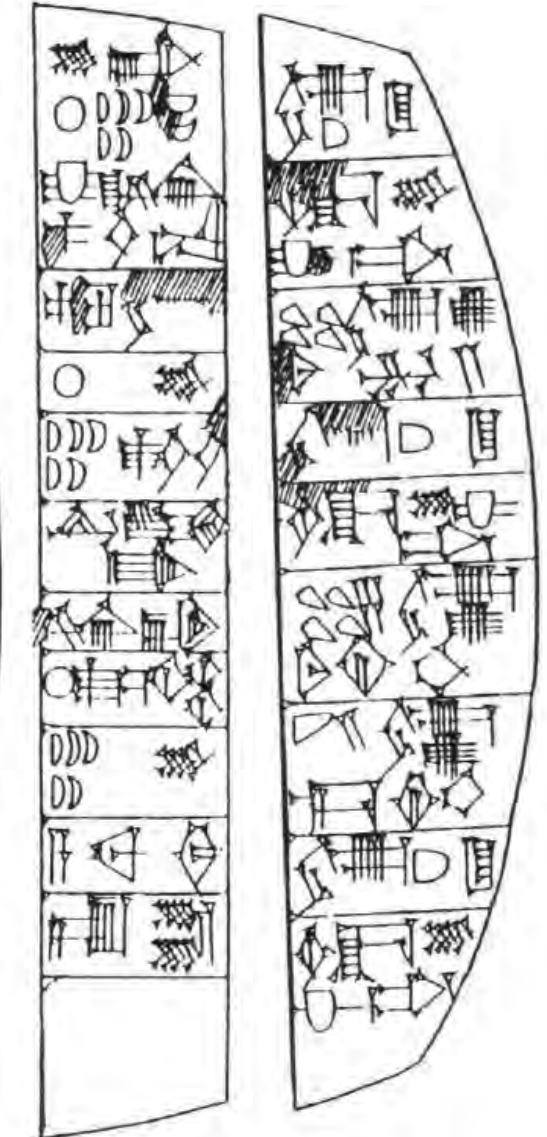
Harvard Museum of the
Ancient Near East,
Harvard University,
Cambridge, Massa-
chusetts, USA

Quelle: <https://cdli.mpiwg-berlin.mpg.de/artifacts/221340>

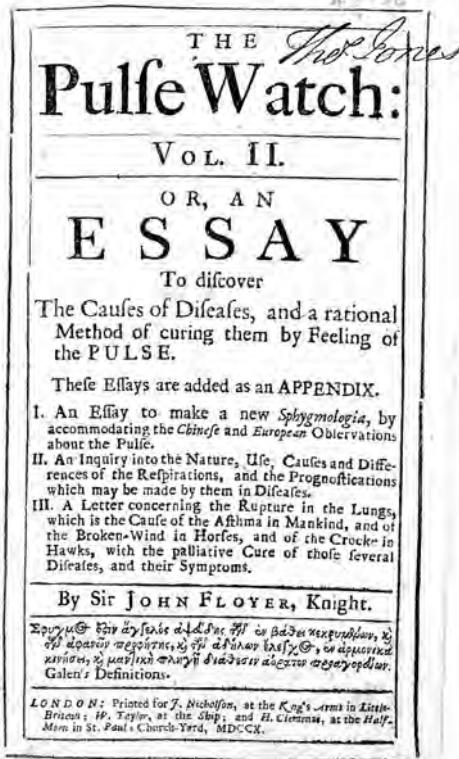
Vorderseite



Rückseite



Die Vermessung der Arbeitszeit



Die erste bekannte Stoppuhr wurde von Samuel Watson für den englischen Arzt John Floyer entwickelt und ab 1690 eingesetzt.

Zu dem Minuten- wurde auch ein Sekundenzeiger installiert, der per Knopfdruck angehalten werden konnte.

Hiermit sollte insbesondere die Genauigkeit der Blutdruckmessungen verbessert werden.

Ab 1707 war die Pulsuhr kommerziell erhältlich.



Pulsmessung durch den Arzt, bei der der Patient die Uhr stiehlt, Spanischer Maler.

Die Vermessung der Arbeitszeit

1760, M. Perronet:

Messung der Arbeitszeit bei der Nadelherstellung in der Normandie.

Arbeitsteilige Herstellung von Nadeln aus Messing in 18
Schritten (Operationen)

Organisation der Arbeitsabläufe anhand der gemessenen
Zeiten der einzelnen Fertigungsschritte (18 „Operationen“)

Ausschlaggebend war die Dauer der einzelnen Operationen
Vorläufer der tayloristischen Arbeitsteilung.

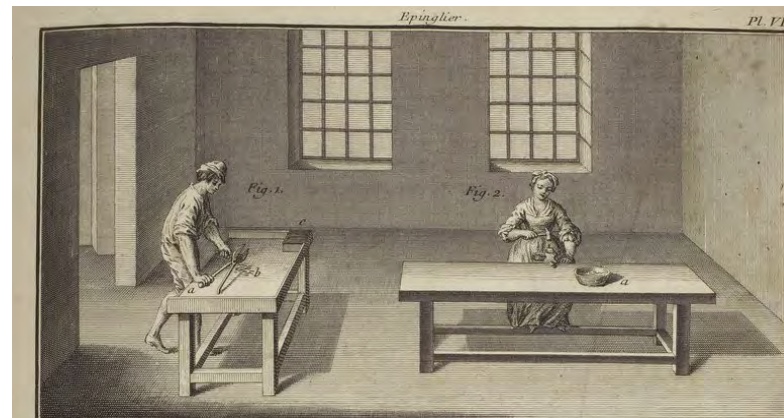
Wettbewerbsvorteil führte zu Abwehrmaßnahmen der
Konkurrenz aus Paris.

Die Nadelherstellung wurde in der Folge als Beispiel für die arbeitsteilige Industriearbeit
(Karl Marx) bzw. deren Vorteile (Charles Babbage) zitiert.

Arbeitsteilung und Arbeitsorganisation am Beispiel der Nadelherstellung



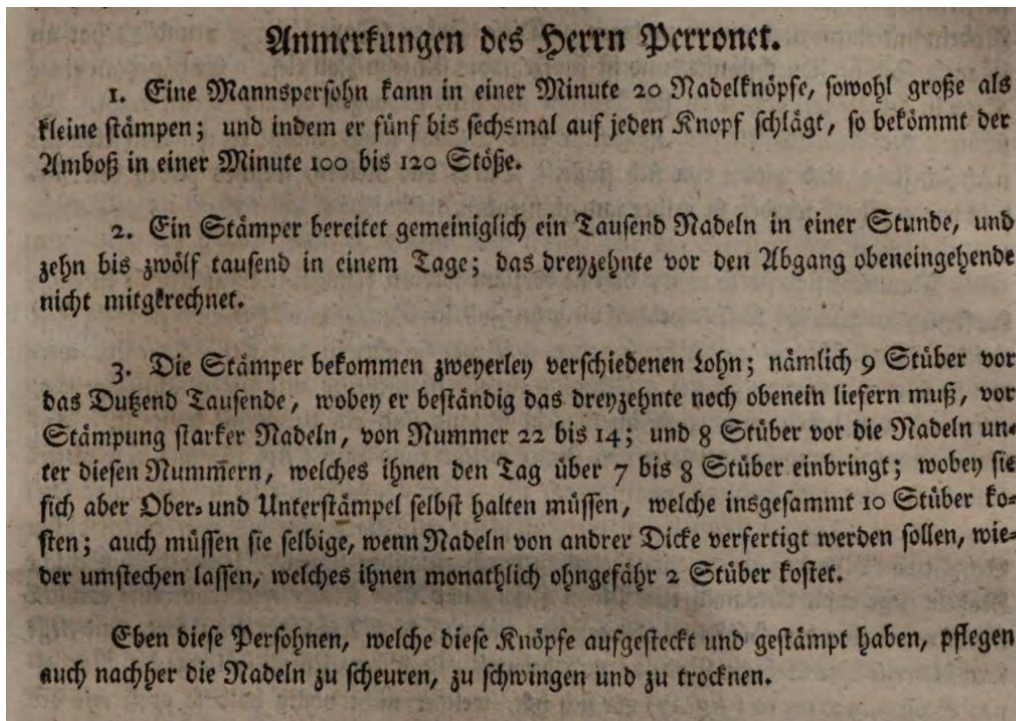
Darstellung einzelner
Arbeitsschritte der
Nadelherstellung



Abbildungen: de Réaumur, M.: Art de l'épinglier, par, avec des additions de M. Duhamel Du Monceau,
et des remarques extraites des Mémoires de M. Perronet, Paris 1761.
online: Bibliothèque National de France, <https://www.bnf.fr/fr>

Zeit und Arbeit

Arbeitsteilung und Arbeitszeiterfassung als Grundlage einer zeitbasierten Entlohnung



Auflistung der Arbeitsleistung pro Person bei der Nadelherstellung:

(Formen der Nadelköpfe)

20 Nadeln pro Minute

1000 Nadeln pro Stunde

12000 Nadeln pro Tag

Entlohnung:

Nach Stückzahl und Stärke der Nadeln.

Die Werkzeuge für die Fertigung müssen selbst angeschafft werden.

Umarbeitungen der Werkzeuge gehen zu Kosten der Nadler.

Zur Arbeitsteilung in der Nadelherstellung:

Adam Smith. The Wealth of Nations, New York 1902, S. 44-45.

Karl Marx: Das Kapital, Band 1, 1867, S. 424.

Charles Babbage: On the Economy of Machinery and Manufactures, London 1832, S. 153.

Quelle: Schauplatz der Künste und Handwerke, oder vollständige Beschreibung derselben. Band 1, Berlin 1762, S. 235.

Arbeitsteilung als Folge von Arbeitszeiten

Arbeits-
schritt Arbeits-
kraft Zeit für
ein Pfund
Nadeln
in h Kosten für
ein Pfund
Nadeln
in h Verdienst
pro Tag
Herstell-
kosten

NAME OF THE PROCESS.	Workmen.	Time for making 1 lb. of Pins.	Cost of making 1 lb. of Pins.	Workman earns per Day.	Price of making each Part of a single Pin, in Millionths of a Penny.
		<i>Hours.</i>	<i>Pence.</i>	<i>s. d.</i>	
1. Drawing Wire (§ 224.)	Man ..	.3636	1.2500	3 3	225
2. Straightening wire (§ 225.)	Woman	.3000	.2840	1 0	51
	Girl ..	.3000	.1420	0 6	26
3. Pointing ... (§ 226.)	Man ..	.3000	1.7750	5 3	319
4. Twisting and Cutting Heads ... (§ 227.)	Boy ..	.0400	.0147	0 4½	3
	Man ..	.0400	.2103	5 4½	38
5. Heading ... (§ 228.)	Woman	4.0000	5.0000	1 3	901
6. Tinning, or Whiten- ing ... (§ 229.)	Man ..	.1071	.6666	6 0	121
	Woman	.1071	.3333	3 0	60
7. Papering .. (§ 230.)	Woman	2.1314	3.1973	1 6	576
		7.6892	12.8732		2320

Number of Persons employed :—Men, 4 ; Women, 4 ; Children, 2.
Total, 10.

Arbeitsteilung und Arbeitszeiten

Charles Babbage berechnet den Vorteil der arbeitsteiligen Produktion auf Basis der Zeiten für die Arbeitsschritte sowie der Löhne für die hierbei Beschäftigten:

„The pins would therefore cost, in making, three times and three quarters as much as they now do by the application of the division of labour.“

Babbage, Charles: On the economy of machinery and manufacture, London 1832, S. 183.

Die Vermessung der Arbeitszeit

Geheime Messung der Arbeitszeiten in der Old Derby China Manufactory 1792
mit einer Stoppuhr und Weitergabe der Ergebnisse an den Direktor Mr. Duesbry:

„I, Thomas Mason, this 22nd day of December 1792 solely pledge myself to use my utmost caution at all times to prevent the knowledge that I am employed to use a stopwatch to make observations of work done in Mr Duesbry’s manufactory; and to take such observations with the utmost truth and accuracy in my power and to give the results thereof faithfully to Mr Duesbry.“

Quelle: Currie, R.M.: Work Study 1977, S. 7.



Derby Keramik eines Töpfers, 19. Jhdt.,
<https://www.derbyporcelain.org.uk/porcelain>

Zeiterfassung in der Industrie

Industrielle Produktion:

Zeit wird zur wesentlichen „Ressource“
bzw. Kostenfaktor der Produktion.

Zwang zur Rationalisierung bedeutet
Abläufe zu optimieren,
Beschleunigung der Prozesse
und Vorgänge

Zeit als Steuerungsfaktor für die
Entlohnung

Soziale Diskurse um die Arbeitszeit.



Stempeluhr (Stechuhr), Dey Patents Company,
Syracuse, N.Y. (USA), um 1900
Quelle: Industriemuseum LVR

Stoppuhr und Zeiterfassung

„Da auch nicht die kleinste Handreichung mehr als selbstverständlich hingenommen, sondern zum Gegenstand genauer Untersuchung und Zeitmessung gemacht werden muß, so ist die Stoppuhr, die jede Bewegung in Bruchteilen von Sekunden mißt, zum Wahrzeichen, zum Grundstein dieser neuen technischen Wissenschaft geworden. Ebenso wie die Bearbeitungsmaschinen allmählich so umgestaltet worden sind, daß die größtmögliche Ausnutzung der natürlichen Bewegungszuordnung erreicht werden konnte, muß auch der Muskelmechanismus des Menschen auf den günstigsten Wirkungsgrad einstellbar sein.“

Georg Schlesinger 1913, Zitiert in: Sonja Apel: Die Entwicklungsgeschichte der Stoppuhr und ihre Verwendung als Rationalisierungsinstrument. Technikgeschichte Bd. 74 (2007) H. 1 S. 58.

Zeiterfassung und Rationalisierung

Aufnahme des ganzen Arbeitsprozesses

Vier Stufen der Zeitaufnahme

- Arbeitsstudie (Abläufe erfassen)
- Rationalisierung des beobachteten Arbeitsablaufes
- Zeitaufnahme, Eintragen in die Beobachtungskarte
- Auswertung der gemessenen Zeiten



Zeitermittlung in der Produktion der Eastern Mfg. Co
Quelle: Stevens Institute of Technology Hoboken NJ,
F.W Taylor Collection

Zeitmessungen

Bewegungs-Zeitkarte

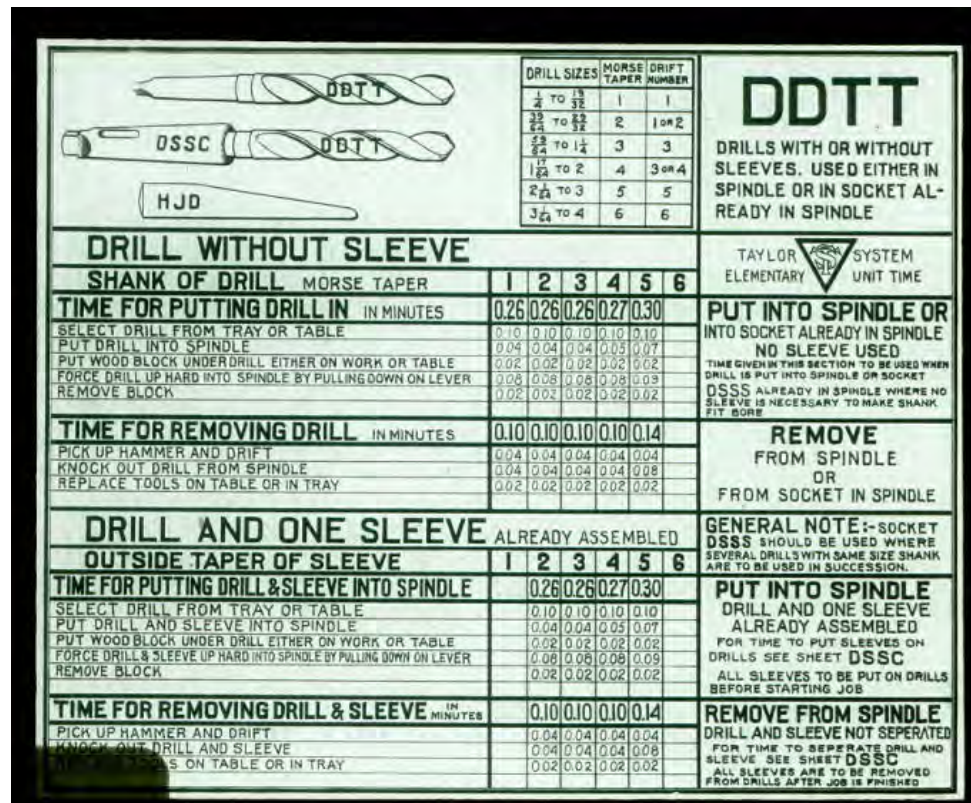
Öffnen und Schließen	Minuten
Aktenschublade, öffnen und schließen, keine Auswahl	0,04
Mappe, Deckel öffnen oder schließen	0,04
Schreibtischschublade, Seite von Standardschreibtisch öffnen .	0,014
Mittlere Schublade öffnen	0,026
Seite schließen	0,015
Mitte schließen	0,027
Stuhlbetätigung	
Aufstehen von Stuhl	0,033
Setzen auf Stuhl	0,033
Drehstuhl drehen	0,009
Im Stuhl zu Nebentisch oder Aktenschrank rollen (4 Fuß Maximum)	0,5

Stoppuhren (ab 1880) als wesentliches Messinstrument der „wissenschaftlichen Betriebsführung“



Industriestoppuhr mit Dezimaleinteilung
Bild: Hanhard-Stoppuhren

Quelle: Jeremy Rifkin, Uhrwerk Universum. Die Zeit als Grundkonflikt des Menschen, S. 161.



DRILL SIZES	MORSE TAPER	DRIFT NUMBER
1/8 TO 3/16	1	1
3/16 TO 1/4	2	1 OR 2
5/16 TO 3/8	3	3
7/16 TO 1/2	4	3 OR 4
9/16 TO 5/8	5	5
5/8 TO 3/4	6	6

DRILL WITHOUT SLEEVE		MORSE TAPER					
		1	2	3	4	5	6
TIME FOR PUTTING DRILL IN IN MINUTES		0.26	0.26	0.26	0.27	0.30	
SELECT DRILL FROM TRAY OR TABLE		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	
PUT DRILL INTO SPINDLE		0.04	0.04	0.04	0.05	0.07	
PUT WOOD BLOCK UNDER DRILL EITHER ON WORK OR TABLE		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
FORCE DRILL UP HARD INTO SPINDLE BY PULLING DOWN ON LEVER		0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	
REMOVE BLOCK		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
TIME FOR REMOVING DRILL IN MINUTES		0.10	0.10	0.10	0.10	0.14	
PICK UP HAMMER AND DRIFT		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	
KNOCK OUT DRILL FROM SPINDLE		0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	
REPLACE TOOLS ON TABLE OR IN TRAY		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	

DRILL AND ONE SLEEVE ALREADY ASSEMBLED		OUTSIDE TAPER OF SLEEVE					
		1	2	3	4	5	6
TIME FOR PUTTING DRILL & SLEEVE INTO SPINDLE		0.26	0.26	0.27	0.30		
SELECT DRILL FROM TRAY OR TABLE		0.10	0.10	0.10	0.10		
PUT DRILL AND SLEEVE INTO SPINDLE		0.04	0.04	0.05	0.07		
PUT WOOD BLOCK UNDER DRILL EITHER ON WORK OR TABLE		0.02	0.02	0.02	0.02		
FORCE DRILL & SLEEVE UP HARD INTO SPINDLE BY PULLING DOWN ON LEVER		0.08	0.08	0.08	0.09		
REMOVE BLOCK		0.02	0.02	0.02	0.02		
TIME FOR REMOVING DRILL & SLEEVE IN MINUTES		0.10	0.10	0.10	0.14		
PICK UP HAMMER AND DRIFT		0.04	0.04	0.04	0.04		
KNOCK OUT DRILL AND SLEEVE		0.04	0.04	0.04	0.08		
REPLACE TOOLS ON TABLE OR IN TRAY		0.02	0.02	0.02	0.02		

Zeitstudien werden als Grundlagen der wirtschaftlichen Betriebsführung in den 1920 Jahren in Deutschland im Rahmen der Rationalisierungsbewegung eingeführt.

Arbeitszeiten werden als Grundlage der Kostenkalkulation eingeführt.

Bearbeitungszeiten für Bohroperationen
 Quelle: Stevens Institute of Technology Hoboken NJ,
 F.W Taylor Collection

„Die Beschleunigung des Arbeitens auf Basis von Zeitstudien markierte einen tiefen Einschnitt in der Geschichte des Produzierens.“ (P. Borscheid)

Uhrzeit lesen

NEU

Apple Watch Ultra 2



Ab 899 €

Kaufen

„Britische Schulen tauschen analoge gegen digitale Uhren aus
Denn die Schüler können die alten Modelle oft nicht mehr lesen.“

Süddeutsche Zeitung 07.05.2018

*“We live in a world where everything is digital.
We are moving towards a digital age and they do not
necessarily have analogue watches anymore and they
have mobile phones with the time on.”*

Time Educational Supplement, 24.04.2018



Bild: heise.de, apple.com



Salvador Dalí. The Persistence of Memory, 1931, Bildquelle: MOMA

Quellen

Apel, Sonja: Die Entwicklungsgeschichte der Stoppuhr und ihre Verwendung als Rationalisierungsinstrument.

Technikgeschichte Bd. 74 (2007) H. 1, S. 43 - 67.

Balmer, T.: The Operation of Sand Clocks and Their Medieval Development, Technology and Culture, Vol. 19, No. 4 (Okt., 1978), S. 615-632.

Bauch, Andreas: – Die SI-Basiseinheit Sekunde, Mitteilungen der physikalisch-technischen Bundesanstalt, 1/2012 S. 23-36.

Dohrn-van Rossum, Gerhard: Die Geschichte der Stunde, Köln 2007.

Graf, Rüdiger: Zeit und Zeitkonzeptionen in der Zeitgeschichte, Version: 2.0, in: Docupedia-Zeitgeschichte, 22.10.2012.

Holford-Strevens, Leofranc: The History of time - A Very Short Introduction Oxford University Press, Oxford 2005.

Landes, David: Revolution in time. Harvard University Press, Cambridge 2000.

Levine, Juda: The history of time and frequency from antiquity to the present day. Eur. Phys. J. H 41, 1–67 (2016)
DOI: 10.1140/epjh/e2016-70004-3.

http://docupedia.de/zg/graf_zeit_und_zeitkonzeptionen_v2_de_2012 DOI: <http://dx.doi.org/10.14765/zzf.dok.2.266.v2>

Lombardi, Michael, A.; Heavner, Thomas P. ; Jefferts, Steven R.: NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second, Measure, Vol. 2, Nr. 4, Dezember 2007, S. 71 -89.

Metz, Karl-Heinz: Ursprünge der Zukunft der Geschichte der Technik in der westlichen Zivilisation. Paderborn 2006.

Mierach, Michael: MTM - von Anfang an richtig, MTM-Vereinigung, Hamburg 2002

Rifkin, Jeremy: Uhrwerk Universum. Die Zeit als Grundkonflikt des Menschen, München 1988.

Trüb, Lucien: Strombetriebene Zeitmesser, Kultur und Technik 3/2012, S. 52-56.