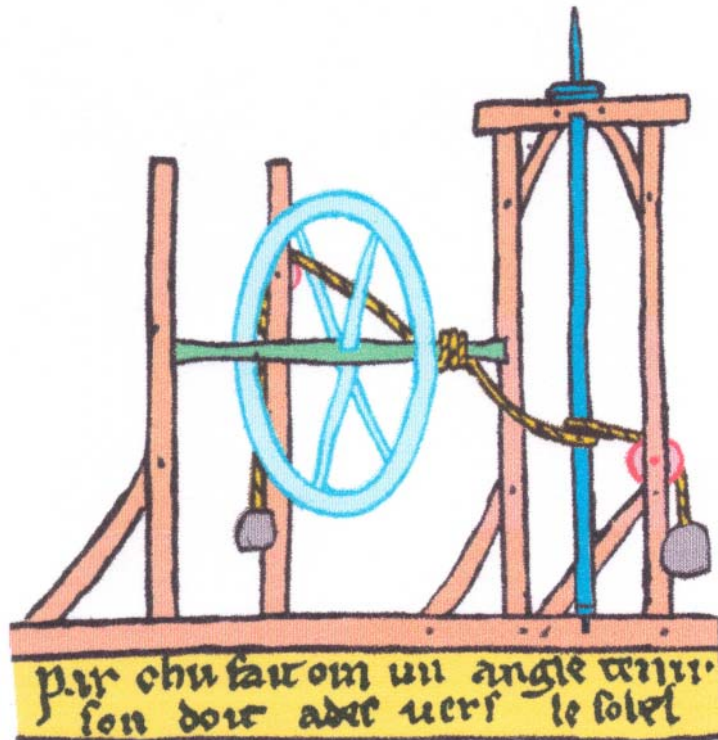


GESCHIEDENIS VAN HET METEN VAN TIJD



Een studie voor de Biofysica tentoonstelling

Teylers Museum

najaar 1996

A.A. Verveen
1997 / 2004

GESCHIEDENIS
VAN HET
METEN VAN TIJD

**Digitale copie
januari 2004**

Gemaakt via een scan en OCR (optical character recognition)
Hierdoor is de copie qua opmaak niet identiek met het origineel.

Inhoudelijk vonden er geen veranderingen plaats
behalve correcties op taal, spelling en typefouten.

NIET IN DE HANDEL
De oorspronkelijke oplage is uitverkocht

Verboden te kopiëren, op één exemplaar voor eigen gebruik na.

Exemplaar nr: 00

ISBN 90-9010200-0
Oplage: 100 exemplaren
ringband met helder slap kaft
© A.A.Verveen

Vervaardigd met Papyrus[©]
op een Atari Falcon 030

~~Font: Dutch 801~~

Tekeningen na scannen in zwart-wit
tot kleurmallen bewerkt met Stadt[©]

Afgedrukt op Epson Stylus Color inkjet-printer (300 dpi)

Eigen druk, Lisse 1997
Niet in de handel

~~Prijs f 50,-- franco thuis~~

~~Schriftelijk te bestellen bij A.A. Verveen, Poelwaai 3, 2162 HA Lisse~~
~~(voor zover de voorraad strekt)~~

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	I
Ter inleiding	III
Lijst van illustraties	IV
Tellen	1
De landbouwrevolutie: het geschreven woord, geschreven cijfers en getallen	2
Tellen en meten: de menselijke maat	3
Tijd in de oertijd: lichamelijke inspanning	5
Interpretaties van het tijdsbegrip	6
Het eerste gebruik van tijd	7
Tijd meten aan de zon en de sterren	7
De oudste klok: de maan	7
De schaduw van de zon als baken voor de voorspelling van de seizoenen	9
De eerste metingen van tijd: de duur van het jaar	10
De lengte van het zonnejaar	11
Gemeten lengte van het zonnejaar: grafisch afgebeeld	13
De praktijk	13
Definitieve invoering van de zonnekalender	14
Intermezzo 1: De invoering van de westerse jaartelling	14
Intermezzo 2: De invoering van de Gregoriaanse kalender	15
Hoe laat is het? Het meten van het tijdsverloop gedurende de dag (en de nacht)	16
Waterklokken	16
Verbeteren van de nauwkeurigheid van de waterklok	20
Waterklokken in China	23
De Chinese watermolenklokken	25
De eerste gangregelaar: het echappement van I-Hsing	26
De overgang naar Europa.	28
Aandrijving met behulp van een gewicht (13 ^e eeuw en later)	29
Europa in de 13 ^e eeuw	29
Intermezzo 3: Hero's rijdende poppenkast	29
Een tussenvorm: de trommelclepsydra	30
Men had de klok horen luiden maar wist nog niet waar de klepel hing	31
De eerste mechanische klokken: circa 1335	33
Een alternatieve aandrijving: de veer met snek (fusee)	34
Het echappement	35
De klassieke gangregelaar: circa 1335 - circa 1675	37
De ontwikkeling van de balans van de spillegang	38
Nauwkeurigheid	39
Intermezzo 4: De overgang naar de huidige tijdrekening	39
Intermezzo 5: Populariteit - liepen de klokken onregelmatig?	40
De 17 ^e eeuw: uitvinding van de slingerklok: Galilei en Huygens	41
De fundamentele aard van de slinger	41
Christiaan Huygens en de slingerklok	42
Christiaan Huygens en de plaatsbepaling op zee	43
Eind 17 ^e - begin 18 ^e eeuw: de ankergang	44
De Grahamgang	46
Temperatuur-compensatie van de slinger	47
intermezzo 6: Verwarrend gebruik van de tijd	48
De overgang van de 19 ^e naar de 20 ^e eeuw: de elektromechanische klok	49
Intermezzo 7: De aarde als klok onttroond	52
De 20 ^e eeuw: teruggekoppelde elektronische klokken	53
Kwartsoscillatoren	56
Atoomklokken: verfijnde kwartsklokken	57
Samenvatting: nauwkeurigheid van de tijdmeting in de loop der eeuwen	59
Appendix: De slingerklok van Galilei	62
Het echappement van Galilei's klok	63
Referenties	64
In Nederlandse musea tentoongestelde of in depot aanwezige uurwerken	68

Ter inleiding

Dit is een stukje van het verhaal van de mens in zijn worsteling greep op zijn omgeving te krijgen door een instrument te ontwikkelen waarmee hij in de toekomst kon kijken: hij wilde weten wanneer hij zijn akkers moest bewerken, zij wanneer zij de maaltijd voor de boer die dan nog op het land was klaar moest gaan maken, of wanneer haar kind zou worden geboren. Deze slag om het verkrijgen van kennis over de meer of minder nabije toekomst vond in onze geschiedenis in een steeds wisselende context plaats. Om tijdstippen in onze agenda vast te kunnen leggen en om het tijdsloop onder onze wetenschappelijke waarnemingen te kunnen schrijven moeten wij het verloop van de tijd kunnen meten en moeten wij een systeem van afspraken hebben waardoor wij hierover met elkaar kunnen communiceren.

Dit verhaal over de ontwikkeling van ons vermogen tijd (d.w.z. tijdsduur) te méten, heb ik uit secundaire bronnen samengesteld. Het is daarom geen wetenschappelijke verhandeling. Primaire bronnen heb ik hier niet voor geraadpleegd en uit de nogal eens met elkaar in tegenspraak zijnde beschrijvingen uit de literatuur heb ik vooral getracht een lopend verhaal samen te stellen, de 'rode draad' te pakken te krijgen.

Leidraad hierbij is voor mij geweest hoe ons vermogen tijdsduren zo goed mogelijk te meten zich in de loop van onze geschiedenis heeft ontwikkeld. Veel ontwikkelingen die ook in het thema *meten van tijd* thuis horen heb ik daarom overgeslagen, zoals de ontwikkeling van het horloge en -een eerdere ontwikkeling- die van de draagbare zonnepijler of van de zandloper. Ook zulke belangrijke zaken als de ontwikkeling van het slagwerk heb ik terzijde gelaten.

Omdat Needham's monumentale werk *Science and Civilisation in China* de standaard referentie is voor de beschrijving van de ontwikkelingen in China volg ik zijn spelling voor de namen van de Chinese onderzoekers en uitvinders en dus niet -wat mijn voorkeur heeft de nu in China gangbare schrijfwijze.

De tekeningen zijn *kleurmodificaties van zwartwit afbeeldingen* uit de literatuur. ik was daarbij gebonden aan het beperkte palet van mijn tekstverwerker, met name omdat ik via de kleur van de **tekst** naar onderdelen van de tekeningen wilde verwijzen. Daardoor zijn delen van klokken en andere apparaten in (naar mijn smaak nogal zoetelijke) kleuren afgebeeld. De kleuren hebben een betekenis in samenhang met de tekst en verwijzen niet primair en vaak zelfs helemaal niet naar de eigen kleur van de desbetreffende onderdelen. Hierbij heb ik er ook naar gestreefd de kleuren te gebruiken als draden die door (delen van) het verhaal lopen.

De van elders overgenomen tekeningen of foto's van voorwerpen waren alle in grijs tinten uitgevoerd en zijn door mij *ingekleurd*. Daarbij heb ik mij wel laten leiden door eventueel aanwezige opmerkingen over de kleur van zo'n voorwerp, of door een gissing ernaar, maar het blijft natuurlijk inkleuren met een beperkt palet.

Voor de (bekende of geschatte) **ouderdom** van voorwerpen of ideeën gebruikte ik voor het gemak **het jaar 2000** als referentiejaar (**ouderdom** = 2000 - jaartal), waarbij ruim werd afgerond. In kantlijnen, tabellen en figuren is voor de '**leeftijden**' steeds dezelfde -hier gebruikte- kleur **rood** aangehouden.

Rood gekleurde **voetnoten** verwijzen naar **museale** of bibliografische verzamelingen.

Ondanks de hulp van de computer bij het zoeken naar literatuur blijkt het dat veel essentiële werken toch pas via gesprekken met anderen zijn te vinden. Ik ben hiervoor met name Kees Grimbergen veel dank verschuldigd, Hij attendeerde mij niet alleen op enkele bijzondere werken die anders buiten mijn blikveld zouden zijn gebleven, maar hij gaf mij die bovendien ter leen, met name het werk van Leopold, *The Alamus Manuscript*, dat essentiële schakels voor de loop van dit verhaal bleek te bevatten. Daarnaast ben ik hem dankbaar voor zijn kritische opmerkingen over het manuscript. Voor de inhoud van het verhaal ben ik echter uitsluitend zelf verantwoordelijk.

Lisse, oktober 1995 / januari 2004.

Lijst van illustraties

Fig.	Omschrijving	Bron (kleurmodificatie van:)	Blz.
	Kleurcode: zie blad IV		
	Titelblad	Zie figuur 20	
1	Spaakbeen van een wolf met telstrepen	Jelinek Fig. 708	
-	Demonstratie klok en context	-	4
2	Obelisk in gebruik als zonnewijzer	Koch, p. 267	9
3	Aflezen van de gnomon	Leach, Fig. 46	10
4	Egyptische gnomon + meetlat	Leach, Fig. 44	11
5	Meetstok voor meridiaandoorgangen	Leach, Fig. 47	11
6	Egyptisch schietlood	Leach, Fig. 47	11
7	Meetnauwkeurigheid voor de jaarlengte	-	13
8	De oudste nog bestaande waterklok	Leach, Fig. 48	16
9-1	Ontwikkeling van de clepsydra	-	17
9-2	Ontwikkeling van de clepsydra, vervolg	-	19
10	Exponentieel verloop	-	20
11	Griekse amfoor-waterklok	Lübke, Fig. 162	20
12	Griekse waterklok met vlotterregeling	de Vaux, pp. 287-322	22
13	De toverbeker van Benû Musa	Wiedemann, p. 340	22
14	Balanswaterklok	Needham III, p. 316	24
15	Molenwiel met clepsydra	-	25
16	I-Hsing's echappement	Needham III, Fig. 659	27
17	Waterklok naar el Gazari	Needham IV-2, Fig. 672	28
18	Hero's rijdende poppenkast	Usher, Fig. 33	29
19	De klok voor Alfonso de Wijze	Lloyd I, Fig. 382 en Needham IV-2, Fig. 647	30
20	Echappement van Villard de Honnecourt	Usher, Fig. 564; Janich, Fig 20 en Lloyd I, Fig. 383	31
21	Idem, uitwerking	Janich, pp. 230-232	32
22	Dondi's schets van zijn klok	Lloyd I., Fig. 387 Usher, Fig. 57	33
23	Veertrommel en fusee van een klok	Leopold I, p. 53	34
24	Veertrommel en fusee van een horloge	Usher, Fig. 113	34
25	Basisstructuur van het echappement		35
26	Mechanische klok	Lloyd I, Fig. 384	37
27	Ontwikkeling van de balans		38
	A en B	Leopold, pp. 34 en 46	
	C	-	
	D	Zie figuur 26	
-	"Torenklok"	Jacobs, p.573	39
28	Een slingerklok van Huygens	Lloyd I, Fig. 403	42
29	Balansveer van Huygens	Lloyd I, Fig. 406	44
30	Ankergang	Lloyd I, Fig. 404 en Spierdijk, p. 32	45
31	Grahamgang	Lloyd I, p. 665 en Spierdijk, p. 33	46
32	Pennengang	Spierdijk, p. 33	46
33	Compensatieslinger van Harrison	Spierdijk, p. 35	47
34	De vrije-slingerklok van Shortt	Usher, Fig. 11.8	50
35	De eerste met klok SH3 gemeten meridiaanpassages van april 1926	Hope-Jones, Fig. 103	52
36	Lamp van Fleming met oscillatorschakeling	Meyer, Fig. 14.1	53
37	Mechanische slinger en oscillerend circuit	-	53
38	Oscillatie van circuit en slinger	-	54

Lijst van illustraties (vervolg)

39	Oscillerend circuit met gangregelaar	Pippard, Fig. 26	55
40	Tegengekoppelde oscillator	Pippard, Fig. 11.4 D	55
41	Brugoscillator van Wien	Budak, Fig. 15-1b	55
42	Kwartsresonator	Frerking, Fig. 5-9	56
43	Kwartsoscillator	Kamas, p. 33	56
44	Schema van een atoomklok (atoom standaard)	Vos & Vos de Waal en Kamas, p. 38	58
45	Ontwikkeling van de nauwkeurigheid van de tijdmeting	-	59
46	Galilei's slingerklok	Lloyd I, p. 662	62
47	Echappement van Galilei	Spierdijk, p. 81	63

Commentaar

Het vragen om toestemming tot het overnemen van teksten (citeren) en tekeningen uit boeken is een moeizame, tijd en geld (aangetekende brieven) verslindende bezigheid.

Zelf begon ik met het aanvragen op basis van de in de boeken vermelde adressen (naam en plaats uitgever, meestal geen nader adres). Via het Internet kon ik enkele adressen opsporen, maar voor de meeste moest ik met incomplete adressen volstaan. De verschillende postdiensten stuurden zo'n brief meestal terug met 'onvolledig adres' als commentaar. De Duitse postertijen vormden hierop de enige gunstige uitzondering! Veel uitgevers bleken van adres of naam te zijn veranderd, de rechten waren dikwijls een andere uitgever doorverkocht of, soms, aan de (onvindbare) schrijver teruggegeven. Nader spuurwerk was vereist, en voerde, wat een Nederlandse uitgave betrof pas na vele telefoontjes en brieven tot een gunstig resultaat. Vaak liep het spoor echter dood. Op verschillende aangetekend verzonden brieven die ik niet met adres onbekend retour kreeg is inmiddels (medio april 1997) nog steeds geen antwoord ontvangen. Om het resultaat van al dit werk te verantwoorden heb ik het in de bovenstaande lijst een kleurcode gebruikt. Het bonte karakter ervan duidt al op de problemen die dit werk geeft. Er zou een centrale registratie van actuele adressen -per land- moeten bestaan voor zowel uitgevers en schrijvers, op straffe van het verlies van copyright.

Lisse, 19 april 1997

Gebruikte kleurcode:

Onvindbaar

Toestemming ontvangen

Publicatie ouder dan 50 jaar

Eigen tekening

Het meten van tijd

"The slow flowing of time from far beyond his conception to far beyond his power to follow" (Ellis Peters, 1977)¹

tijd duur meten Hoe ontstond het begrip tijd? Hoe kwam men ertoe de tijd als *meetbaar* te zien, haar een dimensie, de *tijdsduur* (te vergelijken met een begrip als 'lengte') toe te kennen?² En hoe ontwikkelde het *meten van* de tijd (de tijdsduur) zich?

oorsprong in de prehistorie Het is niet mogelijk om de eerste twee vragen in detail te beantwoorden. Het begrip tijd moet evenals het begrip voor de mogelijkheid tijd te kunnen *meten in* prehistorische tijden zijn ontstaan, lang voordat het schrift uit werd gevonden.

tellen Evenmin weten wij wanneer en hoe het vermogen te kunnen tellen -een basisvoorwaarde voor het hanteren van de begrippen **tijd** en **duur**- is ontstaan.

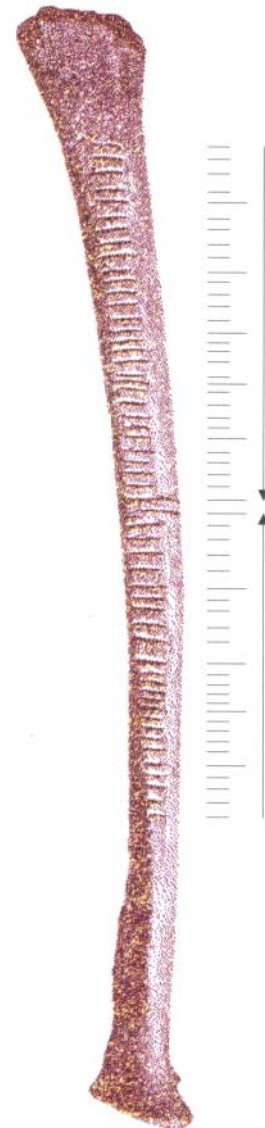
meten is tellend vergelijken Meten is al tellend vergelijken en vereist het afpassen -door gelijktijdig te tellen- van twee gelijksoortige zaken op elkaar (denk bijvoorbeeld aan het meten van een lengte).

Het denken over het ontstaan van deze begrippen kan niet anders dan speculatief zijn, maar gewoontes bij oude of "primitieve" volken kunnen ons hierbij op weg helpen, evenals het denken over de ontwikkeling van deze begrippen bij ons zelf gedurende onze eigen ontwikkeling.

vroegste tijds-markering: gebeurtenissen In het begin zal men 'tijd' uitsluitend aan de hand van gebeurtenissen hebben gemarkeerd. Wij vinden dit terug in de oude gewoonte kalenders te laten beginnen bij de start van elke nieuwe regering of bij de geboorte van een nieuwe godsdienst. Maar ook wij relateren gemakkelijker aan gebeurtenissen dan aan tijdstippen:

Wanneer je aan iemand vraagt wat er met hem of haar gebeurde toen hij of zij werd geopereerd (of door het ijs zakte, of voor het eerst naar school of naar de universiteit ging) krijg je direct een antwoord. Mocht je toevallig de datum van die gebeurtenis weten, dan zal je meestal niet zo snel een antwoord krijgen wanneer je die datum, dat tijdstip noemt en zonder het voorval zelf te vermelden vraagt wat er toen gebeurde.

eerst komt het tellen 30.000 jaar terug **Tellen** Voorwaarde voor elke meting is het kunnen tellen. De oudste gegevens die wij hierover hebben zijn de 'telstrepen' op benen voorwerpen uit prehistorische tijden (vanaf 30.000 jaar geleden)³ (Figuur 1)⁴. Vermoedelijk gebruikte men die om bepaalde tijdsintervallen, zoals dagen of maanden, in de gaten te houden. Of om het aantal dagreizen naar een bepaald jachtterrein vast te leggen.



Figuur 1.
Spaakbeen van een wolf
met telstrepen:
30 omlaag en 25 omhoog.

¹ Peters, p. 157.

² Leach, p. 110.

³ Hartmann p. 7.

⁴ Kleur-modificatie van. Fig 708 op p. 441 van Jelinek. Het afgebeelde bot is tussen de 17000 en 12000 jaar oud.

De landbouwrevolutie: het geschreven woord, geschreven cijfers en getallen

landbouw
12.000 jaar
geleden

Rond 12.000 jaar geleden vond de landbouwrevolutie plaats. Er ontstonden grotere gemeenschappen waardoor verbeterde communicatiemethoden noodzakelijk werden. In deze context ontwikkelde zich het schrift.

het schrift
6500 jaar

De ontwikkeling van het schrift begon met het tekenen van pictogrammen, ongeveer 6500 jaar geleden, door de Sumeriërs in Mesopotamië⁵. Daaruit ontwikkelde zich het spijkerschrift. Zo'n 4000 jaar geleden hadden zij een -geschreven- 60-talig rekensysteem ontwikkeld. Vermoedelijk vormden zij de inspiratiebron⁶ voor de ontwikkelingen in Egypte (5000 jaar geleden, het hiërogliefenschrift en een 10-talig stelsel)⁷ en meer dan 4500 jaar geleden in China (het archaische of schildpadschrift⁸: pictogrammen, waaruit de Chinese karakters zich vervolgens ontwikkelden)⁹. Het Chinese rekensysteem was eveneens 10-talig.

China,
3400 jaar
geleden:
decimaal
notatie-
systeem

Volgens Needham komen in het Chinees de (geschreven) symbolen die getallen aanduiden als schildpadkarakters voor vanaf circa 3400 jaar geleden¹⁰ (Tabel I). De symbolen voor de getallen 1 tot en met 4 zijn streep-pictogrammen: — = ≡ ≡ evenals de rechtopstaande strepen | voor de overeenkomstige tientallen.

Voor grotere getallen ging men over op pictogrammen geleend van de symbolen voor bepaalde planten en dieren. Waarschijnlijk zijn die symbolen op basis van de uitspraak gebruikt (homoniemen): een **paddestoel** 𠄎 voor het getal 6, een **denneappel** 𠄎 voor 100, een **mens** 人 voor 1000 en (2600 jaar terug) een **schorpioen** 𠄎 voor 10.000¹¹.

Kennelijk zijn (de symbolen voor) grotere getallen later ontstaan.

Het Chinese systeem was bovendien *vanaf de oorsprong* ook wat de *notatiepositie* betreft *decimaal* van aard en liep daarmee 2000 jaar op de andere culturen voor¹².

schildpad-
schrift

— 1	= 2	≡ 3	≡ 4	𠄎 5	𠄎 6	+ 7)(8	𠄎 9
 10	∪ 20	∪∪ 30	∪∪∪ 40	𠄎𠄎 50	𠄎𠄎𠄎 60	𠄎𠄎𠄎𠄎 70	𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎 80	𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎 90
𠄎 100	𠄎𠄎 200	𠄎𠄎𠄎 300	𠄎𠄎𠄎𠄎 400	𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎 500	𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎 600	𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎 700	𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎 800	𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎𠄎 900
人 1000	人 2000	人 3000	人 4000	人 5000	人 6000	人 7000	人 8000	人 9000
𠄎 10000	Voorbeeld: 𠄎 𠄎 𠄎 = 656							

5 Diringger, p. 35 en Kline, p. 5.

6 Hawkes & Woolley, Hfdst. 6, p. 645.

7 Diringger, p. 47 en Kline, p. 16.

8 Zo genoemd omdat het oudste schrift op orakelbotten, en orakelschilden. (van schildpadden) werd gevonden.

9 Diringger, p. 50.

10 Needham III, pp. 5-7, 15.

11 Uit Needham's gegevens is niet duidelijk op te maken of de hier gegeven vereenvoudigde schrijfwijze voor dit karakter inderdaad al zo vroeg hiervoor werd gebruikt.

12 Needham III, pp. 5 en 89. Lees pp. 7-17 en 82-90 voor meer details.

Tellen en meten: de menselijke maat

de mens als maatstaf Oude lengtematen zijn bijvoorbeeld de voet of de el (elleboog)¹³, de duim ("duimstok"), de inch (Engelse duim). Wanneer je niets bij de hand hebt gebruik je voor kleinere maten de afstand tussen de toppen van de pink en de duim om een lengte schattenderwijs af te passen, of bij grotere afstanden door het aantal stappen met gestrekte benen te tellen. Wij zijn -en dit spreekt eigenlijk vanzelf- geneigd alle zaken aan "ons zelf af te meten". Het uitgangspunt voor elke meting berust op een "menselijke maat"¹⁴.

subjectieve beleving en objectieve maat Dit betekent wel dat wij ons er steeds van bewust moeten zijn (of worden), dat er grote verschillen bestaan tussen enerzijds de subjectieve beleving van een lengte, duur of afstand, en anderzijds het objectieve -van onze beleving losgekoppelde- resultaat van de meting ervan. Een jong kind (dat bv. 75 cm lang is) vindt een volwassene (een man van stel 1,80 meter) héél groot. Voor het kind is dat een reus. Als het later zelf volwassen is geworden, zal het die lengte heel anders ervaren.

Wij kunnen ons dit misschien indenken wanneer wij ons voorstellen iemand te ontmoeten die evenveel groter en dus 4,5 m lang is! Komen de verhalen over reuzen, oorspronkelijk uit onze jong-kind-zijn fase?

Een afstand van 10 meter over de weg ervaren wij als niet erg ver. Maar staande op de rand van een 10 meter hoge toren vormt diezelfde afstand een verschrikkelijke diepte. Horizontale afstanden schatten wij anders in dan verticale, ook al zijn die objectief gemeten geheel aan elkaar gelijk. Een uur wachten duurt lang, maar een spannende film van 2 uur is voorbij voor je het weet. Bij het ouder worden lijkt de tijd sneller voorbij te gaan.

Gepensioneerde mensen wordt vaak gevraagd of zij zich wel kunnen amuseren. Hun antwoord is vaak dat zij zoveel om handen hebben dat de dag voor hen best langer dan 24 uur zou mogen zijn.

psychische en fysische getallen Wanneer er getallen worden genoemd -meestal binnen de context van een bepaalde maat (dimensie)- treedt hetzelfde verschijnsel op. Wij moeten er ons dan niet alleen van bewust zijn dat een genoemd getal een van de objectieve grootte verschillende subjectieve beleving kan hebben (zie boven), maar ook dat het getal wel eens primair gebruikt kan zijn om een bepaalde gedachte uit te drukken. Die gedachte kan volslagen verschillen van de schijnbaar objectieve grootte van dat getal.

De Chinezen wensten hun keizer op zijn verjaardag "wan wan sui" toe, "10.000 (maal) 10.000 jaar", d.w.z. "een lang leven".

"En zo waren alle dagen van Methusalach negen honderd negen en zestig jaren, en hij stierf"¹⁵.

Met name in onze Westerse, sterk voor de absolute grootte van getallen gevoelige, samenleving kan het niet onderkennen van het verschil tussen 'psychische' en 'fysische' getallen grote problemen veroorzaken.

Door de bijbelse verhalen fysisch te interpreteren berekende Aartsbisschop James Ussher (1580-1656) dat de schepping in het jaar – 4004 (= 4004 v.C.) had plaatsgevonden¹⁶. Toen later uit geologisch onderzoek duidelijk werd dat het fysische tijdsverloop heel veel groter was ontstonden er problemen die ook vandaag nog actueel zijn (zie blz. 6: *evolutietheorie en scheppingsverhaal*).

13 De Vries, en De Tollenaere.

14 Het gaat hier om het constateren van het feit dat de mens zichzelf als referentiekader gebruikt. Het is niet de bedoeling een lans voor het antropomorfisme (de leer die het menselijke tot maat van alle dingen maakt) te breken.

15 *Bijbel*, Genesis 5:27. Voor Methusalach staat ook vaak Methusalem.

16 Medawar & Medawar, zie onder 'creationism' op p. 63.

**het grootste
voorstelbare
getal**

Bij jonge kinderen kunnen wij aan de ontwikkeling van het tellen duidelijk zien dat er een grens aan het voorstellingsvermogen is:

"Vraag aan een klein kind: "Kun je al tellen?"

"Ja."

"Laat eens zien?"

(Het telt op de vingers:) "een twee drie véél!"

Deze grens schuift geleidelijk op naar grotere getallen. Het grootste goed in te denken getal dat het kind zal kunnen leren zal van het kennisvermogen van de directe omgeving van het kind afhangen evenals van de cultuur waarin het leeft.

**maan-
kalender**

Vandaar dat wij in alle vroege culturen kalenders vinden die op de maan zijn gebaseerd, terwijl kalenders die op het jaar stelen pas veel later tot ontwikkeling kwamen¹⁷. Het was eenvoudiger het aantal (volle of nieuwe) manen te tellen, dan het aantal dagen. Voor het laatste had men veel grotere getallen nodig.

Kan iemand die maar tot 5 kan tellen vertellen hoe oud hij of zij is?
Of hoe laat het is?

**heel arm
of
schatrijk**

Het zal niet eenvoudig zijn te weten te komen wat het grootste getal is dat men zich voor kan stellen. Dat zal vermoedelijk zowel van de 'dimensie' afhangen

1000 gulden is voor ons meer invoelbaar dan 1000 jaar

als van de persoonlijke omstandigheden (context):

Voor iemand uit de derde wereld die 100 gulden per jaar verdient, vormt een miljoen gulden een onvoorstelbaar groot bedrag.

Voor een miljardair, of voor een minister van financiën, is een miljoen slechts het 1/1000ste deel van een miljard.

context

De context, dat wil zeggen de gehele situatie waarin een gebeuren zich afspeelt, is voor de interpretatie dus van essentieel belang. Het volgende voorbeeld maakt dit duidelijk.

DEMONSTRATIE
Welke tijd geeft deze klok aan?



Zeg eerst tegen uzelf welke tijd op deze klok staat aangegeven voor u verder leest.

Van deze klok is de wijzerplaat rechtsom gedraaid
en wel over een hoek van 5 (klok)minuten.

De as van de klok staat dus niet verticaal, maar onder een kleine hoek.
Draai uw hoofd wat naar rechts en trek een denkbeeldige lijn door de twee dikkere
uurblokjes die respectievelijk de 12 en de 6 aanduiden.

De klok geeft nu aan dat het acht uur is, terwijl u dacht (en denkt) dat er vijf over negen staat..

De context, d.w.z. de situatie waarin deze klok en u verkeren,
maakt dat u de aangewezen tijd anders interpreteert.

Op de tentoonstelling zal een echte klok staan die dit type wijzerplaat heeft.

Die klok geeft voortdurend de werkelijke tijd aan,
maar wekt een interpretatiefout op doordat de wijzerplaat is gedraaid.

17 Leach, p. 117-120.

Tijd in de oertijd: lichamelijke inspanning

inspanning Bij het vaststellen van afstanden en oppervlakten speelde -en speelt- de *inspanning* (dus de *kosten*) een grote rol. Hier komt de tijd al om de hoek kijken. De hoeveelheid grond die per dag door een span koeien kon worden beploegd bepaalde de "acre" ("akker") als oppervlaktemaat in de landbouw. Die per-halve-dag voerde tot de nu ouderwetse "morgen" als maat voor het oppervlak van een akker. Voor zwaar te beploegen vette gronden was de "acre" (of de "morgen") kleiner dan voor lichtere gronden (maar de opbrengsten waren ongeveer gelijk).

**tijdsduur:
rusten na
10 li** In China werd de lengtemaat voor afstand bepaald door de duur: de tijd die een sjouwer gemiddeld af kon leggen alvorens te moeten rusten. Op die afstanden (ongeveer 3,5 km in ongeveer 1 uur sjouwen over vlak terrein) werden rustplaatsen voor hen ingericht. Als eenheid voor afstand werd 1/10e hiervan genomen, de li. Op vlak terrein was de li objectief gemeten dus groter (langer) dan in de bergen.

**tijd bepaalt
afstand** Uit deze voorbeelden zien wij dat de tijdsduur werd bepaald ("gemeten") op basis van het optreden van vermoeidheid op een gelijkmatig blijvende en daardoor durende inspanning. De duur voerde tot een maat voor afstand. Tijds-duren vormen ook voor ons nog steeds een maat voor afstanden:

"Hoever is het postkantoor hier vandaan?"

"10 minuten op de fiets. Of bent U met de auto? Dan is het twee minuten."

Voor iemand die heel moeilijk loopt zal het begrip "kilometer" een volslagen andere inhoud hebben, dan voor een valide volwassene.

**dus wordt de
wereld steeds
kleiner** Door de toegenomen snelheid van het vervoer in de laatste eeuwen (lopen - paardrijden - varen - fietsen - trein en auto rijden - vliegen) is de *afstand die wij per dag* af kunnen leggen steeds groter geworden. Die afstand-per-dag, een *subjectieve maat*, is voor ons gevoel bepalend en wij ervaren daardoor dat "de wereld steeds kleiner is geworden". De ontwikkelingen in de telecommunicatie hebben deze indruk nog versterkt. De fractie van een seconde die ons *telefonisch* van onze tegenvoeters (in Australië) scheidt is zo klein, dat wij in deze gesprekken een gevoel van onmiddellijke nabijheid van de gesprekspartners ervaren.

**de tijd als
afstand
met
herhaling
als maatstaf** De tijd moet in vroeger tijden dan ook zijn ervaren als een soort van afgelegde afstand, afgemeten aan zich herhalende en daardoor telbare verschijnselen zoals de dagen, de manen (maanmaanden) en de seizoenen.
100 jaar geleden lag Australië een jaarreis per zeilschip van ons vandaan.
100 jaar terug lag Leiden een dagreis verwijderd van Amsterdam.
Een zwangerschap duurde 9 manen.

Omdat de lichtsnelheid onder alle denkbare omstandigheden constant is (300.000 km per seconde), kunnen lengte-eenheden nu in tijdseenheden worden uitgedrukt. In de fysica, met name in de astronomie, is dit een heel gebruikelijke manier om lengten weer te geven.

De afstanden tussen sterren of sterrenstelsels zijn zo groot, dat deze worden uitgedrukt in lichtjaren.

Een lichtjaar is de afstand, die het licht in een jaar aflegt.

Een licht-microseconde¹⁸ is de afstand die door het licht in een microseconde wordt overbrugd: 300 meter.

1 cm is $0,33 \cdot 10^{-9}$ licht-seconde lang.

¹⁸ In deze uitdrukkingen wordt het woord 'licht' meestal weggelaten (behalve in 'lichtjaar').

Interpretaties van het tijdsbegrip

- herhaling** De herhaling van gebeurtenissen in de natuur heeft echter (samen met de ontwikkeling van het tijdsbegrip in de loop der eeuwen en in verschillende culturen) ook tot verschillende interpretaties¹⁹ van het begrip tijd aanleiding gegeven.
- alles keert weer** De oudste interpretatie is mogelijk die waarin men aanneemt dat ook de tijd zelf zich weer herhaalt. Alles keert weer, alles herhaalt zich, alles reïncarneert. Een chronologie is binnen deze opvatting niet mogelijk. Dit wordt wel de "primitieve opvatting van de tijd" genoemd.
- beïnvloedbaar** De bij dit denken aansluitende "magische tijdsopvatting" beschouwt de tijd niet alleen als ons beïnvloedend maar ook als door ons beïnvloedbaar, een gebied waarin het natuurlijke en het bovennatuurlijke samenkomen. Dit is niet verbazingwekkend als wij ons realiseren dat men er in vroegere tijden heel niet zeker van was of de zon wel weer op zou komen en of er wel weer een zomer op de winter zou volgen en omgekeerd. De gedachte aan een eeuwige nacht of dag, aan toenemende winterkoude of zomerhitte was angstaanjagend. Offers en rituelen waren in deze gedachtegang nodig om de zon te bezweren weer op te komen, of om weer te gaan stijgen vanaf het laagste punt in de winter, op 22 december (midwinterrituelen, waar het Kerstfeest aan is gekoppeld), respectievelijk te gaan dalen vanaf het hoogste punt in de zomer (op 22 juni). Onze verwelcoming van het nieuwe jaar op oudejaarsnacht past ook in deze opvatting.
- midwinter-ritueel**
- duur speelt geen rol** De "historische tijdsopvatting" ordent alle gebeurtenissen in een reeks waarin de tijdsduur van de gebeurtenissen geen rol speelt. Het accent ligt op de gebeurtenissen zelf. Het bijbelse verhaal van de schepping in zes "dagen" vormt een mooi voorbeeld hiervan. Hierbij gaat het om het gebeuren en niet om de duur ervan. Het aftellen van dagen vormde voor de schrijver de beste manier om het scheppingsgebeuren te beschrijven.
- vast beginpunt** In de "politieke tijdsopvatting" wordt alle gebeuren gerelateerd aan een politiek verschijnsel: de stichting van een godsdienst of staat, of aan het begin van een nieuwe dynastie. De westerse (oorspronkelijk christelijke) tijdrekening en de islamitische vormen voorbeelden van deze vorm van tijdrekening, waarin alles wordt gerelateerd aan een bepaalde begingebuurtenis terwijl haast alles wat ervoor plaats vond "buiten de belangstelling" valt.
- Alhoewel het beginpunt van onze tijdrekening arbitrair is en zelfs op een foutieve interpretatie berust²⁰ zal onze generatie de komende jaren in toenemende mate met de magische tijdsopvatting rond het jaar met het getal 2000 worden geconfronteerd*.
- uitsluitend de tijdsduur** In de "wetenschappelijke opvatting van de tijd" wordt uitsluitend de tijdsduur beschouwd, zonder te refereren aan historische, politiek-religieuze en magische momenten.
- evolutietheorie en scheppingsverhaal** Het recente (1988) verbod in Nederland, de evolutietheorie -die in de wetenschappelijke tijdsopvatting wortelt- op de middelbare scholen officieel te examineren vormt een fraai voorbeeld van het onvermogen van sommige beleidsmakers verschillen in tijdsopvatting te onderkennen. De fundamentalisten onder ons zijn evenmin tot dit onderscheid in staat. De historische tijdsopvatting (waarin duur geen rol speelt) die uit het scheppingsverhaal spreekt en de wetenschappelijk benadering van de tijd (waarin het uitsluitend om de duur gaat) die in de evolutietheorie aan de orde is vormen twee verschillende benaderingen die over elkaar geen uitspraken doen, over elkaar niets zeggen en dus ook niet met elkaar in conflict kunnen komen. Dit verschil ontgaat hen kennelijk. Voor hen zijn deze tijdsopvattingen aan elkaar gelijk en daardoor strijdig. Helaas werd deze simpele manier van denken aan de hele Nederlandse bevolking opgelegd.
- Noot:
Op 17 oktober 1995 bevatte BIONieuws een brief van mevr. T. Netelenbos, Staatssecretaris van Onderwijs Cultuur & Wetenschappen, dat zij deze situatie heeft gecorrigeerd. Blijkens een begeleidend artikel van Prof. Dr. E.W. Roubos, zal de theorie in 1998 weer officieel in de schriftelijke examens worden opgenomen*.

¹⁹ Leach, p. 114.

²⁰ Zie blz. 15.

* Dit werd in 1996/97 opgeschreven

Het eerste gebruik van tijd

Al voordat er van landbouw sprake was moet de makkelijk en goed waarneembare cyclus van de maan voor de kleine, de jacht bedrijvende, rondzwervende gemeenschappen in (sub)tropische gebieden een perfecte klok zijn geweest. Aan de hand van het aantal *manen* en van de vorm ervan moet men duidelijke afspraken hebben kunnen maken elkaar te ontmoeten. De noodzaak tot het formeren van *het jaar* zal zich toen nog niet kenbaar hebben gemaakt.

Bij de gemeenschappen die ook naderhand niet aan landbouw waren gebonden en in de tropische woestijnen rond bleven zwerven (Bedoeïenen) zal de maan waarschijnlijk de enige klok zijn gebleven. In de kalenders van de huidige woestijnvolken (de Arabieren en de Israëli) is dit terug te vinden.

*het is nu
tijd
voor*

Onze verre voorouders deden met zich herhalende natuurlijke gebeurtenissen veel ervaring op, zoals het seizoengebonden verschijnen van bepaalde vogels, bloeien van bloemen en vallen van bladeren. Bij dichter bij de natuur levende volken kunnen wij dit (nog hoe lang?) terug vinden. Oorspronkelijk gebruikte men uitsluitend bepaalde *indicaties* voor de start van veelal agrarische activiteiten. Het aftellen van de tijd -de duur- speelde daar nog geen rol in:

"Als de roep van de kraanvogel wordt gehoord is het tijd om te gaan ploegen en zaaien"²¹.

*over enige
tijd
zal*

Binnen onze eigen cultuur is hier niets meer van over. Wel zijn er gezegden die op een vroege fase in de ontwikkeling van het tijdsbegrip wijzen, gezien het voorspellende karakter ervan:

"Een enkele leeuwerik maakt nog geen voorjaar"²².

*het weer
voorspellen*

Vanzelfsprekend hebben veel gezegden met het weer te maken:

"Houden de bomen hun blaren lang, wees voor een lange winter bang".

"Als de kikvorsen kwaken zal mooi weer genaken".

Gezien de urbane levenswijze van het grootste deel van de bevolking en de hoge kwaliteit van de huidige weervoorspellingen zijn ook deze gezegden waarschijnlijk alleen nog maar van historisch belang.

Tijd meten aan de zon en de sterren

Naast observaties aan planten, dieren en aan het klimaat en de maan, speelden *astronomische waarnemingen* aan de zon en de sterren een grote rol²³.

*de sterren
zijn nu
verduisterd
door licht*

In onze cultuur zijn de sterren nauwelijks meer waar te nemen omdat steden, bedrijven en wegen gigantische hoeveelheden licht in de nachtelijke hemel uitstralen. Hierdoor zijn de formaties van de sterren niet meer duidelijk te zien en spreken die niet meer vanzelf. In de vele eeuwen zonder elektrische verlichting was dat wel degelijk het geval. *Tijdsbepaling aan de hand van het gedrag van de maan, de zon en van de sterrenhemel vormde de basis van de tijdrekening en -meting.*

De oudste klok: **de maan**

*landbouw-
revolutie:
12.000 jaar
geleden*

Zodra men landbouw ging bedrijven (zo'n 12.000 jaar geleden) moet het verwerven van voorkennis over de komende seizoenen belangrijk zijn geweest. Wanneer breekt de droge tijd aan en wanneer de natte? Of, op hogere breedtes: wanneer wordt het winter en wanneer zomer? Het weer is zelf overal te variabel om als baken te gebruiken (met één uitzondering: de Nijl). Het seizoen zoals dat uit de stand van de maan, de zon en de sterren is af te leiden, bleek een meer betrouwbare gids te zijn.

De maan vormde in alle vroege gemeenschappen een belangrijke bron van informatie. Maanmaanden en daaruit samengestelde maanjaren behoren tot de vroegst bekende

21 Herodotus, cf. Leach, p.116.

22 ter Laan..

23 Leach, p. 116-119.

maanjaar:
12 manen =
354 dagen
≥7000 jaar
geleden

kalenders²⁴. Vermoedelijk omdat het eenvoudiger was om manen te tellen dan dagen (waarvoor men grotere getallen nodig had)²⁵. Omdat een maanmaand gemiddeld ongeveer 29,5 dag telt en de herhaling van de seizoenen om de 12 maanden plaats vindt, zal het *oorspronkelijke jaar* -dat men in die tijd vermoedelijk niet als zodanig zal hebben benoemd- 354 dagen lang zijn geweest.

Maar de toenmalige landbebouwers moeten toen snel hebben ervaren dat de maan toch geen betrouwbare gids voor de seizoenen vormde.

zon, maan en
aarde lopen uit
de pas

De dagelijkse omwenteling van de aarde rond haar as vertoont geen samenhang met de periode van de maan, noch met het jaar. Evenzo vertoont de wenteling van de maan rond de aarde geen samenhang met die van de aarde rond de zon (het jaar). Het kan meerdere tot vele jaren duren (afhankelijk van de verschijnselen die men bekijkt) voor er van een samenvallen (van hele veelvoud van perioden) sprake is.

een 'jaar' van
12 maan-
maanden =
354 dagen
7000 of meer
jaren geleden

Zowel de Egyptenaren als de Mesopotamiërs (en alle andere agrarisch levende volken) moeten dus al heel lang geleden de maan hebben gebruikt om zich ook over de seizoenen te oriënteren en zij hadden oorspronkelijk (voor of in -5000) een pure maankalender²⁶ (met maanden van afwisselend 29 en 30 dagen).

intercalatie

Met zo'n kalender kwam men echter 11 dagen per jaar tekort. Om met de seizoenen in de pas te blijven lopen moest er nu en dan een extra maand worden ingevoegd ('intercalatie'). Voor agrarisch gebruik bleven telkens bijgestelde maankalenders en de bijbehorende rituelen heel lang bestaan (tot in de huidige tijd toe), dikwijls geheel onafhankelijk van de voor het civiele gebruik belangrijke jaarkalender²⁷.

Ons Paasfeest, dat sinds het Concilie van Nicea (+ 325) op de eerste zondag na de eerste volle maan na de lente-evening valt vormt hiervan een fraai voorbeeld.

een jaar van
360 dagen?

Vermoedelijk formaliseerde men in Egypte de kalender vervolgens voor civiel gebruik door maanden van 30 dagen te gebruiken. Hierdoor werd het jaarlijkse tekort tot op 5 dagen gereduceerd.

Egypte
5000 jaar
geleden:
365 dagen
in het jaar

Maar het zijn de redelijk regelmatige overstromingen van de Nijl, een klimatologisch verschijnsel, die de Egyptenaren mogelijk al 5000 jaar geleden tot de eerste vaststelling van de lengte van het jaar voerden: 365 dagen²⁸. Zij deden dit door jaarlijks 5 schrikkeldagen aan het maanjaar toe te voegen²⁹.

Omdat dit jaar echter korter is dan het werkelijke jaar, begon hun religieuze kalender met de seizoenen uit de pas te lopen. Deze kalender werd niet door intercalaties gecorrigeerd. De Egyptische priesters hielden het formele jaar van $12 \cdot 30 + 5 = 365$ dagen aan en dit werd het 'tempeljaar' genoemd. De boeren bleven zich echter op de overstromingen van de Nijl baseren (het 'Nijljaar')³⁰.

Hierdoor ontstond een situatie die vergelijkbaar is met die in Israël (zie blz. 15) of met die bij ons met betrekking tot het Paasfeest.

Aangezien de Egyptische priesters het tempeljaar aanhielden (met een tekort van ca 6 uur per jaar), liep dit jaar met een cyclus van 1456 jaar door het werkelijke jaar heen. Het is deze cyclus op basis waarvan men (op basis van het samenvallen van deze kalenders in + 139)³¹ kan gissen wanneer de Egyptenaren het tempeljaar invoerden: vermoedelijk rond ca -2780, dus bijna 5000 jaar geleden³².

24 Leach, pp. 116-120.

25 Leach, p. 120.

26 Neugebauer, pp. 793-794; Jones, p. 561; Hawkes and Woolley, p. 681. De verschillende auteurs geven, verschillende beschrijvingen van de ontwikkelingen in Egypte. Het hier gegeven verhaal heeft dus een stevige korrel zout nodig.

27 Hawkes en Woolley, Hfdst. VII, pp. 682-684.

28 Hawkes en Woolley, pp. 680-684.

29 Neugebauer, p.795; Hawkes and Woolley, p. 681.

30 Neugebauer, pp.794-795; Hawkes and Woolley, pp. 680-681.

31 Hawkes en Woolley, pp. 682.

32 De ingewikkelde toestand. in Egypte staat o.a. beschreven in Jones, pp. 560-566.

De schaduw van de zon als baken voor de voorspelling van de seizoenen

de schaduw van de zon

De kennis van de invloed van het seizoen op de minimale lengte van de schaduw die de zon in haar hoogste stand werpt is heel oud (zeker meer dan 7000 jaar) en is bij alle volken terug te vinden. Niet alleen het altijd al voor iedereen duidelijke variëren van de schaduwlengte gedurende de dag, maar met name *de variatie van de lengte van de minimale zonnenschaduw* (wanneer de zon overdag op haar hoogste punt staat) *gedurende de seizoenen*, evenals de bijbehorende variatie in de plaatsen waar de zon opkomt en ondergaat.

de aarde staat scheef

De *verklaring* van de variatie van de minimale schaduwlengte met de seizoenen werd pas veel later geopperd, vermoedelijk ongeveer 2500 jaar geleden³³. Nu weten wij dat dit komt doordat de as van de aarde niet loodrecht op het vlak van de baan waarin de aarde om de zon draait (de 'ecliptica') staat en dat dat ook de oorzaak voor het optreden van de seizoenen is.

Stonehenge 4600 jaar

Maar het *verschijnsel* van de variatie van de minimale zonnenschaduw, dus van de maximale hoogte van de zon boven de horizon, de *zonnewendes* in de winter (22 december) en de zomer (22 juni), en de relatie daarvan tot de seizoenen, is al heel erg lang bekend.

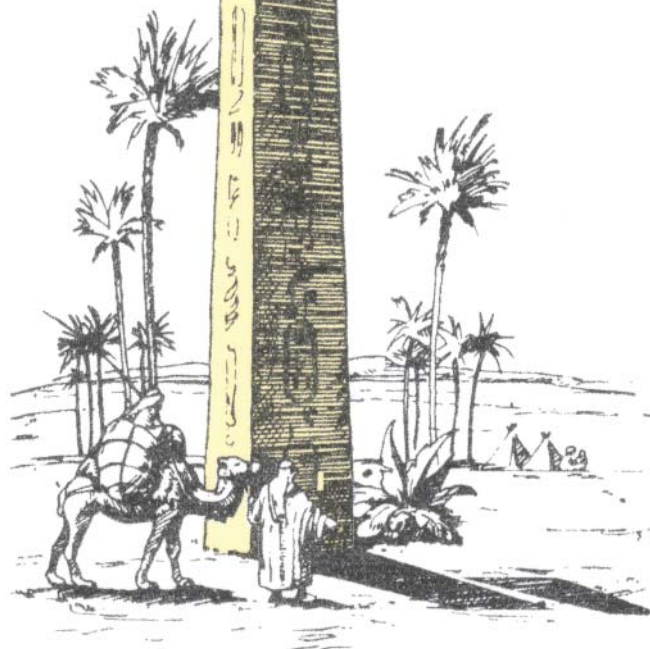
gnomon

Een verticaal in de grond geplaatste stok of steen³⁴, de gnomon (de rechtop staande zonnewijzer), vormt het oudste astronomische instrument om de tijd te meten.

Welk seizoen is het?

Gedurende de dag kan men de tijd meten als functie van de lengte van de schaduw. Deze schaduw is het kortst tijdens de middag (het midden van de dag). Deze kortste-dag-schaduw varieert gedurende het jaar en kon daardoor worden gebruikt om seizoenen te bepalen en te voorspellen.

Egypte meer dan 3500 jaar terug



Het oudste ons historisch bekende gebruik van de gnomon dateert eveneens uit Egypte, *minstens 3500* jaar geleden (Figuur 2)³⁵.

De hoge slanke obelissen fungeerden in het oude Egypte als zonnewijzers³⁶. De oudste slanke obelisk is 3950 jaar oud. De grovere vormen (die uit het Oude Rijk dateren)³⁷ zijn veel ouder.

Figuur 2.
Obelisk in gebruik als zonnewijzer³⁵

33 Vermoedelijk in de 5e eeuw v. C. Zie Neugebauer, p. 802 en. 798-799.

34 Menhirs (de lange, geïsoleerde, rechtop staande stenen die men met name in Bretagne veel ziet) zouden best als gnomon dienst kunnen hebben gedaan.

35 Koch, figuur op p. 267.

36 Sawelski, p. 31.

37 Winkler Prins, deel 14, p. 371.

De eerste metingen van tijd: de duur van het jaar

In Figuur 3 staat een tekening³⁸ naar een 85 jaar oude³⁹ foto⁴⁰ waarop twee mensen in Kalimantan⁴¹ (Indonesië) het seizoen bepalen door met **gnomon (verticaal) en schaduwlat** (op de grond) met stokjes de lengte van de kortste zonnenschaduw te meten. Zij wilden weten wanneer het tijd was om de rijst te gaan planten.

sterren
en
sterren-
beelden

Men keek niet alleen naar de passage van de zon door de meridiaan⁴² maar 's nachts ook naar de passage van bepaalde sterren.

Verder werden de posities van de op- en de ondergang van zowel de zon als van bepaalde heldere sterren of typische sterrenbeelden (zoals het Zevengesternte) eveneens vastgesteld. Men kon deze uitersten met behulp van stenen markeren.

Het ongeveer 4600 jaar oude Stonehenge vormt een beroemd voorbeeld van zo'n observatorium⁴³.

Met behulp van de gnomon en van op- en ondergangen van de zon en van opvallende sterren of sterrenbeelden kon men al snel meer nauwkeurig de duur van het jaar bepalen⁴⁴.



Figuur 3.
Aflezen van de gnomon

werk voor
priesters

Aangezien dit werk specialistische kennis vereiste (o.a. het met grotere getallen kunnen werken), werd het geleidelijk aan speciale mensen opgedragen.

Deze mensen -wij zouden hen nu *astronomen* noemen- hielden ook toezicht op alle bijbehorende rituelen: zij werden de priesters of priester-magiers⁴⁵.

de oudste
gevonden
meetlat
3500 jaar

De gnomon kreeg vaak een standaard lengte, zodat men een standaard schaduwlat kon ontwikkelen waar men de karakteristieke schaduw lengten op aan kon geven. Het oudste gevonden complete exemplaar (gnomon -klein- plus meetlat) wordt toegeschreven aan de regering van Thothmoses III en is ongeveer 3500 jaar oud⁴⁶ (fig. 4).

38 Leach, Fig. 46, p.117.

39 De foto staat in Hose & McDougall, een publicatie uit 1912.

40 Needham III, Fig. 111, tegenover blz. 286.

41 Vroeger Borneo geheten.

42 De cirkel door Noordpool en zenit (het hoogste punt van de sterrenhemel).

44 Zie hiervoor o.a. Hartmann, pp. 16-17.

Om niet te zeer in detail op de astronomie in te gaan, zal hier uitsluitend over het zonnejaar ("tropische jaar") worden gesproken: de periode tussen opeenvolgende gelijke posities van de aarde (aardas) ten opzichte van de zon. Het sterrejaar, de periode tussen opeenvolgende gelijke posities ten opzichte van de sterrenhemel, blijft buiten beschouwing.

45 Leach, p. 121.

46 Leach, p. 112. (Engels: Thothmes III).



Figuur 4. Egyptische gnomon + meetlat van groene leisteen⁴⁷

De lengte van het zonnejaar

*de eerste
kalender
7000-6000
jaar geleden*

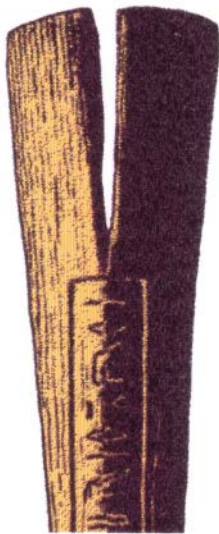
Tussen 7000 en 6000 jaar geleden ontdekte men in Egypte⁴⁸ dat de overstromingen van de rivier de Nijl steeds optraden nadat de ster Sirius (Sothis in het Oud-Egyptisch) weer aan de horizon verscheen. Men stelde daarop het nieuwe jaar in bij de eerstvolgende nieuwe maan na het verschijnen van Sirius⁴⁹. Ook de eventuele intercalatie van een schrikkelmaand was aan het verschijnen van Sirius gebonden⁵⁰.

*de maan
versus de
seizoenen*

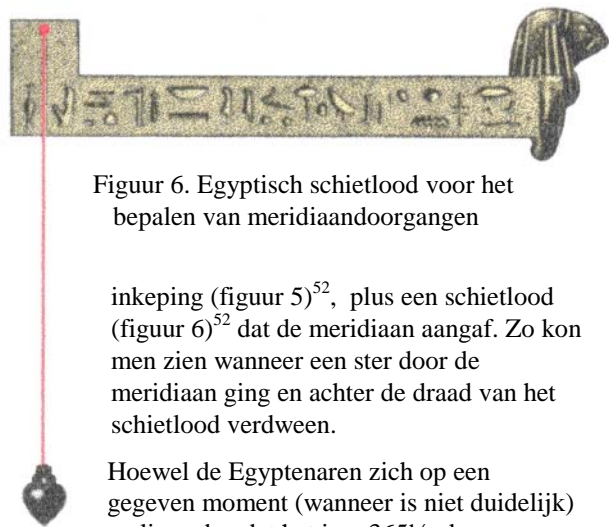
Het grote probleem was dat de omlooptijden van de maan niet op die van het jaar passen. Om het daardoor uit de pas lopen met de seizoenen te corrigeren werden allerlei intercalaties toegepast. Deze werden verfijnd door de resultaten van de registraties in de loop der eeuwen, aan de hand van de metingen die men met de gnomon en met behulp van doorgangen van sterren door de meridiaan (de grote cirkel door de noordpool en het zenit) verrichtte.

*meridiaan-
doorgang
5000 jaar
geleden*

Meridiaandoorgangen met men (in Egypte) vanaf ongeveer 5000 jaar geleden⁵¹. Men gebruikte hiervoor een stok (de steel van een palmblad) met een lange smalle



Figuur 5. Meetstok voor meridiaandoorgangen.
(Bovenste gedeelte)



Figuur 6. Egyptisch schietlood voor het bepalen van meridiaandoorgangen

inkeping (figuur 5)⁵², plus een schietlood (figuur 6)⁵² dat de meridiaan aangaf. Zo kon men zien wanneer een ster door de meridiaan ging en achter de draad van het schietlood verdween.

Hoewel de Egyptenaren zich op een gegeven moment (wanneer is niet duidelijk) realiseerden dat het jaar $365\frac{1}{4}$ dagen telde⁵³, had dit voor hen geen praktische gevolgen.

De vroegste vaststelling van deze lengte van het jaar lijkt die van de Chinezen te zijn in of voor -1165⁵⁴.

47 Leach, kleurmodificatie van Fig. 44 op p. 112.

48 Jones, p. 561.

49 idem

50 idem

51 Jones, p. 562.

52 Kl.eurmodificatie van Leach, Fig. 47 op p. 122. Slechts een deel van de figuur gebruikt. Ca. 600 v.C.

53 Hawkes en Woolley, p. 681

54 Hawkes en Woolley, p. 685.

**Reuzen-
gnomon**

Om de lengte van de schaduw van de zon te meten bouwden de Chinezen tenslotte reusachtige gnomontorens⁵⁵, zoals tijdens de Yuan dynastie (ca 750 jaar geleden). Zij bouwden in die tijd een brede toren van baksteen, die 28 voet (9 m) hoog was. Daarop stond een 40 voet (13 m) lange gnomon.

en

**camera
obscura**

De meer dan 120 voet (40 m) lange en eveneens van baksteen gebouwde schaduwmeten bevatte twee overlangse groeven waar water in stond. Deze fungeerde als waterpas. De zwakke schaduw van de zon werd met behulp van een camera obscura op de waterpas afgelezen! Met zulke methodes bereikten de Chinezen een hoge graad van nauwkeurigheid in de bepalingen van het gedrag van de zonnenschaduw.

De resultaten van de berekeningen van de lengte van het zonnejaar in de loop der eeuwen en in verschillende culturen zijn in Tabel II samengevat. De getallen zijn berekend op basis van gegevens die in de geciteerde literatuur staan vermeld. De tabel geeft in elk geval bij benadering een indruk van de historische ontwikkeling.

**hoe lang,
dacht men,**

**is een
jaar?**

nr *	jaren vóór 2000	duur (dagen)	1 dag fout per jaar	gebied, plaats of persoon
1	≥ 6000	≥354	≥0,09	landbouwgemeenschappen ⁵⁷
2	ca 5000	365	4,13	Egypte
3	ca 3200	365,25	128	China ⁵⁸
4	2542	(365,235879)	160	Cleostratus, Griekenland
5	2383	365,2468	217	Kidimur, Babylon
6	2130	365,24667	224	Hipparchus, Griekenland
7	1993	365,250162	126	Liu Hsin, China
8	1800	365,242305	9434	Han dynastie
9	1537	365,242815	1623	Tsu Chhung-Chih
10	1250	365,242270	14085	'Ihang dynastie
11	750	365,242240	24390	Yuan dynastie
	heden	365,242199		

* zie figuur 7.

**precisie!
al vanaf
3200 jaar
geleden**

Wanneer we de getallen in Tabel II bekijken, dan valt het op hoe goed zowel de Babylonische priester-magiërs (wij zouden nu zeggen: geleerden of wetenschappelijke onderzoekers), de Grieken en de Chinezen op basis van hun waarnemingen al *vanaf 3200 jaar geleden* de lengte van het zonnejaar redelijk goed konden bepalen.

Wij kunnen ons dit nu praktisch niet meer voorstellen. Probeer je eens in te denken wat dit voor de Babylonische geleerden alleen al aan de opslag van kleitabletten en de administratie ervan moet hebben betekend!

En dit alles gebeurde met behulp van bepalingen door middel van gnomon en schietlood! Kijkers met lenzen had men nog niet uitgevonden.

55 Needham III, pp. 294-300.

56 Fracties berekend aan de hand, van gegevens in Jones.

De Chinese gegevens zijn afkomstig van Needham III (Tabel 30, p. 294).

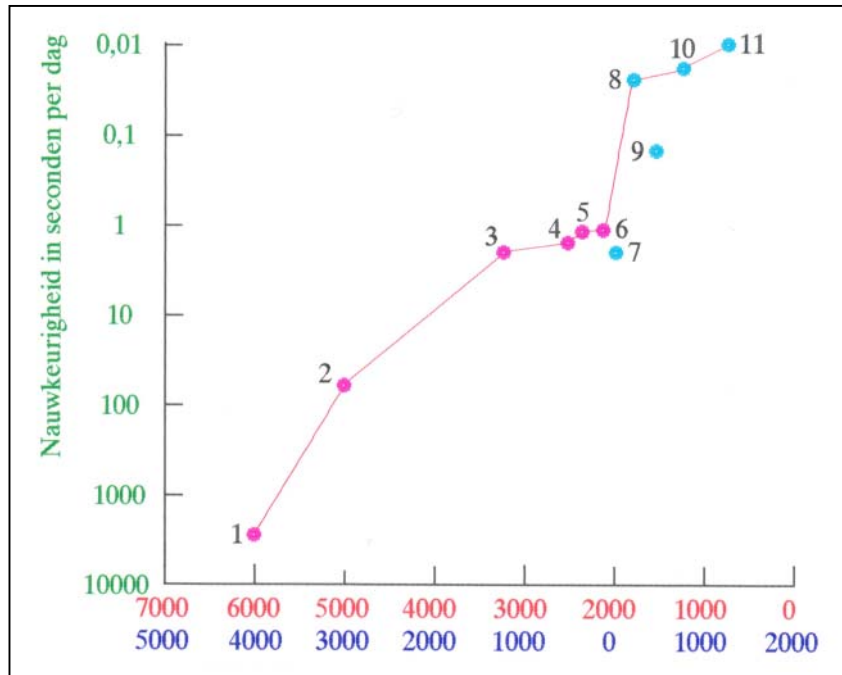
57 Maanjaar, afhankelijk van eventuele intercalaties.

58 Hawkes & Woolley, p. 685.

Gemeten lengte van het zonnejaar, grafisch afgebeeld

*het
zonnejaar
gedurende
6000 jaar*

In Figuur 7 staat de nauwkeurigheid waarmee men de duur van het zonnejaar in de loop van zo'n 55 eeuwen kon bepalen grafisch weergegeven. In **de vroege ontwikkeling** is een 'verzadiging' te zien. **De latere ontwikkeling in China** (met behulp van de 'camera obscura' techniek?) betekende een grote stap vooruit en vertoont dan eveneens een -nu snelle- verzadiging).



Figuur 7. Meetnauwkeurigheid voor de jaarlengte in de loop der eeuwen. Afwijking t.o.v. de huidige waarde voor de lengte van het zonnejaar, in seconden per dag. Tijdstippen: bovenste rij: jaren vóór +2000, onderste rij: huidige jaartelling. Voor nadere gegevens en voor de nummers: zie Tabel II.

De praktijk

*2400 jaar
geleden:
de maan
"komt in
opstand"*

De praktische invoering van een jaarkalender die niet door de seizoenen wandelde gaf voortdurend problemen⁵⁹. Kalenders die in feite op de perioden van de maan waren gebaseerd werden voortdurend door intercalaties bijgesteld⁶⁰. Deze intercalaties konden van plaats tot plaats wisselen, wat voor handel en verkeer bijzonder hinderlijk was.

Soms werden de kalenders ook politiek gemanipuleerd. 2400 jaar geleden voerde dit in Griekenland tot een schandaal. Aristophanes schreef daarop een toneelstuk, *'De Wolken'*, waarin hij het politieke manipuleren van de tijd hekelde en waarin de maan klaagt dat men de dagen niet correct volgens haar schema aanhoudt.

⁵⁹ Jones, p. 568.

⁶⁰ Voor de Islamitische kalender, die op vrijdag 17 juli 622 van onze tijdrekening begint, en een zuivere maankalender is, is intercalatie verboden. Dit wijst op de woestijn oorsprong ervan (zie blz. 7). Daar deze kalender 12 maanmaanden van afwisselend 29 en 30 dagen telt, vallen zowel het Islamitische nieuwjaar als de vasten, de Ramadan, in onze tijdrekening elk jaar vroeger (Ahlers, p. 230).

Definitieve invoering van de zonnecalender

*de Juliaanse
kalender
2000 jaar
oud*

Ca 2000 jaar geleden stelde Julius Caesar tenslotte een minder snel door de seizoenen wandelende kalender in⁶¹, door om de 4 jaar een schrikkeljaar in te voeren waarin het jaar met een dag werd verlengd.

Dit jaar was echter nog iets te lang. Omdat de schrikkeljaren in het begin bovendien foutief werden gehanteerd (om de drie jaar in plaats van vier) liep het verschil met het echte zonnejaar weer op.

*Aloysius
Lilius
440 jaar
geleden*

440 jaar geleden was dit verschil inmiddels al tot 11 dagen opgelopen. Om deze afwijking te corrigeren riep Paus Gregorius XIII in A.D. 1563 een concilie bijeen: het Concilie van Trente. Dit concilie nam het voorstel van de Napolitaanse arts Aloysius Lilius aan om het jaar éénmalig 11 dagen in te korten en bovendien een correctie op de schrikkeljaren in te voeren door tijdens jaren die door 400 deelbaar waren de schrikkeljaar weg te laten⁶².

*"Geef ons de
verloren tijd
terug!"*

Dit voorstel werd aangenomen en 18 jaar later, in A.D. 1582, uitgevoerd. Dat gaf natuurlijk de nodige problemen. Zo ontstonden er oproeren, want de mensen hadden het idee dat zij tijd kwijt waren geraakt:

"Geef ons onze 11 dagen weer!"

Dit idee van een verlies volgde o.a. uit het gegeven dat sommige weersvoorspellingen (weerspreuken of -regels) aan bepaalde Heiligendagen waren gekoppeld.

*is onze
Gregoriaanse
kalender nu
goed?*

Toch is de door Paus Gregorius VIII ingevoerde -huidige- kalender (ook 'de Gregoriaanse kalender' genoemd) nog iets te groot zodat er in de (voor ons) verre toekomst nog wel eens een schrikkeljaar zal moeten vervallen.

Intermezzo 1: De invoering van de westerse jaartelling⁶³

In 526 voerde Paus Johannes 1 de christelijke jaartelling in.

Deze was gebaseerd op de berekeningen van de pauselijke chronoloog, de monnik Dionysius Exiguus.

In 523 berekende deze op basis van de bijbelse gegevens en de regeerperiode van Keizer Augustus de datum van de geboorte van Christus. Hij kwam tot de conclusie dat die in het jaar 754 van de Romeinse jaartelling was geboren. Dat jaar moest dus het jaar 1 van de nieuwe jaartelling worden. Er waren in zijn berekening -afgezien van de onzekerheden rond de precieze vaststelling van het tijdstip van de geboorte van Christus- ook nog andere fouten ingeslopen, waaronder één die werd gegeven door het feit dat hij er geen rekening mee hield dat Keizer Augustus ook nog 4 jaar onder zijn oorspronkelijke naam Octavianus had geregeerd.

De nieuwe jaartelling werd -alles wat nieuw is geeft problemen- niet zonder meer geaccepteerd. Men rekende volgens de regeerperiode van de verschillende heersende vorsten of volgens het pontificaatjaar van de paus of volgens de nieuwe telling. Na 1400 voegde men de nieuwe telling vaak aan de toen gebruikelijke toe.

Bij alle ophef die over 'het jaar 2000' zal worden gemaakt moeten wij ons bedenken dat wij nu waarschijnlijk al in de 21^{ste} eeuw zouden leven wanneer Dionysius Exiguus toen beter geïnformeerd was geweest!**

61 Jones, p. 578.

62 Jones, p. 579, 580.

63 Ahlers, p. 223-224.

** N.B. Deze tekst werd in 1995/1996 geschreven.

Intermezzo 2: De invoering van de Gregoriaanse kalender ⁶⁴

De nieuwe kalender werd in de r.k. landen tussen 1582 en 1587 ingevoerd, te weten in: de Zuidelijke Nederlanden, Holland, Zeeland, de stad Groningen, Limburg en Zeeuws-Vlaanderen,

en in:

Duitsland (r.k. staten), Frankrijk, Hongarije, Italië, Polen, Portugal, Spanje en Zwitserland (r.k. kantons).

Uit weerstand tegen de paus⁶⁵ vond in de protestantse gebieden de overgang pas in de 18^e eeuw plaats:

tussen 1700 en 1798 in:

Gelderland, Overijssel, Utrecht, Friesland, Groningen en Drente,

en in:

Duitsland (overige staten), Zweden en Zwitserland (overige kantons).

In Japan⁶⁶ werd de Gregoriaanse kalender op 1 januari 1873 ingevoerd, maar voor het eigen gebruik wordt de op het jaar van de troonsbestijging van de keizer gebaseerde telling gehanteerd.

In Israël vinden wij een vergelijkbare situatie. Men gebruikt daar de religieuze en de westerse kalenders naast elkaar⁶⁷. De religieuze kalender is gebaseerd op de traditie van de schepping van de aarde, overeenkomend met 7 oktober -3761. De kalender is een maankalender met intercalaties, waardoor het aantal dagen in het jaar varieert tussen 353 en 385.

De oud-katholieke landen⁶⁸ en China voerden de Gregoriaanse kalender pas in de 20^{ste} eeuw in.

Tussen 1916 en 1920 gebeurde dat in:

Bulgarije, China, Griekenland, Joegoslavië, Roemenië, Rusland en Turkije.

Groningen spande in dit opzicht de kroon⁶⁸. De stad had een conflict met haar Ommelanden. Omdat die in 1579 de Unie van Utrecht ondertekenden deed de stad Groningen dat niet en bleef Spaansgezind⁶⁹. De stad ging op 28 februari 1583 over op de Gregoriaanse kalender, en sprong naar 11 maart 1583. Nadat Groningen door Prins Maurits in 1594 tot overgave was gedwongen werden Groningen en de Ommelanden samen één van de Verenigde Nederlandse Provinciën. Dit had onder andere tot gevolg dat men op 19 november 1594 de Juliaanse kalender weer invoerde. Men sprong dus weer terug: naar 9 november. Pas op 31 december 1700 voerde men daar de Gregoriaanse kalender opnieuw in (en miste Nieuwjaar, waar men toen kennelijk niet zo zwaar aan tilde): de volgende dag was het 12 januari 1701!

64 Ahlers, p. 225-228.

65 Het is een treurige eigenschap van ons mensen dat religieuze verschillen de invoering van goede maatregelen vele eeuwen tegen kunnen houden! Hier was dat gedurende respectievelijk 2 en 4 eeuwen het geval.

66 Ahlers, p. 231.

67 Ahlers, p. 229-230.

68 Ahlers, p. 227.

69 Hartman en Kornack, p. 15-16.

Hoe laat is het?

Het meten van het tijdsverloop tijdens de dag (en de nacht)

*Schaduw-
klokken:
meer dan
6000 jaar
oud*

Zolang de mensheid zich van zichzelf bewust is geweest zal men hebben geweten dat *de schaduw van de zon* gedurende de dag eerst steeds korter wordt en vanaf de middag weer langer, terwijl ook de hoek ervan voortdurend verandert. Door de hoek die de schaduw maakt af te lezen, kon de gnomon ook worden gebruikt om te kijken hoe laat het was.

*draagbare
zonnewijzers
en andere
klokken*

Hoewel draagbare zonnewijzers⁷⁰ in sommige culturen veel werden gebruikt⁷¹, waren die voor hun gebruik natuurlijk ook aan de aanwezigheid van de zon gebonden.

Niet van de zon afhankelijke methoden om het passeren van de tijd te meten, zoals de langzaam brandende opgerolde staaf wierook of de kaars, of de (slechts 750 jaar oude) zandloper⁷² (eigenlijk een soort stopwatch-voor-gefixeerde-tijdsduren) kwamen pas vele eeuwen later in gebruik, terwijl hun nauwkeurigheid beperkt was.

Waterklokken

*water-
klokken:
meer dan
4000 jaar
oud*

Omdat bewolking de waarnemingen belemmerde, had men behoefte aan van de astronomie onafhankelijke klokken.

De oudste echte klokken waren *waterklokken* ('*clepsydra*'). Deze zijn zeker 4000 of meer jaren geleden uitgevonden, want het oudste bekende exemplaar dat in Karnak in Egypte is gevonden, is vermoedelijk afkomstig uit -1400 en is 3400 jaar oud (figuur 8).

*de oudste
waterklok is
van
doorschijnend
albast gemaakt
deze is
3550 jaar
oud*



Figuur 8. De oudste nog bestaande waterklok⁷³
De uitstroomopening bevindt zich linksonder.

*waterdruk
en
waterstroom*

Deze klok⁷⁴, die van doorschijnend albast is gemaakt, laat al zien dat er een hele ontwikkeling aan vooraf is gegaan.

De oudste vorm, die door haar eenvoud lang gangbaar bleef, moet die van een vat in de vorm een simpele cilinder met een gat onderin zijn geweest (figuur 9-1 A)⁷⁵.

⁷⁰ De gedetailleerde ontwikkeling van de zonnewijzer blijft hier buiten beschouwing.

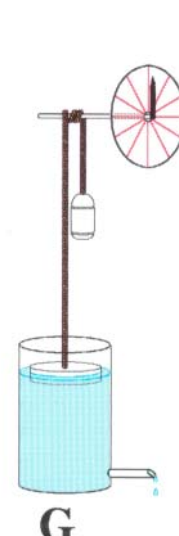
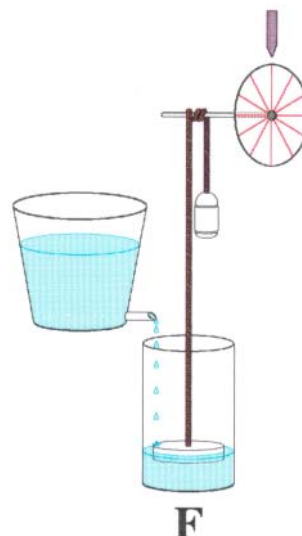
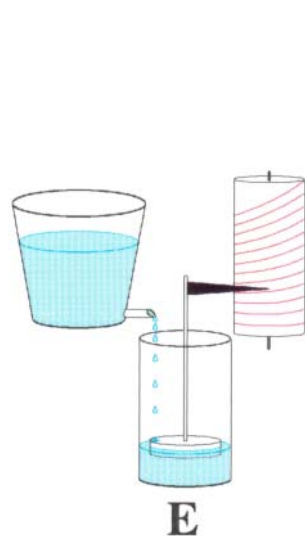
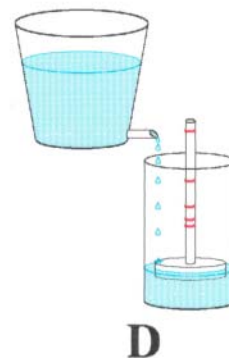
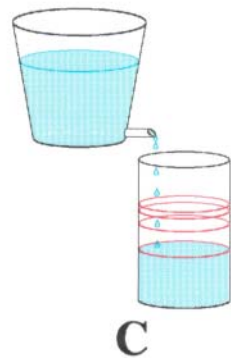
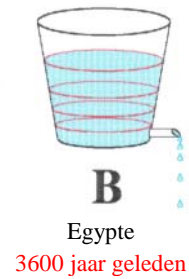
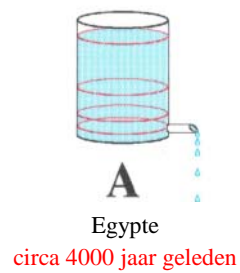
⁷¹ Needham III, pp. 310-31. In Europa bleef de zonnewijzer in gebruik tot lang na de opkomst van de mechanische klok.

⁷² ca. -1375, zie Price, p. 601.

⁷³ Kleurmontage van Fig. 48 in Leach, p. 22.

⁷⁴ Replica te zien in het Zaans Uurwerkenmuseum.

⁷⁵ Idem.



Figuur 9-1. Ontwikkeling van de clepsydra.

Kleurgebruik in de tekeningen: opeenvolgende tijdsduren ("uren", bvb), water.

De tekeningen zijn schetsen, uitsluitend gemaakt om de ontwikkeling weer te geven.

Er is niet naar feitelijke weergave gestreefd. Zo zijn, bijvoorbeeld, de uitstroomopeningen veel te groot getekend.

Het water kwam er in druppels, heel langzaam, uit.

Het uitstroompijpe kan ontbreken.

Ook zijn voor het begrip niet belangrijke onderdelen -zoals geleiders- weggelaten.

Hetzelfde geldt voor de tekeningen in Figuur 9-2.

Maar men moet al heel snel hebben ontdekt dat de uitstroom afneemt als de waterspiegel daalt (doordat de door de waterkolom uitgeoefende druk door het hoogteverschil tussen de waterspiegel en de uitstroomopening wordt bepaald).

**lees
prolema**

De tijdseenheden ('uren') werden aan de binnenkant door strepen aangegeven. Voor gelijke tijdseenheden kwamen deze dus steeds dichterbij elkaar te liggen naarmate het vat leger werd. Het aflezen ervan werd dus steeds moeilijker en steeds minder nauwkeurig. Men trachtte dit effect te ondervangen door het vat naar onderen toe te versmallen. Het kreeg de vorm van een afgeknotte kegel (figuur 9-1 B).

**instroom-
klok:
2600 jaar
oud**

Tenminste 2600 jaar geleden⁷⁶ werd een betere variant ontwikkeld. Men mat niet meer het niveau van het resterende water in het uitstroomvat, maar dat van het in een tweede vat -het instroomvat- opgevangen water (figuur 9-1 C). De oudste variant van dit type is ons bekend uit -640 in Assyrië uit de tijd van de regering van koning Assurbanipal. De verstreken tijdsduren werden weer door strepen op de binnenkant van het vat aangegeven.

**drijver:
2350 jaar
oud**

Ongeveer 2350 jaar geleden beschreef de Griek Ktesibios de plaatsing van een drijver in het instroomvat⁷⁷, met behulp waarvan de tijd kon worden aangewezen. Door de wijzer naar een draaibare trommel met seizoensafhankelijke uren te laten wijzen⁷⁸ kon hij de verstreken tijd aan de wisseling van de daglengte aanpassen (figuren 9-1 D en E).

**draaiende
wijzerplaat:
circa 2000
jaar oud**

Vitruvius beschreef ongeveer 2030 jaar geleden een toestel om sterdoorgangen te voorspellen. Een cirkelvormige plaat waar de sterren op waren getekend werd door de drijver van een waterklok rondgedraaid. Dit gebeurde met behulp van een om de as van de 'wijzerplaat' gewonden koord en een (licht) contragewicht (figuur 9-1 F). Met gefixeerde (dus niet bewegende) draden konden de actuele posities van de sterren van de draaiende plaat worden afgelezen.

**de computer
is al 2000
jaar oud**

Dit 'astrolabium' was dus een echte ster-computer!

Om op de toekomstige ontwikkeling van de wijzerplaat te anticiperen zijn hier een roterende wijzerplaat en een gefixeerde wijzer getekend (figuur 9-1 F) in plaats van de draaiende tekening van de -lokale- sterrenhemel en het stilstaande aanwijzer-raamwerk van ijzerdraad⁷⁹.

**vaste
wijzerplaat,
uurwijzer
draait:
800 jaar
oud**

De vaste wijzerplaat met roterende uurwijzer is een Arabische uitvinding uit het begin van de 13e eeuw⁸⁰ (Figuur 9-1 G) en werd in de 14e eeuw zowel in Europa als in China⁸¹ ingevoerd. De minutenwijzer kwam pas in regelmatig gebruik toen het mogelijk werd mechanische klokken van voldoende nauwkeurigheid te bouwen, wat veel later het geval was.

76 Needham III, pp. 313-314.

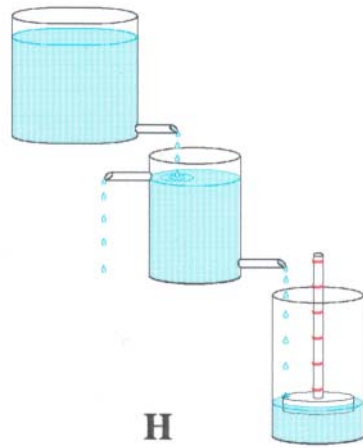
77 Ongeveer in het midden van de 3e eeuw v.C., Needham III, p. 314-315.

78 Price, pp. 601-602.

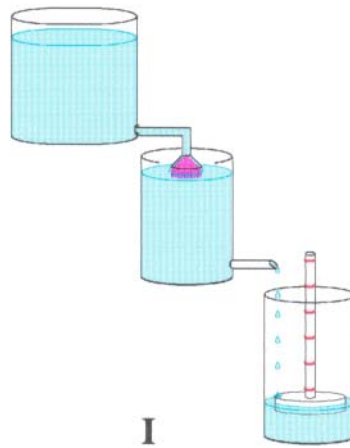
79 Price, p. 605.

80 Needham IV-2, p. 442.

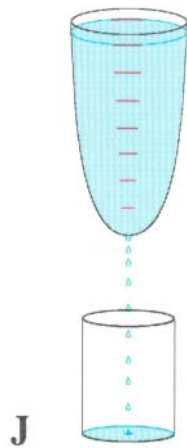
81 Needham IV-2, p. 412 (beschreven door el-Gazari in +1205) en p. 511. In China beschreven in +1370. In de Europese mechanische uurwerken vanaf het begin van hun ontwikkeling aanwezig (circa +1350). Een waterklok met drijver en roterende wijzer plus vaste wijzerplaat (figuur 10 G) is te vinden op een Chinese tekening uit +1627 op blz. 467.



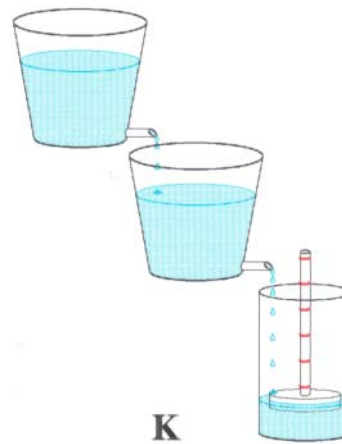
H
Griekenland
2350 jaar geleden



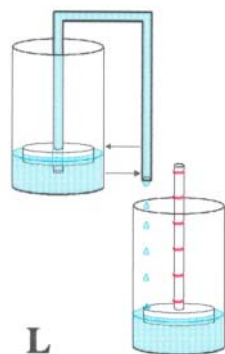
I
Griekenland
2030 jaar geleden



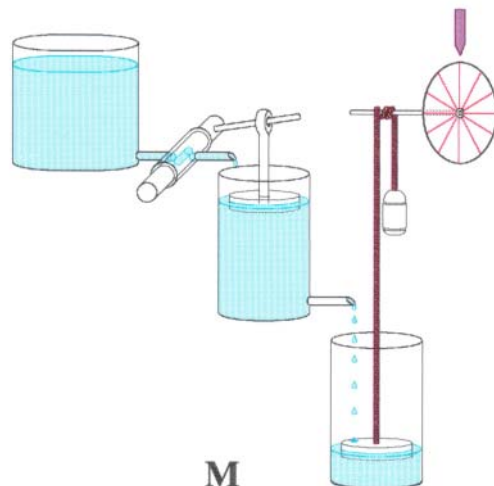
J
Griekenland
circa 2000 jaar geleden
(zie Figuur 11)



K
China
circa 1800 jaar geleden



L
Griekenland
circa 2000 jaar geleden



M
Arabië **meer dan 1100 jaar geleden**
De drijver kon ook in het reservoir linksboven worden geplaatst in plaats van in het instroomvat, zoals hier is getekend).

Figuur 9-2. Ontwikkeling van de clepsydra, vervolg
N.B. L en M zijn wat de toepassing op klokken betreft hypothetisch.

Verbeteren van de nauwkeurigheid van de waterklok

**vorm
van het
vat:
cilinder
4000 jaar**

Aan de nauwkeurigheid van de waterklokken werden geleidelijk aan hogere eisen gesteld. Pogingen om deze op te voeren varieerden van aanpassingen van de vorm *van de vaten* tot systemen die *de waterhoogte* trachtten te *regelen*.

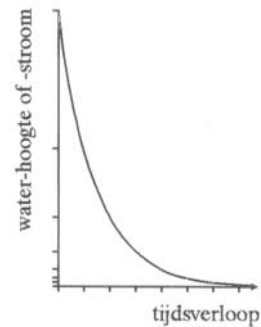
De afname van de waterstroom ten gevolge van de afname van de waterhoogte (dus de waterdruk) (figuur 10) maakte de aflezing minder nauwkeurig naarmate het instroom- resp. uitstroomvat verder leeg dan wel vol was gestroomd.

**kegel
3600 jaar**

Het cilindervormige vat (figuur 9-1 A) werd door dat van een *afgeknotte kegel* vervangen (figuur 9-1 B).

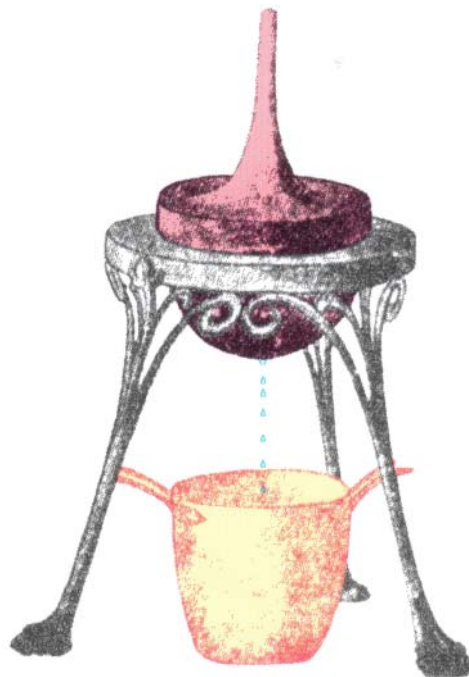
**amfoor
2000 jaar**

Een fraaie aanpassing aan de exponentieel afnemende uitstroom van het water (zie figuur 10) werd door de Grieken ontwikkeld in de vorm van een exponentieel gevormd uitstroomvat: de amfoor (figuur 9-2 J⁸² en 11).



Figuur 10.

Het zou leuk zijn om te weten te komen of de Grieken deze vorm primair op theoretische gronden (de exponentiele functie was hun bekend) voor de waterklok hadden ontwikkeld en deze toepassing zo fraai vonden dat zij die ook voor hun amforen gingen gebruiken, of dat zij deze vorm al om esthetische redenen hadden ontwikkeld en daarna inzagen dat die exponentieel was en daardoor goed voor waterklokken was te gebruiken.



Figuur 11.
Griekse amfoor-waterklok⁸³
opgenomen in een reconstructie.

82 Schmidt, p. 41.

83 Lübke, Figuur 162 op p. 89. Kleurbewerking.

De plaat roept veel vraagtekens op. Zinvol aflezen moet in het bovenste vat -het uitstroomvat- gebeuren. Bevatte dit een drijver met stok? Zo ja, hoe was dat er in gemonteerd?

**overloop-
regeling
2300 jaar**

Door vanuit een reservoir een overmaat aan water in een uitstroomvat te laten stromen en dat vat van een overloop te voorzien, konden de waterhoogte en dus de snelheid waarmee het water uit het vat stroomde constant worden gehouden (figuur 9-2 H). Deze regeling werd 2300 jaar geleden in Griekenland door Ktesibios ontworpen⁸⁴.

Nog fraaier is de regeling die voor het regelen van het niveau van de wijn in een soort "weduwe van Sarfat" vat⁸⁵ door Hero (of een ander lid van de Alexandrijnse school) was ontworpen en in zijn werk staat beschreven (circa 2000 jaar geleden: fig. 9-2 I)⁸⁶:

**vlotter-
regeling
2000 jaar**

Hier ontmoeten wij de vroegste vorm van een door middel van *tegenkoppeling* werkend regelsysteem (figuur 9-2 I). De **drijvende vlotter** wordt nu in het uitstroomvat gebruikt. De **vlotter** sluit bij het stijgen van de **vloeistof**spiegel de **aanvoer** vanuit een reservoir af. De hoeveelheid **vloeistof** die per tijdseenheid door het systeem stroomt is constant. Dus kan de vlotter-tijdwijzer combinatie zowel in het reservoir (figuur 12) als in het instroomvat worden geplaatst (figuur 9-2 I).

In de Arabische handschriften⁸⁷ van el-Gazari⁸⁸ wordt Archimedes als de uitvinder van dit systeem genoemd, maar dat betekent waarschijnlijk dat hen bekend was dat dit systeem van Griekse oorsprong is.

In deze handschriften staat het vlotter-regelsysteem expliciet toegepast voor de regeling van de **waterhoogte** in een waterklok (figuur 12)⁸⁹. Een in droge streken belangrijk voordeel van dit systeem is dat het geen **water** verspilt, wat bij de overloopregeling (figuur 9-2 H) bepaald wél het geval is (tenzij het water wordt opgevangen en gebruikt).

**vlotter-
regeling via
een kraan
7000 jaar**

In hetzelfde manuscript van el-Gazari staat een verdere ontwikkeling van dit regelsysteem beschreven, al wordt dit daar niet op een waterklok toegepast maar op een automatisch op niveau blijvende, geen water verspillende, drinkbeker voor vee⁹⁰. In dit systeem bedient de **vlotter** via een **hefboom** een **kraan** (figuur 13). De **kraan** wordt geopend wanneer de vloeistofspiegel beneden het ('ingestelde') niveau zakt en gesloten wanneer deze erboven komt (met tussenstanden vanwege onderlinge verschuiving van de doorboringen in de kraan zelf). Toepassing op een waterklok lag m.i. voor de hand (figuur 9-2 M). Of dit werkelijk is gebeurd is mij niet bekend.

Interessant zijn ook de *tekenfouten* in de figuren 12 en 13. Het gaat hier om een extra gat in het uitstroomvat van figuur 12, zowel als het foute verloop van het handvat van de kraan 'door' de ring op de stang van de vlotter van figuur 13 evenals het dóórlopen van de waterleiding in de kraan zelf (vgl. fig. 9-2 M). Omdat de handschriften in die tijd alleen door overschrijven en natekenen konden worden vermenigvuldigd, zal de kopiist bij gebrek aan begrip voor de behandelde stof zulke fouten vermoedelijk niet eens op hebben gemerkt.

84 Price, pp. 601-602.

85 Lees hiervoor het bijbelverhaal in 1 Koningen 17:17-24.

86 Hero, fol. 26r.

87 Bijvoorbeeld Cod. Or. 117 in de verzameling van de Universiteitsbibliotheek te Leiden.

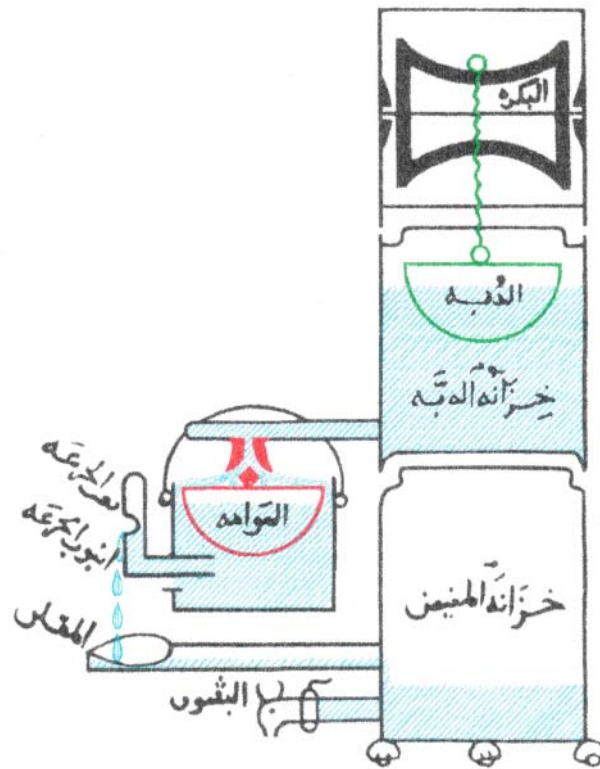
88 el-Gazari (ook el-Jazari geschreven) leefde van 1181-1206. Hij vertaalde ook verschillende uit het Grieks afkomstige en reeds in het Perzisch overgezette handschriften in het Arabisch.

89 Gegevens en tekening uit de Vaux, pp. 287-322. Kleurmodificatie van de tekening (het water is apart ingetekend).

90 Gegevens en tekening ontleend aan de Duitse vertaling van een handschrift van el-Gazari, van de hand van Wiedemann, p. 340. Kleurmodificatie van de tekening (het water is hier apart ingetekend).

2030 jaar
geleden

regelvat met
uitstroom (met
kopieerfout) en
door vlotter
afsluitbare
afvoerleiding



as met niet
getekende
wijzerplaat

uitstroomvat
met vlotter
voor de wijzer

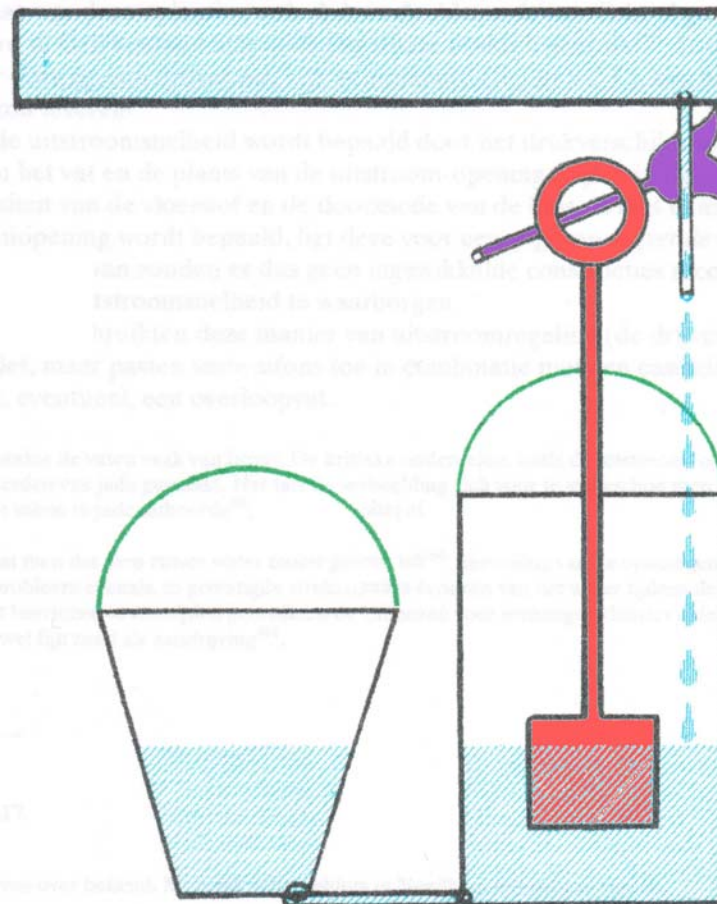
Opvang-
reservoir met
aftapkraan

Figuur 12. Griekse waterklok met vlotterregeling⁸⁹

meer dan
1100 jaar
geleden

Let op de
aard van deze
tekening: het
is een
doorsnede
plus een
ruimtelijke
weergave
(groen: de
twee halve
cirkels in
semi-perspect
ief).

drinkbeker
voor het vee



reservoir of
aanvoerleiding

kraan met
kopieerfouten

instroomvat met
de vlotter die de
kraan bedient

Figuur 13. De toverbeker van Benu Musa⁹⁰

Waterklokken in China

China:
vanaf 2500
jaar geleden

Circa 2500 jaar geleden werden waterklokken in China bekend. Zij gaven deze vaten de naam 'druppelvat'⁹². Dit duidt er op dat de uitstroomsnelheid heel laag was en de openingen dus klein waren (in de tekeningen zijn de openingen overal veel te groot weergegeven). Zij begonnen met het uitstroomvat⁹³, maar 2200 jaar geleden kwam het type instroomvat met drijver en indicatorstaaf (figuur 9-1 D) in gebruik⁹⁴.

fysische
invloeden
2000 jaar

Al snel vond men dat zowel de temperatuur (dus de viscositeit van het water) als de vochtigheid (dus de verdampingssnelheid) de nauwkeurigheid van de klok beïnvloedde (Huan Than, -40 tot +30). Men ontdekte deze invloeden doordat men in de astronomische observatoria voortdurend de met clepsydra's bepaalde kloktijd met de astronomische tijd vergeleek⁹⁵.

overloop-
regeling

Voor of omstreeks +550 kwam ook het overlooptype in gebruik (type J, figuur 9-2). Daarmee werd een constante waterstroom gegarandeerd⁹⁶. Vermoedelijk werd de overloopregeling ter meerdere zekerheid in combinatie met andere systemen gebruikt.

cascade van
buffervaten
1800 jaar

Voor het probleem van de teruglopende waterstroom als gevolg van het dalen van de waterhoogte in het uitstroomvat vond vermoedelijk Chang Heng in of voor +120 een geheel eigen oplossing: het gebruik van buffervaten (figuur 9-2 K)⁹⁷. Het aantal buffervaten varieerde van 1 tot een cascade van 6 stuks. Hoewel de uitstroomsnelheid van het water nog steeds niet constant was en geleidelijk daalde, was die afname in het laatste uitstroomvat een stuk minder dan bij het gebruiken van één uitstroomvat. Dus nam de afleesnauwkeurigheid evenzo minder snel af.

drijvende
sifon-
clepsydra
meer dan
1900 jaar

Chang Heng en medewerkers gebruikten de sifon (hevel) voor de uitstroom van het water⁹⁸. Weliswaar was deze oplossing ook al door de Alexandrijnse School genoemd, maar deze werd in Griekenland niet in de dagelijkse praktijk gebruikt⁹⁹, hoewel de sifon, wanneer deze op een drijver zou zijn gemonteerd (figuur 9-2 L), een constante waterstroom zou leveren. Omdat de uitstroomsnelheid wordt bepaald door het drukverschil tussen het waterniveau in het vat en de plaats van de uitstroomopening (pijlen in figuur 9-2 L), door de viscositeit van de vloeistof en de doorsnede van de buis en met name van de uitstroomopening, ligt deze voor een gegeven *drijvende sifon* vast. Bij het gebruik hiervan zouden er dus geen ingewikkelde constructies meer nodig zijn om een constante uitstroomsnelheid te waarborgen. De Chinezen gebruikten deze manier van uitstroomregeling (de drijvende hevel) echter niet, maar pasten vaste sifons toe in combinatie met een cascade van buffervaten en, eventueel, een overloopvat.

Men maakte de vaten vaak van brons. De kritieke onderdelen, zoals de uitstroomopening of de sifon werden van jade gemaakt. Het tart de verbeelding zich voor te stellen hoe men 2000 jaar geleden sifons in jade uitboorde¹⁰⁰.

Ook wist men dat men zuiver water moest gebruiken¹⁰¹. Vervuiling van de openingen vormde een groot probleem evenals, in gematigde streken, het bevrozen van het water tijdens de winter. Om het bevrozen te vermijden gebruikten de Chinezen voor sommige (kleinere) klokken soms kwik of ook wel fijn zand als aandrijving¹⁰².

91 geen voetnoot.

92 Needham III, p. 315.

93 Needham III, p. 319.

94 Needham III, pp. 319, 320.

95 Needham III, pp. 321, 322.

96 Needham III, pp. 316, 317.

97 Needham III, pp. 316, 317.

98 Needham III, pp. 320.

99 Needham III, p. 315.

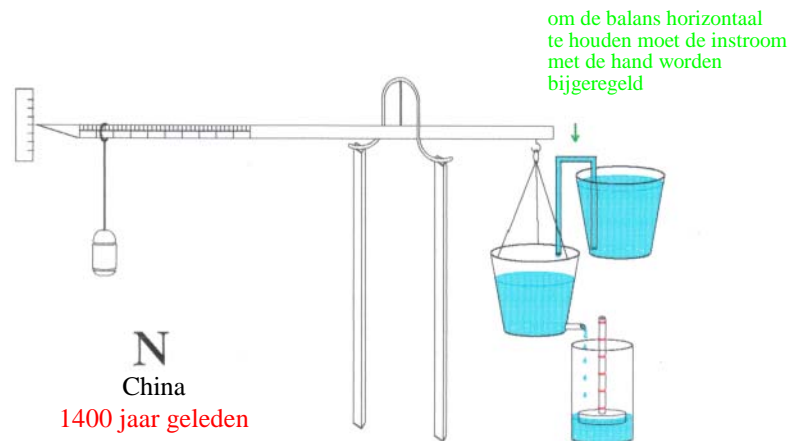
100 Mij zijn hier geen gegevens over bekend. Mogelijk is hier elders in Needham iets over te vinden.

101 Idem.

102 Needham IV-2, pp. 480, 509-512.

wegen:
de balans-
clepsydra
1400 jaar

Een unieke constructie vormde het gebruik van een aan een balans opgehangen buffervat, waarmee men het ingestroomde water voortdurend woog (figuur 14 (type N)). Door het gewicht over de arm van de balans te verschuiven kon de seizoensvariatie in de daglengte worden ingesteld (wat men bijvoorbeeld om de 14 dagen deed). Men regelde met deze balans de massa van het water in het tussenvat, dus het niveauverschil tussen waterspiegel en uitstroomopening, het bijbehorende drukverschil en daarmee de uitstroomsnelheid van het water. Deze constructie is bekend vanaf ca +600.



Figuur 14. Balans-waterklok¹⁰³

exit
zelfregeling

Net als bij de vlotterregeling of die door middel van een kraan (die in China niet werden gebruikt) is hier sprake van een echte regeling van de waterhoogte. Maar terwijl er bij de genoemde regelingen sprake is van een regelsysteem, een automaat, dus een zelfstandig werkend en zichzelf corrigerend systeem, is dat hier niet het geval. Zodra het systeem een afwijking vertoonde moest de menselijke waarnemer ingrijpen om de oorspronkelijke situatie te herstellen. *Dit systeem moest dus voortdurend door mensen worden bewaakt.*

Zelfregeling door middel van tegenkoppeling werd verder niet meer systematisch in klokken toegepast, behalve door Christiaan Huygens tussen 1666-1668 en kwam pas in de 20^e eeuw in de klokken terug.

grote
precisie
maar hoe
groot?

Uit deze beschrijvingen volgt dat men in China al heel lang geleden de tijd van de dag (en de nacht) met een vrij grote nauwkeurigheid moet hebben kunnen meten. Helaas zijn er over de mate van nauwkeurigheid geen nadere gegevens bekend, zodat de ontwikkeling ervan niet expliciet in kaart kan worden gebracht. Hetzelfde geldt voor de eerder genoemde waterklokken.

103 Getekend (met wijzigingen) naar Needham III, Fig. 138 D, p. 316.

De Chinese watermolenklokken

*waterkracht
motor: een
watermolen
1900 jaar
geleden*

Voor hun astronomische waarnemingen gebruikten de Chinezen een soort planetarium. Een stelsel van ringen -armillarium- waarmee zij posities van de sterren waar konden nemen en konden volgen. Zo'n systeem kon behoorlijk zwaar zijn en *meerdere tonnen* wegen. Het moest *door een aparte motor* worden aangedreven, waarvoor de Chinezen vanaf ca +132 een *watermolen met gedoseerde waterkracht* gebruikten¹⁰⁴.

*computer-
voorspelling
1900 jaar
geleden*

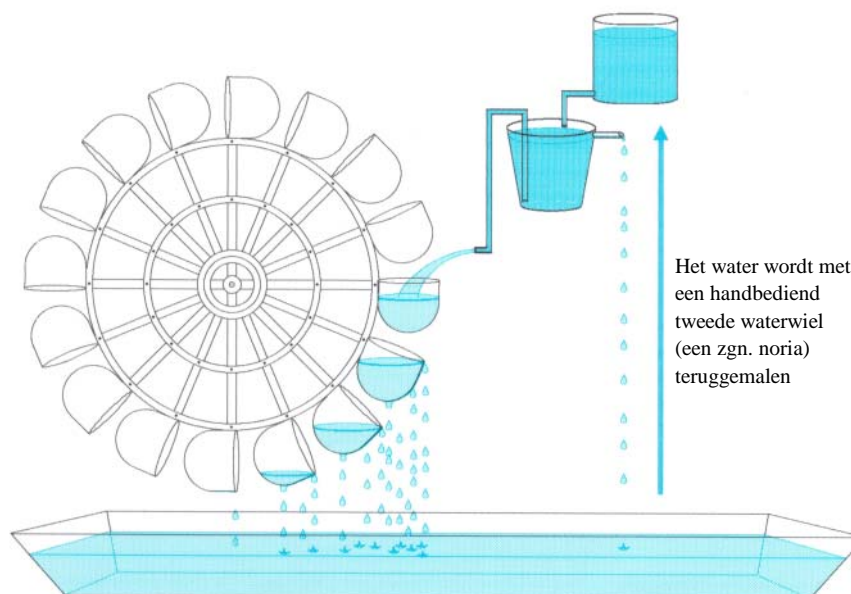
Vanaf vroege tijden (tenminste vanaf +132) werd in het astronomisch observatorium op deze manier een apart armillarium aangedreven. Dit was in een afgesloten ruimte opgesteld. Wanneer volgens deze 'computer' de op- of ondergang van een bepaalde ster werd voorspeld, of de passage ervan door het zenit, werd dat aan de waarnemers gemeld die vervolgens nagingen of de voorspelling klopte met de werkelijkheid! Volgens de boeken werkte dit systeem bijzonder goed. En dat ca 1900 jaar geleden!

De machine waarmee het armillarium werd aangedreven werd door Chang Heng ontwikkeld en beschreven in een publicatie uit +125 getiteld: "Toestel om een armillarium door water uit een waterklok te roteren". Helaas is deze publicatie verloren geraakt en zijn alleen nog enkele fragmenten bewaard in de vorm van citaten. Omdat onderzoekers na hem zijn werk gebruikten en daarbij aan hem refereerden, is zijn machine echter met een redelijke mate van zekerheid te reconstrueren.

Bij het construeren van de aandrijving ging het er om het aandrijfwiel van het armillarium voldoende langzaam te roteren, zodat het de bewegingen van de sterrenhemel nauwkeurig kon volgen¹⁰⁵.

*watermolen
+
waterklok
=
klok*

Voor het maken van deze langzame maar toch krachtige aandrijving bleek een combinatie van watermolen plus waterklok het geschikte instrument te zijn. De Chinezen hadden vanouds veel ervaring met watermolens opgedaan en gebruikten het molenwiel als aandrijfwiel waar de waterklok op inwerkte. Een (speculatieve) versie daarvan is in figuur 15 geschetst. ***In feite werd de waterklok gebruikt om een nauwkeurige astronomische klok te maken.***



Figuur 1.5. Molenwiel met clepsydra
1900 jaar oud¹⁰⁶.

104 Needham III, pp. 359-366. De hierna volgende beschrijvingen -tot de eerstvolgende voetnoot- zijn allemaal op het hierin beschreven werk gebaseerd.

105 Needham IV-2, pp. 360-361.

106 Uitvinding van Chang Heng in +125. De tekening is een speculatieve versie, geïnspireerd door de beschrijving in Needham IV-2, pp. 481 en 485.

Op dit molenwiel zitten de waterbakken vast gemonteerd. Deze worden achtereenvolgens vanuit de waterklok gevuld. Zodra het gewicht van de gevulde bak voldoende groot is geworden draait het wiel verder (vermoedelijk doordat de bak met een pin op een tong met contragewicht rustte (zoals 7 en 8 in Fig. 16). De wrijving in het totale systeem¹⁰⁷ (inclusief de door een nok op de as van het molenwiel aangedreven volgende wielen en –uiteindelijk – het planetarium –beide zijn niet *getekend*–) zorgt voor het afremmen van de aandrijving. Het systeem komt tot rust als de volgende bak op zijn beurt weer door de waterklok wordt gevuld. Het reservoir rechtsboven wordt met een handbediend waterwiel ('noria') vanuit het opvangbekken gevuld.

De eerste gangregelaar: het echappement van I-Hsing

het eerste echappement 1275 jaar geleden In +723 kreeg de fysicus I-Hsing van de toenmalige keizer de opdracht een nauwkeurig werkend armillarium te maken. Van zijn ontwerp werd door de technicus Liang Ling-Tsan eerst een kleiner model van hout gebouwd. Toen dit goed bleek te werken, werd het definitieve toestel van ijzer en brons gegoten. Het werd door een watermolen aangedreven die vanuit een waterklok werd gevuld en die bovendien van een oscillerend start-stop mechanisme –een echappement (gangregelaar)– was voorzien¹⁰⁸ (Figuur 16).

de klokkentoren van Su Sung 900 jaar geleden Dit instrument is bekend geworden doordat in 1086 de keizer aan de fysicus-naturalist Su-Sun de opdracht af een grote astronomische klok te bouwen¹⁰⁹. Voor dit ontwerp volgde hij dat van I-Hsing. Nadat in 1088 het model was gebouwd en goed was gekeurd werd in 1090 in de stad Kaifeng in de provincie Honan een grote klokkentoren gebouwd. Een door middel van een echappement gereguleerde watermolenklok dreef hierin zowel een klok als een groot armillarium en een kleinere sterrenglobe aan¹¹⁰. Het aangedreven instrumentarium moet omstreeks 20 ton hebben gewogen¹¹¹ en de totale machinerie heeft tot aan de inval van de Mongolen in 1126¹¹² goed gewerkt.

het eerste echappement Het idee van Chang Heng uit +125 (het door een waterklok aangedreven molenwiel) werd door I-Hsing uitgebreid met mobiele instroomvaten die werden gewogen¹¹³ (de balans-clepsydra uit +600) en die niet alleen het molenwiel maar ook –en dat is geheel nieuw– een start-stop mechanisme aandreven: *het eerste echappement in de geschiedenis*. Bovendien bevatte dit mechanisme ook een voorziening om de terugslag tegen te gaan. Delen van het aandrijfsysteem plus het volledige echappement staan in figuur 16 getekend en worden daar nader toegelicht.

Met deze klok creëerde I-Hsing een oscillerend systeem. Het oscillatieproces vertoonde een zaagtandverloop. Het was een “relaxatieoscillator” waarvan de periode werd bepaald door de vulselnelheid vanuit de waterklok en door het gewicht dat aan de balans hing.

I-Hsing's klok was echter niet alleen de eerste klok met een echappement, maar dus ook de eerste klok die tikte. In feite de eerste **digitale** klok.

China
↓
Arabië
↓
Europa

Na de inval van de Mongolen is in China de kennis van met name het echappement verloren gegaan. Maar via de zijderoute en in het bijzonder de Arabische cultuur heeft de wetenschap dat een dergelijke regeling voor klokken mogelijk was Europa bereikt. Het mechanisme zelf moest ondertussen opnieuw worden bedacht.

¹⁰⁷ Needham IV-2, p. 51.1.

¹⁰⁸ Needham IV-2, pp. 472-474.

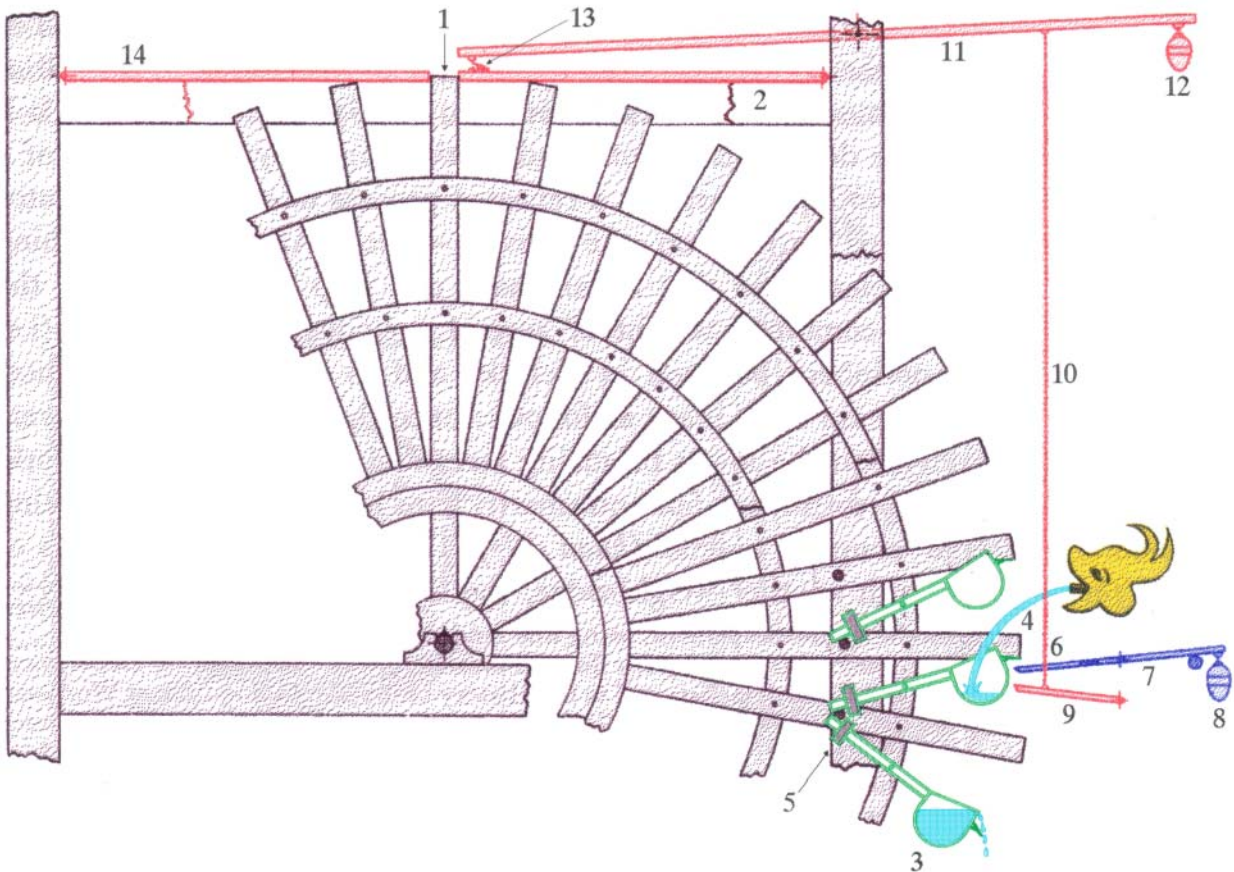
¹⁰⁹ Needham IV-2, pp. 447-465.

¹¹⁰ Zie hiervoor de figuren op blz. 450-458 in Needham IV-2.

¹¹¹ Needham IV-2, p. 465.

¹¹² Needham IV-2, p. 492.

¹¹³ Volgens Lübke p. 95 kunnen het de Arabieren zijn geweest die deze klokken ontwikkelden. Zij waren van de 7^e tot de 17^e eeuw aan de Keizerlijke hoven werkzaam als astronomen en waren voor de kalenders verantwoordelijk.



Figuur 16. I-Hsing's echappement in de watermolenklok van Su Sung¹¹⁴

Tekening van het relevante deel van het waterwiel.

Drakenkop: uitgang van de waterklok.

De waterklok zelf is niet getekend (zie hiervoor figuur 15). **Blauw:** water.

Groen: bewegelijke schoepen.

Donkerblauw: balans (7, 8) van de waterklok, die de vulling van de schoep (3) bepaalt. **Rood:** echappement.

Aan het begin van ieder 24-seconde interval bevindt een spaak (1) zich ingeklemd tussen de linker (14) en de rechter (2) balk van het bovenslot van het echappement. De op het rad vastzittende, maar over die as bewegelijke schoep (3) wordt nu vanuit de waterklok gevuld. (4, zie hiervoor figuur 15). Het contragewicht (5) van de schoep houdt deze in de goede positie voor het vullen. Bij verdergaande vulling komt de schoep met de uitstekende punt op de punt van de rond de ketting (10) lopende vork (6) van de onderste balans (7) te rusten (mogelijk bestond dit onderdeel al in de klok van Chang-Heng (figuur 18)). Het gewicht (8) van de balans bepaalt nu mede het moment waarop de dan volle schoep naar beneden zal, doorslaan. Op dat moment wordt de tong (9) sterk maar heel kortdurend naar beneden geslagen¹¹⁵. Via de ketting (10) en ondersteund door het contragewicht (12) wordt de hefboom (11) hierdoor opgetild, waardoor via de ketting (13) de rechterbalk (2) van het slot omhoog wordt getrokken. De spaak (1) komt vrij en het grote wiel draait nu één spaakpositie naar rechts.

Ondertussen komt de rechterbalk (2) van het slot weer omlaag, waardoor de volgende spaak acuut wordt tegengehouden.. De linkerbalk (14) van het bovenslot valt achter de spaak omlaag, waardoor de terugslag op het plotselinge stoppen van het wiel wordt vermeden. Ondertussen hebben de balans (7) en de tong (9) weer hun rustposities ingenomen en kan de volgende cyclus beginnen. Het zal duidelijk zijn dat de duur van de cyclus en dus ook de nauwkeurigheid ervan geheel wordt bepaald door de vulsnelheid van de schoepen met het water (4) uit de waterklok.

¹¹⁴ Kleurmodificatie van Needham IV-2, Fig. 659 op p. 460.

¹¹⁵ Waarschijnlijk zat een dergelijke tong ook al op de watermolenklok van Chang Heng (niet in Fig. 16 getekend).

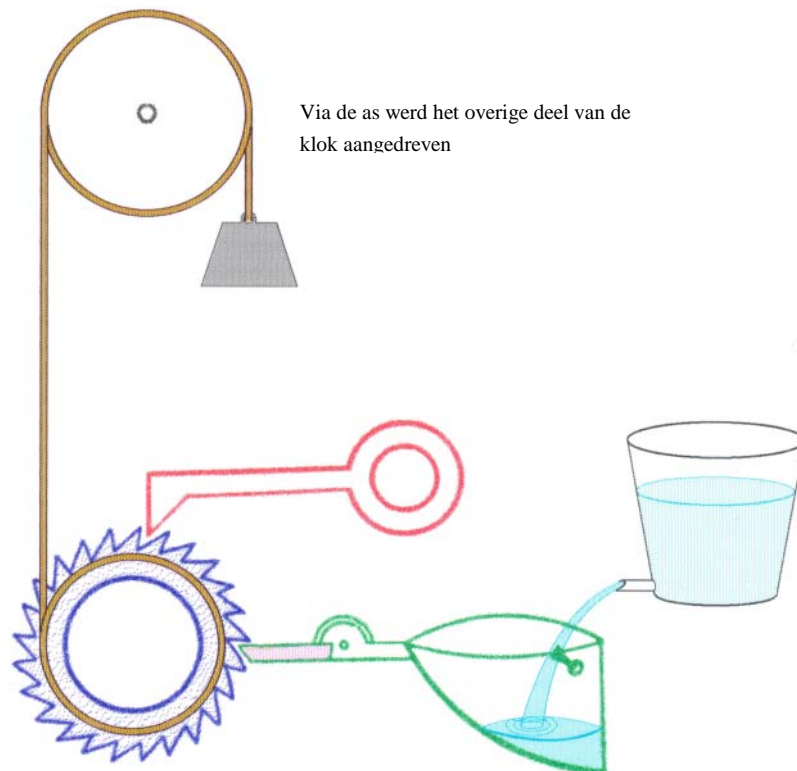
De overgang naar Europa

Het Arabische manuscript van el-Gazari over waterklokken die de tijd aangaven door een geluidssignaal te geven (+1206) vormt een schakel in de overgang van de techniek van het klokken maken vanuit zowel de Griekse als de Chinese¹¹⁶ cultuur naar Europa¹¹⁷.

In figuur 17 zien wij een mechanisme dat tussen de watermolenklokken van Chang Heng en I-Hsing in zit. Het Chinese watermolenwiel is door een Grieks **tandwiel** vervangen. Het instroomvat duwt het **tandwiel** telkens één tand op (en kiept dan leeg). De **pal** verhindert het teruglopen van het **tandwiel**. Er is nu nog maar één **instroomvat** nodig (in plaats van één instroomvat per spaak).

Het effect van deze constructie is weer het creëren van een zaagtandoscillatie, waarbij de periode bepaald wordt door de vulsnelheid van het instroomvat en de door de bovenste trommel gegeven tegenkracht (vermoedelijk hing hier een gewicht aan, dat in de originele tekening niet voorkomt).

*el-Gazari's
waterklok
800 jaar
geleden*



Figuur 17. Waterklok-'echappement' naar el-Gazari¹¹⁸ (+1206).
Gemodificeerd (assen anders getekend,
water, uitstroomvat en gewicht **toegevoegd**).

Het **instroomvat** duwt met de tand ervan (die tevens een **contragewicht** voor het **instroomvat** vormt) het **tandwiel** telkens een tand omhoog en stroomt dan leeg.
Een **koord** wordt daardoor rond de drum van het **tandwiel** opgewonden.,
waardoor een **gewicht** (niet in de originele tekening) wordt opgetild.
Een **pal** verhindert de terugslag van het **tandwiel**.

116 Via de zijderoute (blz. 26).

117 Needham IV-2, p. 534-536.

118 Naar Fig. 672 in Needham IV-2, p. 535. Kleurmodificatie met uitbreidingen.

Aandrijving met behulp van een gewicht (13^e eeuw en later)

Europa in de 13^e eeuw

Mechanische klokken dateren uit de 13^e eeuw¹¹⁹. Vóór die tijd werkte men in Europa met waterklokken en met zonnewijzers.

Karakteristiek voor deze ontwikkeling is het gebruik van *een gewicht* hangend aan een rond een trommel gewikkeld koord als *aandrijving*. Deze constructie is afkomstig van de drijver-plus-contragewicht uit de Griekse waterklokken¹²⁰. Een pal, mogelijk van de Arabieren overgenomen (zie el-Gazari, figuur 17), verhinderde het aflopen van de trommel nadat deze was opgewonden.

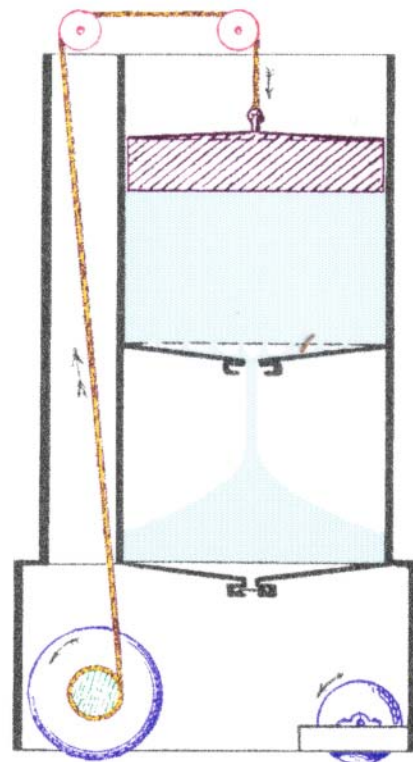
Op zichzelf kan men met een vallend gewicht geen tijd meten, omdat het gewicht *versneld* omlaag *valt*. Men zocht daarom naar een mechanisme dat de val van het gewicht op zo'n manier afremt dat het met een *constante valsnelheid* daalt¹²¹.

Intermezzo 3. Hero's rijdende poppenkast.

Ca 2000 jaar geleden had Hero of een ander lid van de Alexandrijnse school al een oplossing voor het probleem van de afremming van de versnelde val omlaag van een gewicht bedacht, waarschijnlijk geïnspireerd door het mechanisme van het aan een vlotter hangende gewicht.

In Hero's verhandeling over de rijdende poppenkast¹²² (een miniatuur Bacchus tempel) worden de voorwielen door een rond de vooras gewonden koord aangedreven (Figuur 18)¹²³. Via **enige katrollen** ontrolt **een zwaar loden gewicht** het **koord**, waardoor de poppenkast *langzaam en gelijkmatig* naar voren rolt. Het gewicht ligt namelijk in *een open zandloper* op¹²⁴ het oppervlak van **een vulling bestaande uit kleine gladde zaadjes** (mosterdzaad, bv.).

Het probleem van de vorming van een conisch dal met opstaande randen dat bij een enkelvoudige zandloper in de vulling ontstaat en waardoor **het gewicht** in stappen schokkend omlaag zou zakken, was opgelost door boven de uitstroomopening een vlakke bodem met veel openingen te plaatsen.



Figuur 18.
Hero's rijdende poppenkast.

119 Lloyd I, p. 648.

120 Usher, p. 140.

121 Door Hero in ander kader fraai opgelost. Zie Intermezzo 3.

122 Usher, pp. 140-142.

123 Kleurmodificatie van. Fig. 33 in Usher op p. 141. De daar afgesloten bovenste uitstroomopening is hier open getekend.

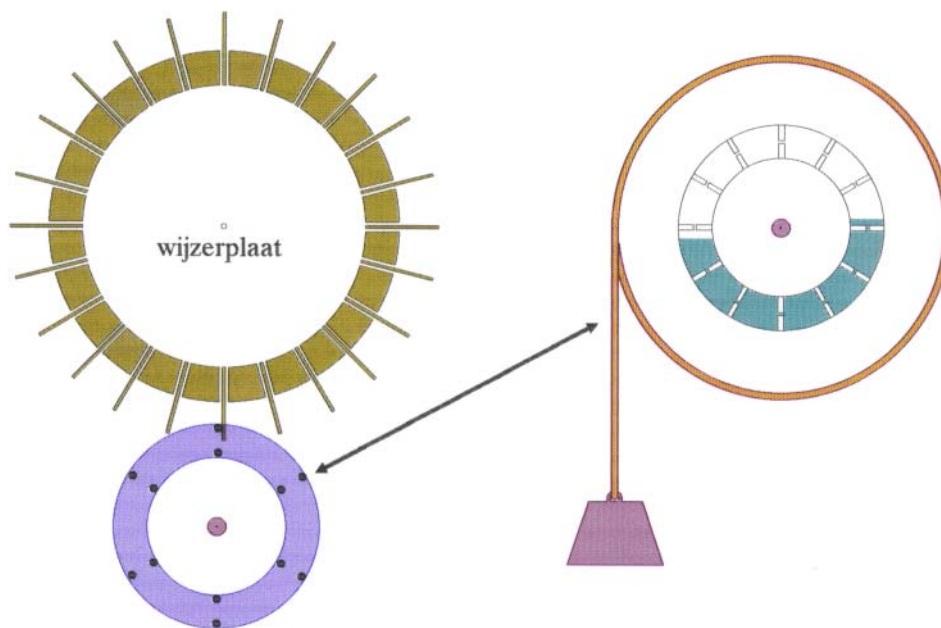
124 De uitvinding van de zandloper zou nog vele eeuwen op zich laten wachten. Zie daarvoor Price, p. 601.

Een tussenvorm: de trommel-clepsydra

*Alfonso's
klok
825 jaar*

Een oude, heel elegante, oplossing voor een eenparige valsnelheid van het gewicht en daarmee één van de vroegste mechanische klokken -ontworpen door Isaac b. Sid¹²⁵ (mogelijk geïnspireerd door Hero' s poppenkast?) - staat beschreven in een Spaans werk dat in 1276-1277 door een groep geleerden voor Koning Alfonso de Wijze van Castilië was samengesteld (figuur 19).

Een **gewicht** hing aan **een koord** dat om een trommel was gewonden. In de trommel bevond zich een ringvormig vat dat in compartimenten was verdeeld. De wand van ieder compartiment was doorboord. Het geheel was voor de helft met **kwik** gevuld. Door het gewicht werd het kwik aan één kant omhoog geduwd tot het geheel in evenwicht was. Maar het **kwik** lekte door de kleine gaten langzaam naar de onderliggende compartimenten en *draaide de trommel langzaam en continu rond*. Daarmee werd een wijzerplaat aangedreven. De rotatie van de trommel en daarmee de draaisnelheid van de klok hing af van de massa van het **kwik** en de viscositeit ervan (of, in latere vormen, van die van het water¹²⁶) en van de doorsnede van de gaatjes.



Figuur 19. De klok voor Alfonso de Wijze uit 1276-1277¹²⁷

De pijl geeft de as aan waar de trommel (rechtsboven) en het tandwiel (linksonder) op zijn bevestigd.
De klok is voor de tekening in twee stukken gedeeld.

Deze ontwikkeling heeft zich echter niet verder doorgezet. Vermoedelijk was het nog niet mogelijk de gaatjes nauwkeurig aan elkaar gelijk te maken, terwijl ook het afstellen van de diameter van de trommel van de 'wijzerplaat' ten opzichte van de rotatie van het kwikreservoir problemen zal hebben gegeven. Het idee was bijzonder goed, maar de techniek was nog niet zover dat de onderdelen met een voldoende nauwkeurigheid konden worden gemaakt.

125 Turner e.a., p. 97 nr. 177.

126 Spierdijk, p. 56.

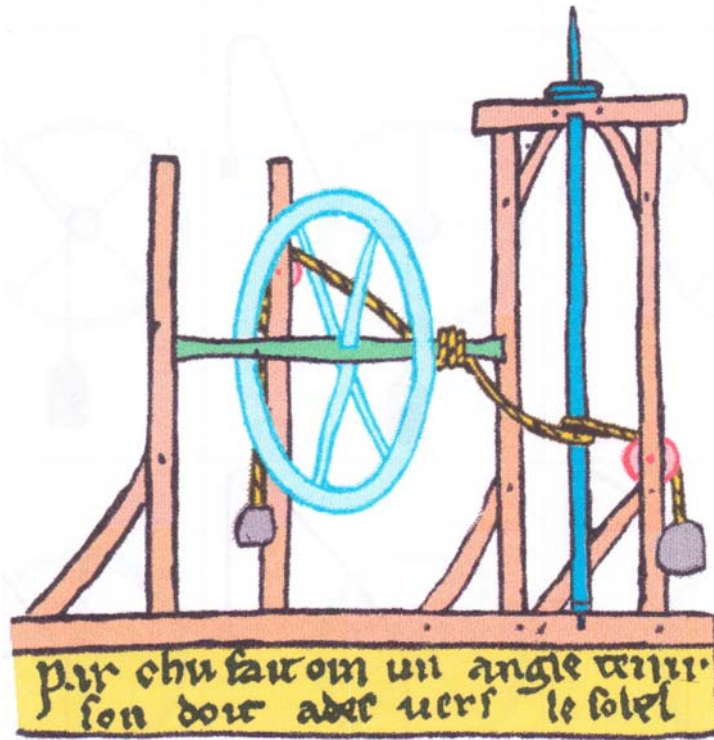
127 Naar Lloyd I, Fig. 382 op p. 649 en Needham IV-2, Fig. 647 t.o.p. 443.

Men had de klok horen luiden maar wist nog niet waar de klepel hing

Vanuit China moet via de zijderoute en via de Arabieren het gerucht zijn doorgedrongen dat er klokken bestonden met een oscillerend mechanisme. Op basis van dit gegeven moet men toen met gebruikmaking van de bestaande kennis en technieken (alle ijzerwerk moest nog met de hand worden gesmeed) aan het experimenteren zijn gegaan.

**Wiel-
echappement
750 jaar**

Het oudste 'echappement' staat beschreven in het *Album* van Villard de Honnecourt uit circa +1250¹²⁸. Een reproductie ervan staat in figuur 20¹²⁹.



Figuur 20. Echappement van Villard de Honnecourt¹²⁹

Onderschrift: 'Par chu fait om un angle tenir son droit ades vers le soleil'
(Op deze manier wijst een engel met zijn vinger naar de zon).

N.B. De genoemde engel zal op de spits van de -hier blauw getekende- as hebben gestaan.

Het essentiële element erin bestaat uit een **wiel** dat een oscillerende beweging krijgt opgedrukt (die vermoedelijk door het **rechter gewicht** wordt onderhouden (zie Figuur 21).

Hoewel het mechanisme niet al te goed (of helemaal niet) zal hebben gewerkt¹³⁰ (vermoedelijk zal het op zijn best een gedempte oscillatie hebben gegeven, terwijl ook de engel zich nogal 'onrustig' zal hebben gedragen), kan het zijn dat het idee van een door het gewicht opgewekte heen-en-weer gaande draaiing van het wiel andere klokkenmakers op de gedachte hebben gebracht dit mechanisme te proberen te koppelen aan het tandwielsysteem van el-Gazari¹³¹.

128 Usher, p. 193.

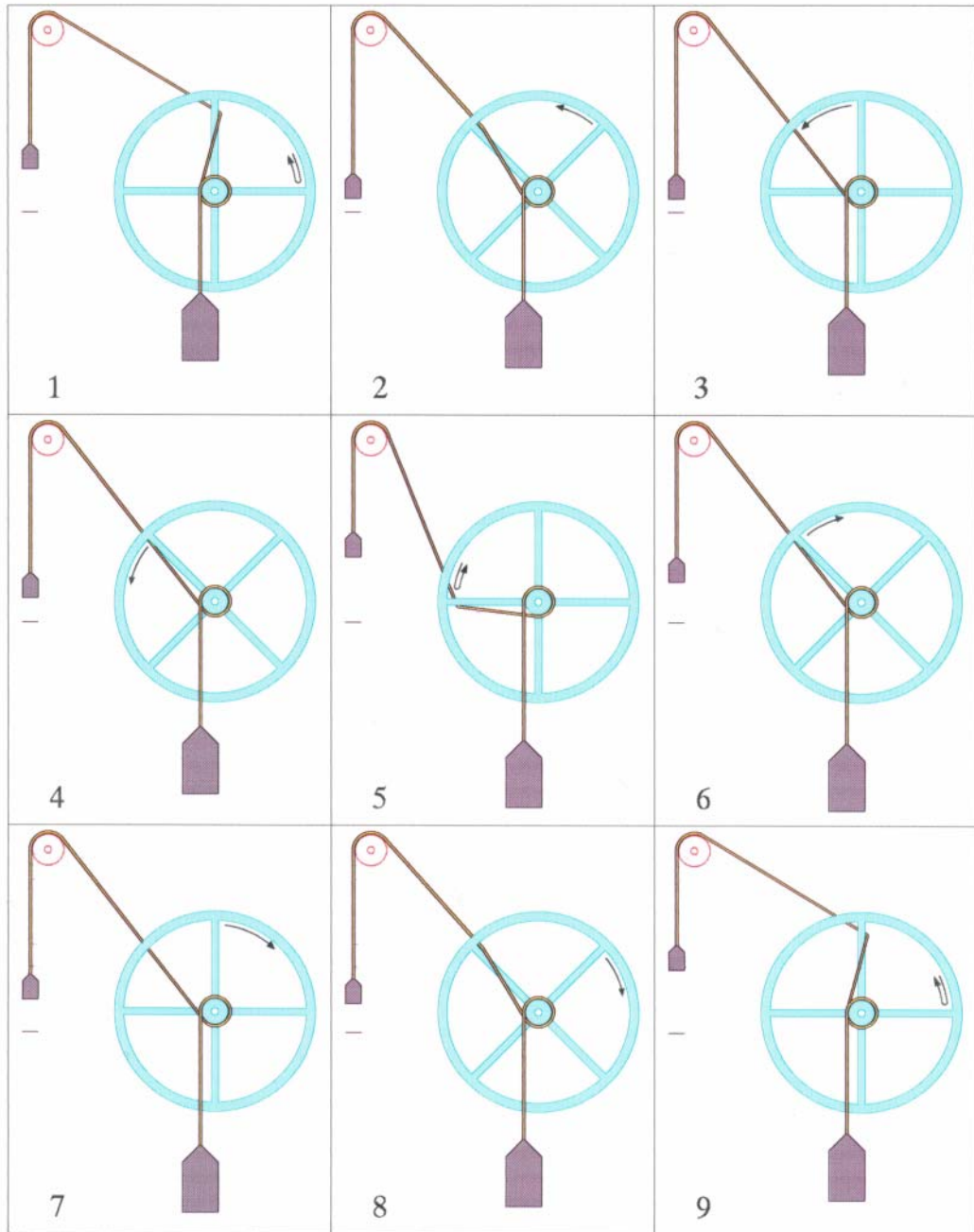
Het originele manuscript bevindt zich in de Bibliothèque National te Parijs: MS. Franc. 19093, fol 23.

129 Kleurbewerking (Usher, figuur 56-1 op p. 193; Janich, figuur 20 op p. 230; Lloyd, I, figuur 383 op p. 649).

130 Mogelijk loont het de moeite een dergelijk systeem te bouwen om te zien hoe het werkt of aan het werk is te krijgen.

Hetzelfde geldt voor Hero's rijdende poppenkast (Fig. 18 op blz. 29).

131 Fig. 17 op blz. 28.



Figuur 21. Echappement van Villard de Honnecourt¹³².
 Uitwerking n.a.v. een analyse van Janich.

Het deel dat om de as waar de 'engel' op komt te staan is gewonden is hier niet getekend. Omdat bij het zakken van het grootste gewicht -de aandrijving- de lengte van dat deel van het **koord** dat om de as van het **wiel** is gewonden afneemt, zal het **gewicht** dat het geheel aandrijft in een deel van het traject (tekeningen 4-6) wat slippen, waarna het weer mee omhoog wordt gewonden (terugslag: tekeningen 7-9). De tekeningen 1-8 geven een periode weer die zich herhaalt in 9 (= 1). Het **kleine gewicht** (linksboven) houdt het boven de as gelegen deel van het **koord** strak en slingert daardoor flink op en neer (let op het daarvoor ter oriëntatie getekende streepje).

¹³² Janich, pp. 230-232 (ook voor een nadere uitleg over de koppels in dit systeem en over het slippen van het koord).

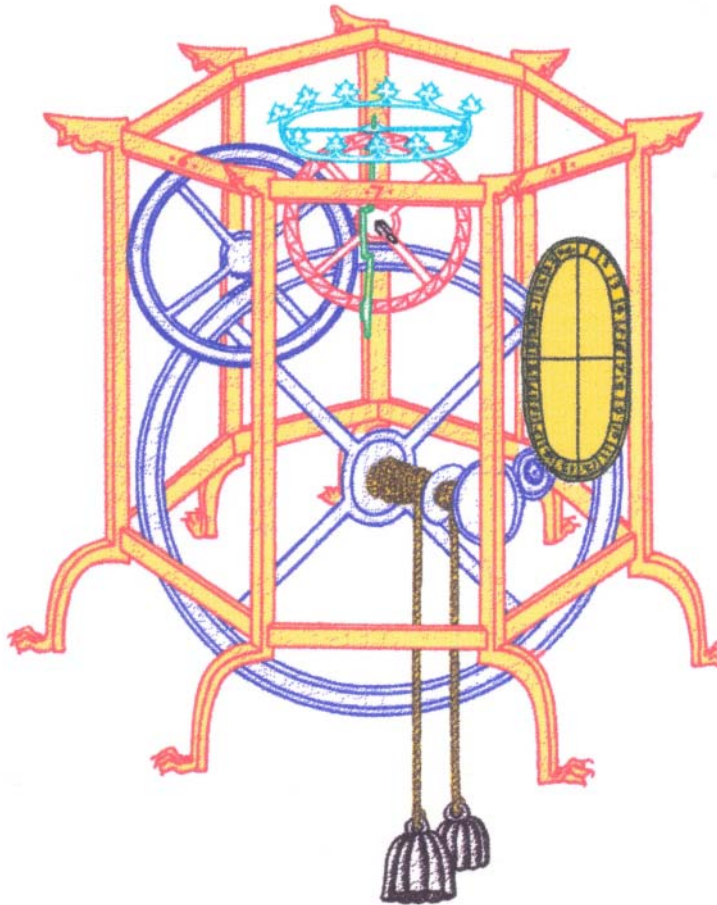
De eerste mechanische klokken: circa 1335

tandwielen, een Griekse erfenis Het tweede aspect dat vanaf de aanvang in de eerste mechanische klokken aanwezig was werd door de tandwielen (tandraderen) gegeven, eveneens een via de Arabieren verkregen Griekse erfenis. Daarom worden deze klokken ook wel *raderuurwerken* genoemd.

ca A.D. 1330 de eerste mechanische klokken ca 670 jaar Omstreeks 1330 kwamen de eerste complete mechanische klokken in bedrijf. Betrouwbare restanten zijn er niet van overgebleven, maar de eerste (incomplete) beschrijving in de vorm van een schets dateert uit 1364 en is van de hand van de klokkenmaker en zoon van een klokkenmaker: Giovanni di Dondi (Figuur 22)¹³³.

gestimuleerd door de religie Deze ontwikkeling werd met name door *de monniken in de kloosters* gestimuleerd. Zij wilden een betere basis hebben om de tijden voor de gebeden vast te kunnen stellen¹³⁴.

de klok van di Dondi 640 jaar



Figuur 22. Dondi's schets van zijn klok¹³⁵

De gewichten (die beide op dezelfde as aangrijpen) drijven twee series **tandwielen** aan. De **ene serie tandwielen** draait eenmaal per 24 uur een **wijzerplaat** rond: de teller van de gemeten tijd. De **tweede serie raderen** drijft de 'valvertrager' (de rem) aan: een echappement met **balanswiel**. Dit gebeurt via het **kroonwiel**, een **tandwiel** dat op **de lepels van de spillegang** inwerkt en zo het vast met de **spillegang** verbonden **balanswiel** heen en weer doet draaien (doet oscilleren).

De bovenste lepel is niet te zien, omdat deze loodrecht op het **kroonwiel** aangrijpt en achter de as van de **spillegang** is verborgen. De **onderste lepel** is vrij en is daardoor zichtbaar (maar is erg smal getekend).

In deze schets zijn van de tandwielen slechts enkele tanden getekend. Het raamwerk is van **koper**.

¹³³ Lloyd I, pp. 653-655 en Fig. 387 op p. 653 en Usher, pp. 198-200 en Fig. 57 op p. 199.

¹³⁴ Spierdijk, pp. 39-43.

¹³⁵ Tevens de eerste astronomische klok. Kleurmodificatie naar Lloyd I, Fig. 387 op p. 653.

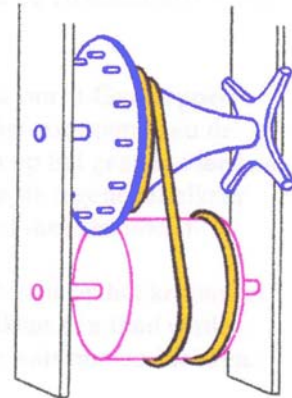
Een alternatieve aandrijving: de veer met snek (fusee)

In 1971 publiceerde Leopold het manuscript plus de vertaling van 'het notitieboek van een klokhersteller' (*het Almanus manuscript*)¹³⁶ uit de jaren ca 1475 - ca 1485, waarin de lekenbroeder Frater Paulus Almanus¹³⁷ dertig verschillende 15^e-eeuwse klokken beschrijft. In deze publicatie ontwierp Leopold reconstructies van de klokken, die hij baseerde op de tekeningen en de beschrijvingen uit het manuscript.

Hieruit blijkt o.a. dat al in de 15^e eeuw een andere vorm van aandrijving van klokken, nl. door middel van een in een trommel geplaatste stijf opgewonden veer heel gewoon was. Deze was ongevoelig voor veranderingen in de richting van de aangrijping door de zwaartekracht. Hoe men op deze gedachte is gekomen is niet bekend, maar het voordeel is evident: zulke klokken konden makkelijker worden verplaatst. De door een gewicht aangedreven klokken moesten doodstil staan en waren daar beslist ongeschikt voor (een probleem waar Huygens zich later intensief mee bezig heeft gehouden¹³⁸).

veertrommel en fusee meer dan 520 jaar oud Het grote nadeel van de veer is echter, dat de erdoor geleverde kracht afneemt naarmate deze verder is afgelopen¹³⁹. Maar men had ook daarvoor al een oplossing gevonden: de fusee (Figuur 23¹⁴⁰)¹³⁶. Het zich om **de veertrommel** windende **koord** was rond **een zich verdikkende aandrijfas -de fusee-** gewonden. Naarmate de veer verder afliep en dus steeds minder sterk aan het koord trok, werd door deze vergroting van de diameter waarop het **koord** aangreep, een constant koppel op en dus een constante ronddraaiing van **de as van de fusee -de aandrijfas** gewaarborgd.

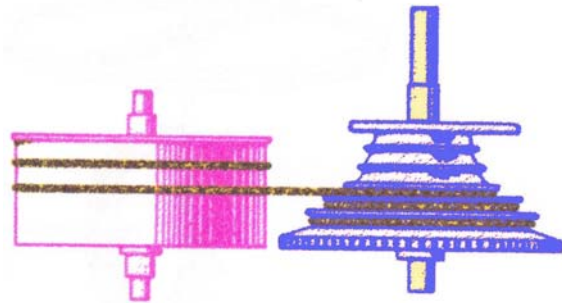
De klok had twee van deze aandrijvingen, één voor echappement en wijzerplaat, de tweede (die hier is geschetst) voor het slagwerk. De (niet zichtbare) **veer in de trommel** werd opgewonden door met behulp van **het kruisvormige handvat** het **koord** weer om de fusee te winden.



Figuur 23. **Veertrommel en fusee** van een klok uit 1477 of eerder

Door de richels¹⁴¹ voor het geleiden van het **koord** kreeg de **fusee** de vorm van een **slakkenhuis**¹⁴² wat de naam snek (dwz slak) verklaart (figuur 24)¹⁴³.

Deze compensatie van een geleidelijk zwakker wordende aangrijping doet denken aan de door de Grieken uitgedachte compensatie van de waterhoogte in het uitstroom- of instroomvat door de clepsydra een exponentieel verlopende vorm te geven: de amfoor¹⁴⁴.



Figuur 24. **Veertrommel en fusee** van een horloge in half afgewonden toestand

136 'The Almanus manuscript', zie Leopold I.

137 Ook Alemannus geschreven (Lloyd I, p. 657).

138 Usher, pp. 310-312.

139 Zie figuur 11 op blz. 19.

140 Kleur-modificatie van dit onderdeel van klok nr 3 uit Leopold I, p. 53.

141 Tussen 1525 en 1540 paste de in Praag levende Zwitser Jacob Zech de fusee toe voor het maken van kleine draagbare klokken, de 'horloges'. Men heeft lang gedacht dat Zech de uitvinder van de snek was, hoewel Lloyd al aangeeft dat de door een veer aangedreven klok veel ouder is en in 1440 al bestond (Lloyd I, p. 656, 657; Lloyd II, p. 31).

142 Exemplaren zijn te zien in het Boerhaave Museum en in het Goud-, Zilver- en Klokkenmuseum.

Een reusachtige vorm drijft een braadspit uit 1640 aan in de keuken van het Muiderslot, gemaakt door Huygens(?)

143 Kleurmodificatie van Fig. 113 op p. 306 in Usher.

144 Zie figuur 11 op blz. 19.

Het echappement

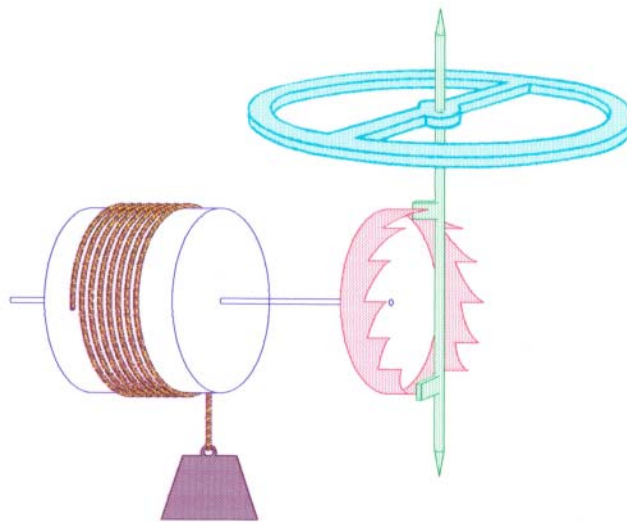
tussen 1276 en 1335 mechanisch echappement ca 700 jaar oud Jammer genoeg is er van de geschiedenis van de ontwikkeling van het eerste echappement verder niets bekend. Het moet tussen 1276 (waarin de trommel-clepsydra van Isaac b. Sid werd beschreven)¹⁴⁵ en 1335 (het jaar waarin de eerste mechanische klokken in bedrijf kwamen) zijn bedacht. Het moet een formidabele denksprong zijn geweest om de eerste uit te denken en te bouwen, omdat het een 'alles-of-niets instrument' is: het moet compleet zijn uitgedacht. Er kunnen geen onderdelen aan ontbreken want dan werkt het niet omdat het een systeem is dat op zichzelf inwerkt.

windvaan Als de windvaan van het slagwerk een eerdere ontwikkeling is geweest, dan kan de waarneming van de terugwerking na het stoppen ervan de uitvinder van het echappement aan het denken hebben gezet¹⁴⁶.

het balanswiel In de hypothetische ontwikkeling van het echappement dat in figuur 25 is geschetst vinden wij het nu horizontaal geplaatste 'vliegwieltje' van Villard de Honnecourt¹⁴⁷, het **balanswiel**, de feitelijke gangregelaar, terug.

kroonwiel en spillegang Vermoedelijk heeft de uitvinder van het echappement de klok van el-Gazari goed bestudeerd¹⁴⁸ (figuur 17). Met name *de opduwende tand van het instroomvat* en de werking van *de pal*, die het afwinden tegengaat. Dit moet hem op het geniale idee van de **spillegang** hebben gebracht: twee tanden (**lepels**) die elk op de tegenover elkaar staande tanden van het door het gewicht aangedreven tandwiel -het **kroonwiel** inwerken. Het **balanswiel** zorgt voor het beurtelings aangrijpen van de **lepels** op het **kroonwiel**. Per volledige oscillatie (heen en weer) loopt het **kroonwiel** telkens één tand verder rond. Deze oscillatie is sinusvormig, geen zaagtand zoals in de watermolenklokken.

Een parallelle ontwikkeling, de ananasgang¹⁴⁹, heeft zich niet doorgezet en blijft daarom verder buiten beschouwing.



Figuur 25. Basisstructuur van het echappement
Verklaring in de tekst.

Om de tekening niet te ingewikkeld te maken is de tussen **trommel** en **kroonwiel** gelegen tandwieloverbrenging weggelaten.

145 Fig. 19 op blz. 30.

146 Mondelinge suggestie van Kees Grimbergen.

147 Fig. 20 op blz. 31.

148 Fig. 17 op blz. 28.

149 Richard van Wallingford, 2^e helft 14e eeuw. Zie Turner e.a., p. 97.

De eerste mechanische oscillator 660 jaar Het gewicht, dat met een **koord** om de **trommel** is gewonden, duwt via een hier niet getekende reeks tandwielen, waarvan het laatste (wél getekend) het **kroonwiel** (**kroonrad**) is, beurtelings een **lepel** van de **spillegang** aan. Omdat daardoor de roterende beweging van het **balanswiel** eerst wordt afgeremd en vervolgens in een rotatie in tegengestelde richting verandert, houdt dit in dat de val omlaag van het gewicht wordt afgeremd en -gemiddeld- in een eenparige beweging omlaag wordt omgezet. Het **balanswiel** slingert daardoor heen en weer.

fout: 20 min per dag De periode van deze oscillatie hangt af van de aandrijving (gewicht en trommelstraal), van de straal van het **kroonrad**, van de straal en de massa van het **balanswiel**, van de temperatuur (waardoor het balanswiel in diameter varieert) en van de wrijving in het systeem. De fout was daardoor behoorlijk groot, gemiddeld zo'n 20 *minuten per dag*.

In termen van systemen kun je het hele stelsel van aandrijving, overbrenging en gangregelaar beschouwen als een teruggekoppeld systeem met een via het balanswiel ingebouwde vertraging, waardoor het oscilleert.

Dit apparaat is in feite de eerste *geheel mechanische oscillator*.

Tot deze tijd waren alleen door waterkracht aangedreven oscillatoren bekend, zoals het echappement van I-Hsing¹⁵¹, maar ook simpeler vormen zoals de zichzelf onder een waterstraal steeds legende emmer.

Verandering van de oscillatiefrequentie (een speculatieve paragraaf)

seizoen-variantie van de lengte van dag en nacht Vermoedelijk zal er tijdens de beginstadiën van de uitvinding van de gangregelaar een heel snelle ontwikkeling hebben plaatsgevonden (blz. 37, Figuur 26 A-B-C), omdat de klokken de gebedstijden moesten luiden en dus gebonden waren aan de seizoensvariantie van de lengten van de dag en de nacht.

Klokken met een simpel balanswiel (Figuur 25) konden hier niet voor worden gebruikt.

Gegevens uit het manuscript van Almanus¹⁵² completeren de informatie over de verschillende stadia ontwikkeling van de balans, omdat hierin een balanswiel *met groeven voor gewichtjes* staat weergegeven (Figuur 26 B).

Door gewichtjes over het balanswiel te verplaatsen varieerde men de ingebouwde vertraging in het teruggekoppelde systeem (al dacht men toen uiteraard nog niet in deze termen). De daarmee samenhangende oscillatiefrequentie werd dus op deze manier aangepast. Deze neemt af wanneer de gewichtjes naar buiten worden verplaatst, en toe door ze meer naar de as toe op te hangen.

De staaftalans (Figuur 26 C) zal vermoedelijk -uit praktische overwegingen uit type B zijn gevolgd, omdat de gewichten beter bereikbaar waren. Zo konden o.a. de overdag de in het voorjaar langer wordende 'uren' worden ingesteld.

Alles bij elkaar genomen heeft er zich in de eerste helft van de 14e eeuw een haast onvoorstelbare technische ontwikkeling afgespeeld.

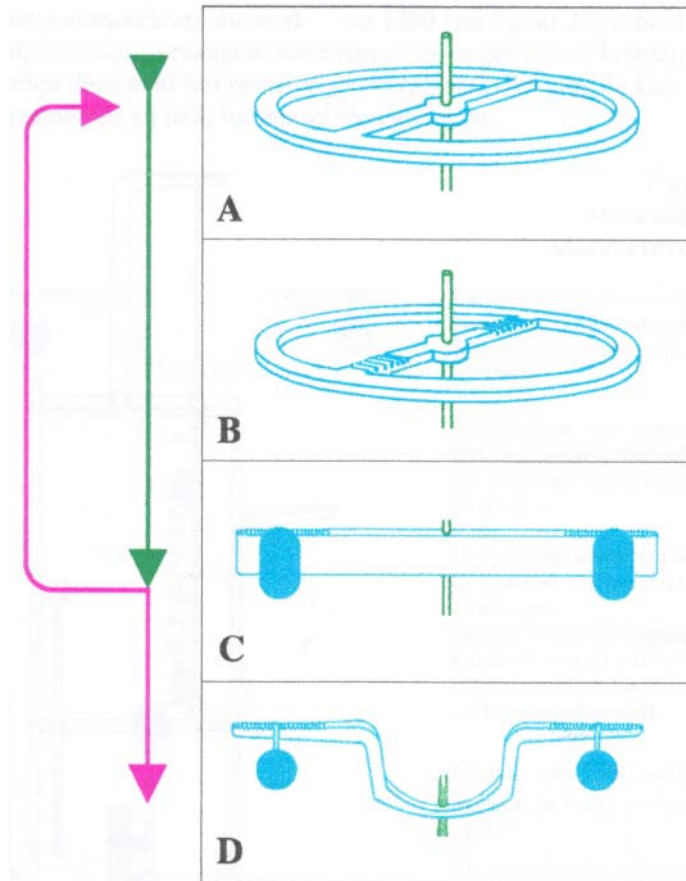
150 Het traagheidsmoment: massa * straal².

151 Fig. 16 op blz. 27.

152 Zie: Leopold: The Almanus Manuscript

Voor astronomische waarnemingen van bvb meridiaandoorgangen zal het gebruik van variabele uren tijdens de dag en de nacht een bezwaar zijn geweest. Op den duur zullen klokken met een 'gefixeerde' oscillatiefrequentie (Figuur 26 type A) zijn verkozen, te vergelijken met die van het type D, waarbij de gewichten dan een andere functie moeten hebben gekregen: zij zullen voor de bijstelling van de oscillatiefrequentie zijn gebruikt, om de nauwkeurigheid van de klokken op te voeren.

van
balanswiel
tot waag
en (o.a.)
terug¹⁵⁶



Figuur 26.
Ontwikkeling van de balans

Van de spilgang zelf is alleen het bovenste deel, de verbinding met de balans, getekend. Achtereenvolgens zijn geschetst: A. het wiel van klok 1 in Almanus¹⁵³, B. het wiel van klok 2 in Almanus¹⁵⁴ met groeven voor de gewichtjes, C. de rechte waag met gewichten (die in sommige torenklokken, nog is te vinden) en tenslotte D. de gebogen vorm met de gewichtjes¹⁵⁵ (Fig. 27).

De pijlen links van de tekening geven de gesuggereerde ontwikkelingsgang van de balans weer, die gezien de verschillende eisen die er in de loop van de tijd aan werden gesteld een nogal gecompliceerd verloop moet hebben gehad¹⁵⁶:

De **groene pijlen** duiden de -mogelijke- snelle vroege ontwikkeling aan, die **in magenta** de -eventuele- latere, op de nauwkeurigheid van de klokken betrekking hebbende, ontwikkelingen.

153 Naar de tekening van Leopold op p. 34.

154 Naar de tekening van Leopold op p. 46.

155 Zie Fig. 26 op blz. 37 (naar de tekening van Lloyd, Fig. 384 op p. 650).

156 Di Dondi's klok beeldde niet alleen de tijd uit, maar vormde een soort 'planetarium avant la lettre'.

Het door hem gebruikte balanswiel is vermoedelijk een 'verdere ontwikkeling die op de vroege ontwikkeling teruggreep'.

De klassieke gangregelaar: circa 1335 - circa 1675

**gang-
regelaar:**

Omdat de periode van de klassieke gangregelaar van veel factoren afhangt¹⁵⁷ (blz. 36) varieerde de oscillatiefrequentie beduidend.

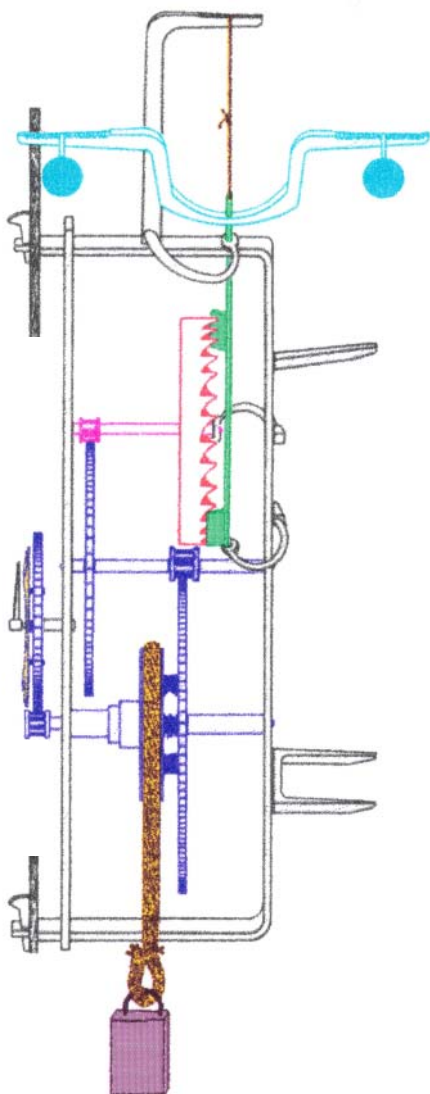
**fout:
20 min
per dag**

Deze klokken waren daardoor nog heel onnauwkeurig (met een *gemiddelde fout van circa 20 minuten per dag*¹⁵⁸) en moesten telkens op basis van astronomische metingen worden bijgesteld.

**A.D. 1380:
foliot
620 jaar**

Klokken met een balanswiel konden moeilijk worden bijgesteld. In het torenwachtersuurwerk¹⁵⁹ uit 1380 is een verdere ontwikkeling (zie figuur 27) van de balans te vinden, waarmee bijregeling wel mogelijk is (figuur 26).

Het balanswiel is door **een staaf, de foliot**, vervangen, waarover **twee gewichtjes** konden worden verschoven. Werden deze naar het centrum toe verplaatst, dan ging de klok sneller lopen, en langzamer als zij naar buiten werden gebracht.



Figuur 26.
Mechanische klok¹⁶⁰
Meest eenvoudige vorm¹⁶¹.

De vorm van de **balans-staaf (waag of foliot)** genoemd, is hier wat verfijnd, maar het principe is in wezen gelijk aan dat van de klok uit 1380.

Spillegang en **foliot** zijn met een **draad** aan een arm opgehangen, waardoor een fijne afstelling van de greep van de **lepels** op het **kroonwiel** mogelijk is.

Het **aandrijfgewicht** oefent via een **koord** kracht uit op de **trommel**, van waaruit twee stelen **tandwielen** ontspringen. **Eén stel** drijft de **wijzerplaat** aan, **het tweede stel** dient voor de activering van het echappement en dus voor het gelijkmatig zakken van het gewicht.

Omstreeks 1380 verdeelde men het etmaal in twee perioden van 12 uur elk¹⁶². De draaiende wijzerplaat is in de klok van 1380 dan ook een 12-uurs plaat geworden, die per etmaal 2 keer rond draait. De uurwijzer is gefixeerd.

Het is mogelijk dat men in het begin 2 keer per dag de gewichtjes verstelde om zo de van het seizoen afhankelijke ongelijke lengten van de uren van de dag vergeleken met die van de nacht in te stellen.

Een minutenwijzer ontbreekt nog, omdat de klok nog niet nauwkeurig genoeg was om de tijd tot op de minuut nauwkeurig aan te geven.

157 Blz. 36.

158 Needham III, p. 329.

159 Spierdijk, plaat 1 tegenover p. 256.

160 Kleurmodificatie van een tekening van Lloyd I, Fig. 384 op p. 650, 15e eeuw, maar gelijk aan dat van vroegere klokken.

161 Werkende exemplaren zijn te bezichtigen in het Zaanse Uurwerkmuseum en het Goud-, Zilver- en Klokkenmuseum.

162 Spierdijk, p. 68.

Nauwkeurigheid

smeedwerk Omdat de klokken toen nog werden gesmeed, lag het voor de hand dat sommige smeden zich in het maken van uurwerken gingen specialiseren.

16e eeuw: Het gebruik van de mechanische klok in wetenschappelijk onderzoek (de astronomie) begon incidenteel. De reden was dat de nauwkeurigheid van deze klokken nog veel te wensen overliet. Maar het eerste gebruik ervan schijnt reeds in 1484 het geval te zijn geweest¹⁶³.
fout: Men schijnt met name in Duitsland, in Neurenberg, reeds in de 15e eeuw zulke mechanisch goede klokken te hebben gemaakt, dat die zelfs van *minuten- en secondenwijzers* waren voorzien¹⁶⁴. Maar mogelijk was hier de wens de vader van de gedachte, want in het laatste kwart van de 16^e eeuw stelde de astronoom Tycho Brahe dat de klokken nog niet nauwkeurig genoeg waren voor wetenschappelijk gebruik, omdat *een fout van 4 seconden gedurende enkele uren* een te groot verschil maakte om de positie van een ster vast te kunnen leggen¹⁶⁵.
ca 30 s per dag

Intermezzo 4: Overgang naar de huidige tijdrekening gedurende de dag

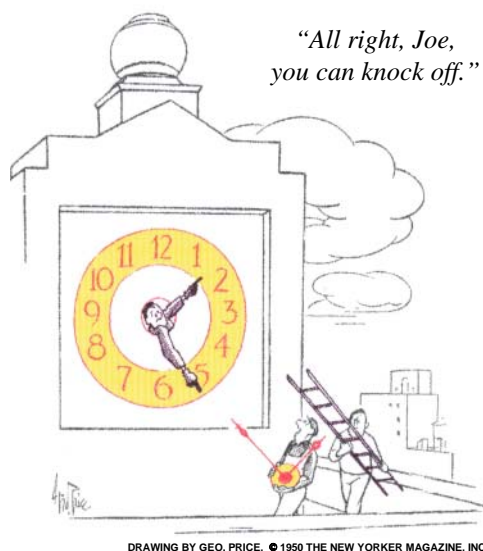
In kloosters en kerktorens werden op bevel van Paus Sabinus vanaf het begin van de 7^e eeuw¹⁶⁶ klokken (reusachtige bellen) ingebouwd om de 'getijden' voor de gebeden te doen slaan. Het door de klokkenluider met de hand luiden van de grote torenklokken is een gewoonte die zich tot de dag van vandaag heeft gehandhaafd, zij het in afnemende mate.

eind 14e en begin 15e eeuw: Karel V van Frankrijk (1337-1380) gaf de stoot tot de doorbraak van de kerkelijke praktijk¹⁶⁷ met seizoensafhankelijke uren van wisselende duur door de burgerlijke met uren van vaste duur.

van ongelijke naar gelijke uren Na de installatie van een mechanisch uurwerk met slagwerk in het paleis te Parijs in 1378¹⁶⁸ en ook in zijn kasteel te Vincennes verordonneerde hij dat alle kerken in Parijs en Vincennes de uren en de kwartieren moesten luiden zoals zijn klokken die aangaven¹⁶⁹.

Deze gewoonte verspreidde zich vervolgens over heel Noord Europa¹⁷⁰.

Het systeem van de ongelijke uren werd in de loop van de 14^e eeuw onder invloed van dit klokgelui langzaam vervangen. Eerst door een 24-uurs systeem beginnend met zonsopgang; later, in de 15^e eeuw, door het heden ook gebruikte systeem van 2 keer 12 uur, eindigend op en tellend vanaf middernacht en vanaf 12 uur 's middags¹⁷¹.



163 Usher, p. 209.

164 Usher, p. 209. Jo(b)st Bürgi (Burgi, Byrgius) gebruikte voor deze klokken twee tegen elkaar in bewegende foliots, zie Lloyd I, p. 662.

165 Usher, pp. 209-210.

166 Spierdijk, p. 41. Men leze pp. 39-43 voor de motivatie voor en de uitwerking van de religieuze tijdsaanduidingen (de 'getijden').

167 Zie blz. 32.

168 Usher, pp. 201 en 208. Het zg. torenuurwerk van Vick.

169 Usher, pp. 208-209.

170 De (hier ingekleurde) cartoon is afkomstig uit Jacobs, p. 573.

171 Usher, p. 209. In sommige Afrikaanse landen wordt de telling van de uren te beginnen met zonsopgang en met zonsondergang nog gehanteerd, zoals bv. in Tanzania (Goldschmidt, pp. 49-50).

Intermezzo 5: populariteit → liepen de klokken onregelmatig?

*de eerste
horloges
500 jaar*

Klokken begonnen populair te worden en verschenen in de huiskamers van de zeer rijken. Dus kwam ook de wens naar draagbare klokken -horloges- op (analoog aan de vraag naar de veel gebruikte draagbare zonnewijzers).

De trommelveer-plus-fusee vormde met name voor verplaatsbare klokken en voor de kleinere draagbare horloges een ideale aandrijving.

De allereerste horloges waren groot e. eivormig en hadden ook een balans-echappement (vergelijkbaar met dat van figuur 27 D). Vanwege de wisselende aangrijping van de zwaartekracht waren de gewichtjes stevig op de staafbalans vastgeschroefd.

Omdat het horloge bewoog, was dit door de in richting wisselende aangrijping van de zwaartekracht op de balans toch veel minder nauwkeurig dan de vast opgestelde slingerklok. De eerste horloges waren net zo onnauwkeurig als de waterklokken¹⁷².

*men dacht
dat de
klokken
onregelmatig
liepen!*

Toen de mechanische klokken algemeen begonnen te worden viel het publiek iets bijzonders op in de vergelijking van de kloktijd met de tijd die men gewoon was van de zonnewijzers af te lezen. *Men dacht*

*dat de mechanische klokken onregelmatig liepen! Dat hun gedrag grillig was*¹⁷³.

De astronomen kenden dit verschil in tijdsgedrag -de tijdvereffening of equatie- uiteraard al lang.

Het verschil, tussen het gedrag van de zonnedag en de over het jaar gemiddelde zonnedag (of middelbare dag, de 'klokkendag') -de vereffening- berust op de ongelijkmatige omloopsnelheid van de aarde rond de zon en op het niet samenvallen van de equator en de ecliptica (de baan van de aarde rond de zon), veroorzaakt door de scheve stand van de aardas en op de ongelijkmatige omloopsnelheid van de aarde om de zon.

Dat de klokken minder regelmatig leken te lopen was natuurlijk schijn, maar het duidt erop hoe men aan een bepaald systeem gewend was geraakt. Zelfs zo dat wat minder regelmatig is -de door de zonnewijzer van dag op dag aangegeven tijd- regelmatig lijkt en dat wat meer regelmatig is -het lopen van de mechanische klok- dan onregelmatig lijkt.

Men bouwde toen zelfs klokken die beide soorten tijd (zonnedag-tijd en klokkedag-tijd) aangaven!

Voor de hedendaagse mens speelt dit niet meer. Wij zijn sindsdien aan klok-uren die een vaste duur hebben gewend geraakt. Wij zijn niet meer ingesteld op de wisselende duur van het uur die in vroeger eeuwen aan het gedrag van de zon en daardoor aan de zonnewijzer was gekoppeld.

¹⁷² Usher, p. 308.

¹⁷³ Lloyd II, p. 80.

De 17e eeuw: uitvinding van de slingerklok: Galilei en Huygens

Leonardo da Vinci: de slinger 16e eeuw

De geschiedenis van de slinger begint met Leonardo da Vinci en de Italiaanse ingenieurs van de 16e eeuw. Zij gebruikten de slinger als een handig hulpmiddel om pompen in een heen-en-weer gaande beweging te houden¹⁷⁴.

De toepassing van de slinger in de klok is aan Galilei en aan Christiaan Huygens te danken.

Galilei: de slinger-oscillatie 360 jaar

Galilei begon in 1583 met de studie van de slinger. Men zegt¹⁷⁵ dat hij het principe ervan in 1581 ontdekte toen hij de slingerende beweging van de lampen in de kathedraal van Pisa waarnam. Hij mat de slingerperiode ervan met behulp van zijn polsslag(!). Naderhand bevestigde hij experimenteel dat de oscillatieperiode voor een gegeven slinger constant is en (maar dit bleek niet juist te zijn) niet afhangt van de amplitude (de grootte van de uitslag) van de oscillatie. Daarmee had hij het verschijnsel van de isochroniciteit van de slinger ontdekt.

Hoewel hij op latere leeftijd het idee kreeg de slinger een klok aan te laten drijven, en hiervoor uiteindelijk een bijzonder fraai ontwerp ontwikkelde, heeft zijn klok als zodanig weinig of geen invloed op de verdere ontwikkeling ervan gehad (Appendix: de klok van Galilei). De ontwikkeling van de slingerklok is aan Christiaan Huygens te danken.

De fundamentele aard van de slinger

Met de slingerklok van Huygens (Figuur 28) en diens theoretisch onderzoek naar het gedrag van de slinger begon een volslagen nieuwe ontwikkeling van de klok en van de tijdmeting.

Tot nu toe hadden water, gewicht of veer de klok zowel aangedreven als de oscillatie ervan verzorgd. Het water, het gewicht of de veer speelden hier zelf een belangrijke rol in. Daarbij was het de vraag de aandrijving zo gelijkmatig mogelijk te laten verlopen.

het raderuurwerk: niet zo nauwkeurig

De oscillaties van de ananasgang, de spillegang en de foliot werden door het complete systeem van aandrijving en gangregelaar gegenereerd. Het echappement speelde hierin door de terugwerking de rol van de rem op het zakken van het gewicht. Daardoor zorgde het voor het min of meer gelijkmatig lopen van de klok. Min of meer, omdat de periode van de oscillaties door veel factoren die door het hele systeem verspreid lagen werden beïnvloed.

de slinger: gelijkmatig oscilleren

De slinger vormt daarentegen een zelfstandig oscillerend systeem. De slinger is een oscillator. De slingeringen ervan worden uitsluitend door de eigenschappen van de slinger bepaald en het is nu de slinger die de loop van de klok bepaalt.

De rol van **de aandrijving** is daardoor teruggebracht tot de essentie ervan:

- het in stand houden van het oscillerende proces dat anders door de demping in het oscillerende systeem langzaam tot nul terug zou lopen,
- en het overwinnen van de wrijvingen in het loopwerk van de klok.

Daarbij werd het oscillerende proces van de slinger echter wel ongunstig door de aandrijving via het echappement beïnvloed. Om deze ongunstige invloed te verminderen waren nieuwe ontwikkelingen nodig. Hoewel die ontwikkelingen achteraf al in het echappement van de klok van Galilei terug zijn te vinden (Appendix), werden die pas later ontdekt. Dat kwam omdat deze klok niet af werd gebouwd en er dus geen praktische ervaring mee kon worden opgedaan.

¹⁷⁴ Usher, p. 310.

¹⁷⁵ Lloyd I, p. 662.

Christiaan Huygens en de slingerklok

A.D. 1656
Horologium

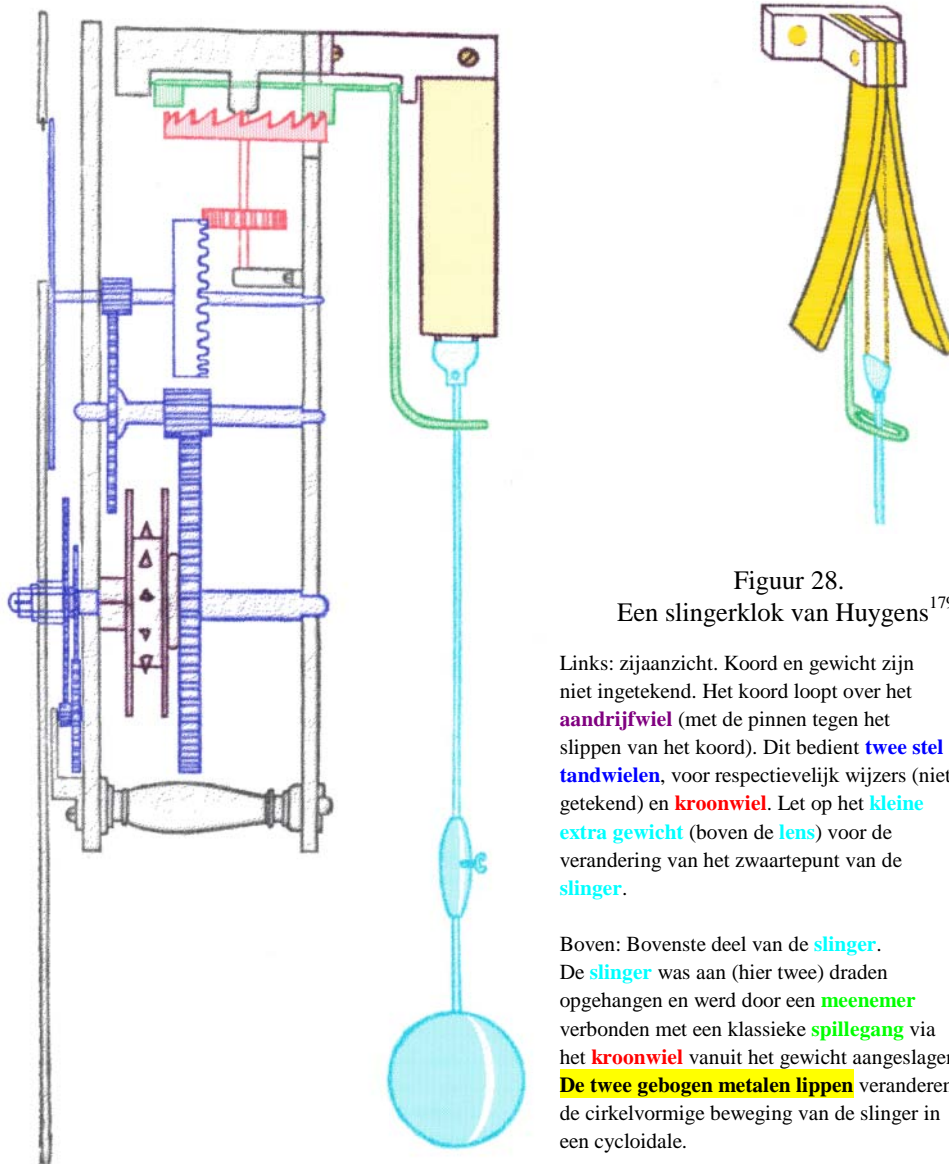
In 1656 begon Huygens met zijn onderzoek van de slinger en het ontwerp van de slingerklok¹⁷⁶. In 1658 verscheen al zijn eerste publicatie: Horologium¹⁷⁷. Huygens kende het principe van de *isochroniciteit* al

Slingerklok
340 jaar

het feit dat de periode T van een slinger constant is en uitsluitend door de zwaartekracht g en door de lengte l ervan wordt bepaald: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$. De slinger slingert langzamer naarmate hij langer is. De massa m ervan speelt als zodanig geen

rol, maar de slingerlengte wordt bepaald door het aangrijpingspunt ervan (het zwaartepunt). De hoek α waarover de slinger slingert zou geen rol spelen. en zal dit direct of indirect van Galilei hebben vernomen.

In zijn studies ontdekte Huygens echter dat de slinger niet isochroon is, maar dat de slingerfrequentie toeneemt naarmate de amplitude α kleiner wordt¹⁷⁸. Alleen bij hele kleine



Figuur 28.
Een slingerklok van Huygens¹⁷⁹.

Links: zijaanzicht. Koord en gewicht zijn niet ingetekend. Het koord loopt over het **aandrijf wiel** (met de pinnen tegen het slippen van het koord). Dit bedient **twee stel tandwielen**, voor respectievelijk wijzers (niet getekend) en **kroonwiel**. Let op het **kleine extra gewicht** (boven de **lens**) voor de verandering van het zwaartepunt van de **slinger**.

Boven: Bovenste deel van de **slinger**. De **slinger** was aan (hier twee) draden opgehangen en werd door een **meenemer** verbonden met een klassieke **spillegang** via het **kroonwiel** vanuit het gewicht aangeslagen. **De twee gebogen metalen lippen** veranderen de cirkelvormige beweging van de slinger in een cycloidale.

176 Lloyd I, pp. 662-664.

177 Boek en aantekeningen zijn in het Boerhaave Museum tentoongesteld.

178 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3.5}{2.4.6}\right)^2 \sin^6 \frac{\alpha}{2} + \dots \right\}$ waarin α de hoek t.o.v. de verticaal is (Van Veen, p. 358-360).

179 Kleurbewerking en -modificatie van Fig. 403 op p. 664 in Lloyd I, naar Huygens ontwerp in zijn *Horologium Oscillatorium*.

Huygens besteedde veel werk aan het ontwerpen van slingerklokken (figuur 28) en aan een mechanisme om de isochroniciteit te bevorderen. Op 1 december 1659¹⁸⁰ ontdekte Huygens dat een slinger langs een cycloïde wél isochroon is. Hij ontwierp vervolgens **compensatiebogen** (figuur 28, rechts) om de slinger te dwingen geen cirkel maar een cycloïde-boog te beschrijven¹⁸⁰.

Een cycloïde is de boog die wordt beschreven door een punt op de omtrek van een cirkel die over een andere cirkel rolt.

A.D. 1673

Horologium oscillatorium Hij publiceerde zijn resultaten in 1673 in zijn hoofdwerk over de slingerklok: *Horologium oscillatorium*.

**circa 1660
minuten-
wijzer
340 jaar**

De Haagse klokkenmaker Salomon da Coster bouwde de eerste klokken volgens Huygens' ontwerp, inclusief de cycloïdale boogjes. Deze klokken waren de eerste slingerklokken (pendules) die op de markt kwamen. Zij hadden standaard¹⁸¹ en uren en minutenwijzer¹⁸² en, vanaf ca. 1670, soms ook een secondewijzer. Meestal waren zij door een trommelveer aangedreven¹⁸³.

**eigen
oscillatie-
frequentie**

Met de introductie van de klok-slinger door Galilei en de slingerklok door Huygens werd voor het eerst in de geschiedenis voor de gangregelaar een zelfstandig oscillerend systeem dat een *eigen oscillatiefrequentie* vertoonde ingevoerd. Hoewel de eerste slingerklokken om mechanisch-constructieve redenen nog niet erg nauwkeurig waren vormde deze uitvinding de basis voor de ontwikkeling van nauwkeurig lopende klokken in de daarop volgende drie eeuwen.

**fout:
10 s
per dag**

Er werd tenslotte *een nauwkeurigheid van ca. 10 seconden per dag* mee bereikt¹⁸⁴. Daarmee waren zij ruim 100 keer nauwkeuriger dan het beste raderuurwerk uit die tijd.

**kleine
slinger
uitslag**

De slingers hadden een uitslag van 20 tot 24 graden. Daarmee weken zij ondanks Huygens cycloïde begrenzers toch significant van de vorm van de cycloïde af¹⁸⁵. Maar Huygens had ook al gesteld dat de slinger niet significant van de isochrone cycloïde afwijkt wanneer de uitslag ervan heel klein wordt gehouden¹⁸⁶. Die gevolgtrekking voerde anderen in later jaren tot technische ontwikkelingen die de nauwkeurigheid van de pendules sterk opvoerden.

**terug-
koppeling**

Om de periodiciteit van de slingerklok te verbeteren ontwierp Huygens allerlei verschillende klokken. Daar waren ook klokken bij waarvan de slingerperiode door middel van een totaal ander soort gangregelaar, gebaseerd op het principe van een tegenkoppeling (zelfregulering, negatieve terugkoppeling), fijner werd bijgesteld^{187,188}.

Historisch behoren deze tegengekoppelde klokken tot de eerste voorbeelden van de toepassing van het principe van de tegenkoppeling na de Griekse uitvinding van de tegengekoppelde waterklok (blz. 20). Zij dateren van vóór James Watt's uitvinding van de centrifugaalregelaar, maar ná de thermostaat van Cornelis Drebbel (die Huygens in 1621 had leren kennen!)¹⁸⁹.

Het principe van de tegenkoppeling zou echter pas in de 20^e eeuw systematisch in klokken worden toegepast¹⁹⁰.

180 Huygens' aantekeningen hierover zijn in het Boerhaave Museum tentoongesteld.

181 Incidenteel kwam een minutenwijzer misschien al vanaf 1550 voor (Lloyd, II, p. 43). 182 Lloyd, I, p. 658.

183 Exemplaren zijn te bezichtigen in het Boerhaave Museum en in het Zaans Uurwerkenmuseum.

184 Needham III, p. 329.

185 Usher, p. 312.

186 Usher, p. 312.

187 Fraaie reconstructies van deze tegengekoppelde uurwerken zijn in het Boerhaave Museum aanwezig.

188 Huygens' schets van dit mechanisme is eveneens in het Boerhaave Museum tentoongesteld.

189 Morpurgo, p. 35.

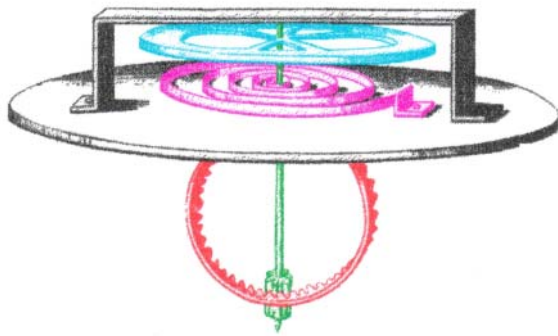
190 Zie blz. 49-54.

Christiaan Huygens en de plaatsbepaling op zee

Hoewel Huygens vele ontwerpen maakte voor het gebruik van de slingerklok op zee (om de longitude te kunnen bepalen)¹⁹¹, slaagde hij er niet in een voor de gewone dagelijkse praktijk op zee voldoende nauwkeurige klok te laten maken. Dit lag ten dele ook aan het feit dat men de onderdelen nog niet nauwkeurig genoeg kon maken, zodat er erg veel verliezen optraden, o.a. door frictie.

Maar tenminste één klok was toch in elk geval zo goed dat Huygens op basis van de waarnemingen die ermee waren gedaan in 1674 tot de conclusie kwam dat de zwaartekracht over de wereld ongelijk is verdeeld! Hij trok hier de conclusie uit dat het door de wisseling van de zwaartekracht in principe niet mogelijk is een slingerklok voor dit doel te gebruiken.

Om ook op zee de tijd te kunnen bepalen ontwierp Huygens rond 1674 daarom *een geheel ander type* gangregelaar: een via een **kroonwiel** aangedreven **balanswiel+veer** oscillator¹⁹² voor het gebruik in horloges op zee (Figuur 29)¹⁹³.



Figuur 29.
Balansveer van Huygens

Van dit systeem wordt de periode van de oscillatie door de massa-traagheid van het **balanswiel** en de veerconstante van de **spiraalveer** bepaald.

Onafhankelijk van hem en elkaar ontwierpen Hooke in Engeland (rond A.D. 1660) (misschien), en Hautefeuille in Frankrijk (rond A.D. 1670) eveneens een dergelijk systeem¹⁹⁴. In Huygens' ontwerp maakte het balanswiel (de 'onrust') verschillende omwentelingen per periode, terwijl die van Hooke een kortere slag had (120 graden).

Deze ontwerpen lagen ten grondslag aan de verdere ontwikkeling van de mechanische horloges. Deze ontwikkeling valt buiten het kader van deze monografie en wordt daarom buiten beschouwing gelaten.

191 Usher, pp. 322-326.

192 Huygens' onrust plus veer -het enige overgebleven exemplaar- is in het Boerhaave Museum te bezichtigen, als onderdeel van het Huygens Planetarium.

193 Kleurbewerking van Fig. 406 op p. 666 in Lloyd I.

194 Usher, pp. 322-326.

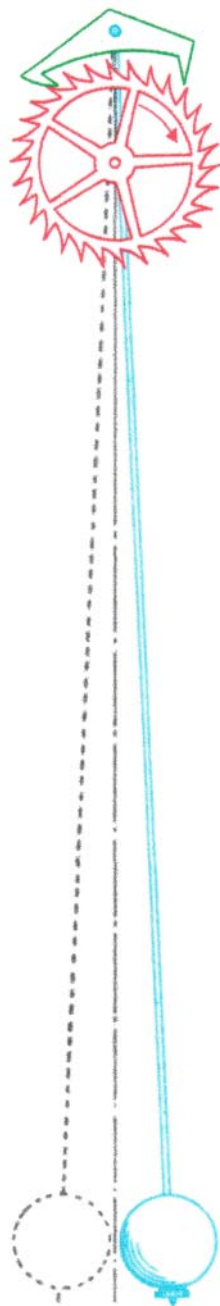
Eind 17^e - begin 18^e eeuw: de anker gang

slinger- problemen

Huygens werk legde de theoretische basis voor de verdere ontwikkeling van de klok¹⁹⁵. Hij gaf tevens aan op welke gebieden de problemen lagen. Zo gaf hij aan, dat een korte slingeruitslag voldoende was om isochroniciteit te garanderen.

Ook waren de lange **slingers** van een grote **massa** voorzien, waardoor er een aanzienlijke kracht nodig was om ze in beweging te houden. Veranderingen in temperatuur veroorzaakten bovendien veranderingen in de periode-duur door de bijbehorende veranderingen in de slingerlengte. Tenslotte was er de grote wrijving tussen de tandwielen onderling en in de lagers, hetgeen verergerd werd door de **massa van de slinger en die van het gewicht** dat de klok aandreef. De technische ontwikkelingen waren echter nog niet ver genoeg gevorderd om deze problemen, al de baas te kunnen¹⁹⁶.

*A.D.1671
de
ankergang
330 jaar*



Om een **slinger** over een korte uitslag te kunnen laten werken was toen¹⁹⁷ een nieuwe ontwikkeling van het echappement nodig.

Rond 1670¹⁹⁸ ontwikkelde Clement daarvoor het anker-echappement (de anker gang; Figuur 30)¹⁹⁹.

Hij verving de loodrecht op het **kroonwiel** staande tanden door tanden die in het vlak van het wiel lagen. Dit rad wordt nu het '**ankerrad**' genoemd. De spillegang kon hierdoor vervallen en werd vervangen door een **anker** dat in het vlak van het **kroonwiel** op de tanden ervan inwerkte, en dat vast aan de draaiingsas van de slinger was verbonden.

Deze uitvinding transformeerde de pendule van een gewicht dat aan koorden tussen boogjes²⁰⁰ (of een stijve veer) hing, in een van een gewicht voorziene stijve stang. In feite was Galilei (Appendix) reeds op deze ontwikkeling vooruitgelopen.

*eind 17e eeuw:
secondewijzer
300 jaar
fout:
1 s
per dag(?)*

Door de ontwikkeling van de anker gang werd het eenvoudiger de seconden door de klok aan te laten duiden. Ofschoon men dit reeds vanaf 1550 trachtte te doen, kwamen de *secondeslinger* (met een periode van precies één seconde) en de *secondewijzer* eerst nu in zwang²⁰¹. De reden was dat de vroegere klokken niet nauwkeurig genoeg liepen en het geen zin had een secondewijzer te gebruiken.

De anker gang (ook 'hakengang' genoemd) wordt tot de dag van vandaag gebruikt. Dit eerste type vertoont het nadeel dat er terugwerking in optreedt, het heeft een 'terugwerkende' gang.

Bij elke schommeling van de slinger drukt het anker het rad iets terug²⁰¹. De slinger wordt daardoor op zijn beurt door de aandrijving (hier niet getekend) beïnvloed, wat ten koste van de nauwkeurigheid ervan gaat.

In sommige uurwerken is dit effect goed te zien aan de tijdens elke slingerperiode optredende korte en snelle trilling van de slinger en van de secondewijzer²⁰².

Figuur 30. Anker gang

195 Usher, p. 312.

196 Het maken van precisie-instrumenten kwam in belangrijke mate voort uit de klokkenmakerij en kwam vanaf het begin van de 17^e

eeuw sterk opzetten (Daumas, p. 380; Price, p. 630).

197 Rond 1800 kon door de technische vooruitgang de spillegang wel met een kleine slingeruitslag worden gecombineerd.

198 Lloyd II, p. 75: 1671. **Het oudste exemplaar van Clement's klok, uit 1671, staat in het Science Museum te London.**

199 Kleurmodificatie en aanpassing van Fig. 404 uit Lloyd op p. 665 en de figuur op p. 32 in Spierdijk.

200 Figuur 28 op blz. 44.

201 Lloyd I, p. 658.

202 Een fraai exemplaar is in het **Zaans Uurwerkenmuseum** in werking te zien, waarbij het effect van de terugwerking duidelijk is

De Grahamgang

A.D.1715
rustende
gang

De anker gang vertoonde het nadeel van de *terugwerking op* de slinger. In 1715 werd dit sterk verminderd door een uitvinding van George Graham²⁰³ (figuur 31)²⁰⁴.



Graham construeerde een 'rustende gang'. Het **anker** heeft **bekken** met een speciale vorm. Het rustvlak (de buitenkant van de **bekken**) wordt gevormd door een cirkelboog die vanuit het draaipunt van het **anker** is getrokken. Het zijn nu alleen de punten van **de tanden van het ankerrad** die langs het heffingsvlak van de **bekken** glijden. Zij geven het **anker**, en daarmee de slinger, een impuls. Daarna valt de punt van de **tand** op het rustvlak van één van de **bekken**.

Hoewel het anker verder beweegt, blijft het rad nu onbeweeglijk: het staat stil²⁰⁵.

Een andere rustende gang, de 'pennegang', dateert uit 1730 (figuur 32²⁰⁶) en is geconstrueerd door Amant²⁰⁷. Dit **rad** heeft geen tanden, maar (half-)ronde pennen. Zij geven het **anker** een impuls als zij langs de punten van de tanden glijden. Ook hier zijn de **tanden** van het **anker** gevormd naar een cirkelboog door de as van het **anker** waardoor het **rad** stil staat terwijl telkens één van de **tanden** langs een pen glijdt²⁰⁸.

Deze gang lijkt nog meer op de door Galilei of diens zoon geconstrueerde regelaar (Appendix).

Het **ankerrad** vertoont dus geen terugwerking, geen tegen de eigen bewegingsrichting in lopende beweging meer. De interactie met de aandrijving is daardoor veel korter geworden.

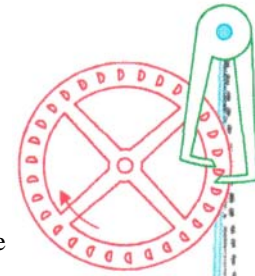
Deze uitvinding had een sterke invloed op de precisie van de klokken. Met een *nauwkeurigheid van circa 0,1 seconde per dag*²⁰⁹ konden deze worden gebruikt in wetenschappelijk onderzoek. Deze toepassing begon met name in de astronomische observatoria

Door de slinger een periode van een seconde te geven -de secondeslinger- (of, al in 1673, het 1/3e deel ervan²¹⁰) en *hoorbaar te laten tikken* konden de astronomen tijdsintervallen tussen gebeurtenissen *afstellen* en zodoende het tijdsverloop ertussen *meten*.

fout:
0,1 s
per dag

het in
seconden
meten van
een
tijdsverloop
320 jaar

Figuur 31.
Grahamgang



Figuur 32.
Pennegang

203 Lloyd I, p. 671; Usher, pp. 313-314; Spierdijk, pp. 32-33. Leopold noemt Thomas Thompion en 1676 in dit kader (Leopold II, p. 36).

204 Kleurmodificatie van Fig. 404 uit Lloyd I, op p. 665 en de figuur op p. 33 in Spierdijk. De getekende vorm vertoont speciale, ingezette, stalen bekken, maar anker en bekken kunnen ook uit één stuk metaal zijn gemaakt.

205 Deze gang is goed in werking te zien, in de fraaie elektromechanische klok in het Studiecentrum Elektronica, TU Delft.

206 Aanpassing en kleurmodificatie van de figuur uit Spierdijk, p. 33.

207 Spierdijk, pp. 32-33.

208 Werkende exemplaren zijn te bezichtigen in het Zaaans Uurwerkmuseum en in het Goud-, Zilver- en Klokkenmuseum.

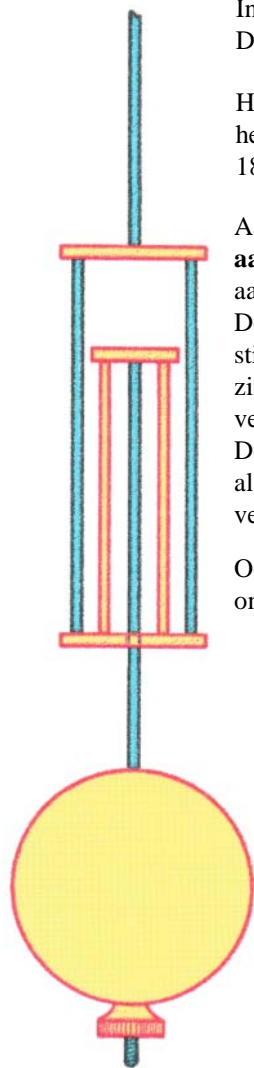
209 Usher, p. 320.

210 Lloyd I, p. 667.

Temperatuurcompensatie van de slinger

Wanneer de temperatuur stijgt, zetten de meeste materialen uit, zo ook de stang van de slinger en de ring van het balanswiel in het horloge, met als gevolg dat het zwaartepunt van de slinger daalt en de klokken langzamer gaan lopen (of sneller wanneer het kouder wordt).

1721
temperatuur
compensatie
280 jaar
In 1721 vond George Graham de eerste compensatieslinger uit, waarbij aan de stalen cilinder een glazen buis hing die met kwik was gevuld. Dit zette uit bij temperatuurstijging er verplaatste zo het effectieve zwaartepunt weer naar boven. Door dit goed uit te meten kon hij het zwaartepunt op zijn plaats houden²¹¹. Deze compensatie werd tot in de 20e eeuw²¹² in astronomische uurwerken gebruikt.



1704
lage frictie
door
edelstenen te
gebruiken

fout:
1 s
per maand

Figuur 33.
Compensatieslinger
van Harrison

In 1726 vond John Harrison het systeem van de 'roosterslinger' uit. Deze slinger werd veel toegepast (figuur 33)²¹³.

Het principe van deze slinger berust op het verschil in uitzetting bij het warmer worden tussen staal (minder sterk) en messing (of, na 1800: zink) (sterker).

Aan de stalen staven hangt een verbindingsstuk, een plaat waarop **een aantal messing staven** staat. Aan de bovenkant zitten deze ook weer aan een plaat vast, waaraan de stalen staaf hangt die de lens draagt. Deze staaf gaat door een gat in de onderste plaat. Als de temperatuur stijgt wordt het staal langer en zakt de lens. Maar de kortere messing of zinken staven worden relatief langer, zodat het bovenste verbindingsstuk zich naar boven beweegt en de lens wordt opgetild. Door dit goed uit te werken blijft de lens netto op zijn plaats: de slinger als geheel blijft even lang en de slingerperiode verandert niet meer bij verandering van de temperatuur.

Ook voor het horloge werden temperatuur compenserende onderdelen ontwikkeld.

Een essentiële bijkomende uitvinding kwam in 1704²¹⁴ -in Londen- van de Zwitser Nicolas Facio de Dullier, die *lage-frictie lagers van edelstenen* (robijn en saffier) maakte.

In 1726 konden de klokken voor wetenschappelijk onderzoek (die door John Harrison waren gemaakt) *een nauwkeurigheid van 1 seconde per maand* bereiken²¹⁵.

Met deze klokken werd meer dan 100 jaar lang de tijd naar voldoening gemeten²¹⁶, zowel voor de dagelijkse praktijk als voor het astronomische onderzoek.

Hoewel er verdere verfijningen werden ingevoerd, was met de uitvindingen van de rustende gang en van de temperatuurcompensatie de ontwikkeling van de mechanische klok in feite voltooid.

Voor de verdere ontwikkeling zouden naderhand geheel nieuwe wegen in worden geslagen.

211 Spierdijk, p. 34.

212 De kwikcompensatieslinger maakt deel uit van de (elektro)mechanische reguleur in het Studiecentrum Elektronica van de TU Delft.

213 Kleurbewerking van de figuur op p. 35. in. Spierdijk.

214 Leopold II, p. 36.

215 Usher, p. 315.

216 Een werkend precisie-uurwerk (reguleur) met roosterslinger, uit 1840, is in het Zaans Uurwerkmuseum te zien.

Intermezzo 6: Verwarrend gebruik van de tijd²¹⁷

Hoewel men al in 1884 op een internationaal congres in Washington de aardbol in 24 tijdzones had verdeeld paste men nog algemeen de plaatselijke tijd toe, ook binnen een klein land als Nederland, waar de zon in het oosten ruim 10 minuten eerder opkomt dan in het westen.

Op zich was daar niet zoveel bezwaar tegen wanneer men te voet, te paard of met de trekschuit reisde. Dat ging zo langzaam dat de lokale tijdsverschillen er niet toe deden. Maar dat veranderde toen er een snel middel van vervoer -de trein- ter beschikking kwam.

De spoorwegen gebruikten voor de diensten een eigen tijdsaanwijzing. Mensen die hier veel mee hadden te maken schaften horloges met twee minutenwijzers aan, één voor de eigen plaatselijke tijd en de ander voor de spoortijd.

In 1892 voerden de spoorwegen, de post en de telegraaf de West-Europese zonetijd in, maar de meeste gemeenten deden daar nog niet aan mee. Dat voerde tot uiterst verwarde toestanden. Een ingezonden stuk hierover verscheen in 1907 in het horlogemakervakblad "Christiaan Huygens", onder de titel

Hoe men in Nederland reizen kan.

Onlangs vertrok ondergetekende uit een plaatsje over de grens te 12.11 **Duitse tijd** en arriveerde te Venlo 11.42 spoortijd; de torenklok te **Venlo** stond op 12.07. Mijn trein naar Amsterdam, vertrok te 3.42; de 4 uur welke ik had, wilde ik besteden voor een uitstapje naar Tegelen.

De tram naar Tegelen stond reeds bezet met publiek voor het station. "Hoe laat vertrek je, conducteur?" "Te 12.50, mijnheer." "Nu, dan ga ik nog een half uurtje de stad in." "Pardon, mijnheer, wij gaan nu, het is al over tijd." "Maar het is toch pas 11.52?" "Jawel, maar wij rekenen **Duitse tijd**." (11.50 **spoortijd**, 12.15 **stadstijd**, 12.50 **Duitse tijd**).

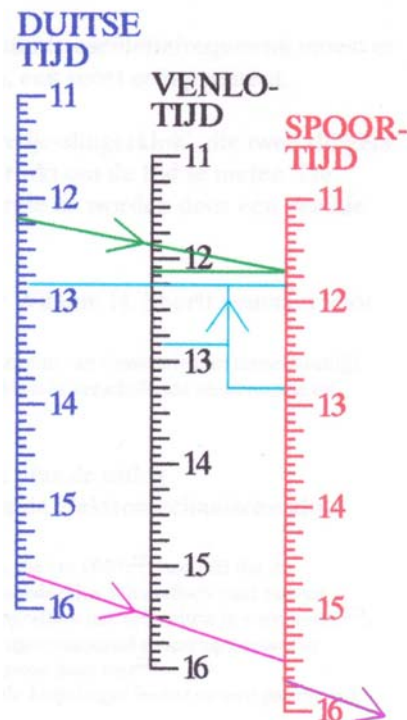
"Conducteur, ik moet te 3.42 spoortijd naar A. Kan ik terug rijden, of moet ik lopen?" "Niet nodig, mijnheer, te 3.40 gaan wij van Tegelen en dan is U zoowat 3.30 aan de statil (station)."

Jawel, 3.40 vertrekken, 3.30 aan het station, houd nu je hoofd maar bij elkaar. Wat wonder, dat de gemoedelijke conducteur de helft der passagiers moest inlichten, hoe laat het vertrek en de aankomst te Venlo was in **Duitschen tijd**, **spoortijd** en **Venloschen tijd**.

Zal dit beter worden met eenheid van Tijd, vooral als het Amsterdamschen Eenheidstijd wordt!?

* * *

In 1909 werd de middelbare Amsterdamse tijd in ongeveer het hele land gebruikt en sinds de Tweede Wereldoorlog de Midden-Europese tijd (die 40 minuten met de Amsterdamse tijd verschilt).



²¹⁷ Dit gedeelte is, evenals het citaat, ontleend aan Spierdijk, pp. 13 en 14 (tekening en kleuren: AAV).

De overgang van de 19e naar de 20e eeuw: de elektromechanische klok

Elektro- mechanische klokken

Omstreeks het midden van de 19e eeuw voldeed de mechanische klok niet meer aan de eisen van de astronomen. In die tijd begon men elektrische apparaten te ontwikkelen en te gebruiken. Dit suggereerde een nieuwe mogelijkheid voor het besturen en onderhouden van de beweging van de slinger²¹⁸.

Over een periode van 65 jaar werd hieraan door meerdere ingenieurs gewerkt²¹⁹. Dit resulteerde in de jaren 1920-1930 in klokken voor astronomische observatoria, die met een heel hoge precisie werkten, de vrije-slingerklokken van Shortt (Figuur 34).

De vereisten hiervoor werden in 1879 door Sir David Gill geformuleerd, in de aanbevelingen voor de British Association for the Advancement of Science:

De goede maat voor de tijd moet worden gevonden in een vrij slingerende pendule met een constante oscillatiehoek en bij constante luchtdruk en temperatuur²²⁰.

De term 'vrij slingerende pendule' houdt in dat de interferentie tussen de aandrijving van de slinger en de beweging ervan minimaal moest zijn. Bij de mechanische klokken was de nadelige beïnvloeding tengevolge van de noodzakelijke aandrijving in de loop der eeuwen wel sterk verminderd, terwijl er ook nog van een wrijvingscontact sprake was. Bij deze klokken was inmiddels de grens van het mogelijke bereikt.

Naast deze eisen voor het waarborgen van een constante oscillatiefrequentie moest er ook een mechanisme zijn om de oscillaties te *tellen*, een soort echappement.

De vrije slingerlok

Hieruit vloeide tenslotte het concept voort van de 'vrije-slingerlok', die twee slingers bevat. De hoofdslinger, de 'vrije' slinger, wordt gebruikt om de tijd te meten. De andere taken (contact maken en tellen) kosten energie en worden door een tweede slinger, de hulpslinger, uitgevoerd.

A.D.1921 klok van William H. Shortt 80 jaar

De eerste echte vrije-slingerlok werd in 1921 door William H. Shortt gemaakt voor het Astronomisch Observatorium te Edinburgh.

Daarop volgden drie verbeterde klokken voor het Observatorium van Greenwich, in respectievelijk 1924, 1926 en 1927. In 1939 waren ongeveer vijftig van deze klokken in verschillende observatoria en laboratoria in bedrijf²²¹.

Figuur 34 bevat het schema van de vrije-slingerlok plus de uitleg. In deze klok zijn veel ideeën uit de geschiedenis van de elektromechanische klok verwerkt:

- De 'dubbele' klok stamt waarschijnlijk van Alexander Blain, die (in 1840)²²² bedacht dat de elektriciteit gebruikt kon worden om impulsen vanuit een moederlok telegrafisch naar tal van verspreid voorkomende dochterklokken te sturen en zo geografisch isochroniciteit te verzekeren²²³.
- R.J. Rudd bracht naar voren dat de aanslingering van de slinger minimaal moest zijn, zowel in kracht als in duur, en dat één aanzet per 30 seconden een goede keus was²²⁴.
- De zwaartekracht-schakelaar en kroonwiel opstelling voor de hulpslinger berust op een patent van F. Hope-Jones uit 1908^{225,226}.
- De synchronisator werd door Shortt in 1921 gepatenteerd. Hij vond ook de opstelling voor de aansturing van de vrije slinger uit²²⁷.

fout: 1 s per jaar

Deze elektromechanische klokken, met *een precisie van 1 seconde per jaar* waren tenminste 100 keer nauwkeuriger dan de beste mechanische klok²²⁸.

218 Usher, p. 315.

219 De geschiedenis van de elektrische uurwerken staat uitvoerig beschreven in het boek van Hope-Jones.

220 Usher, p. 315.

221 Usher, p. 319.

222 Usher, p. 315.

223 Dekker, p. 25.

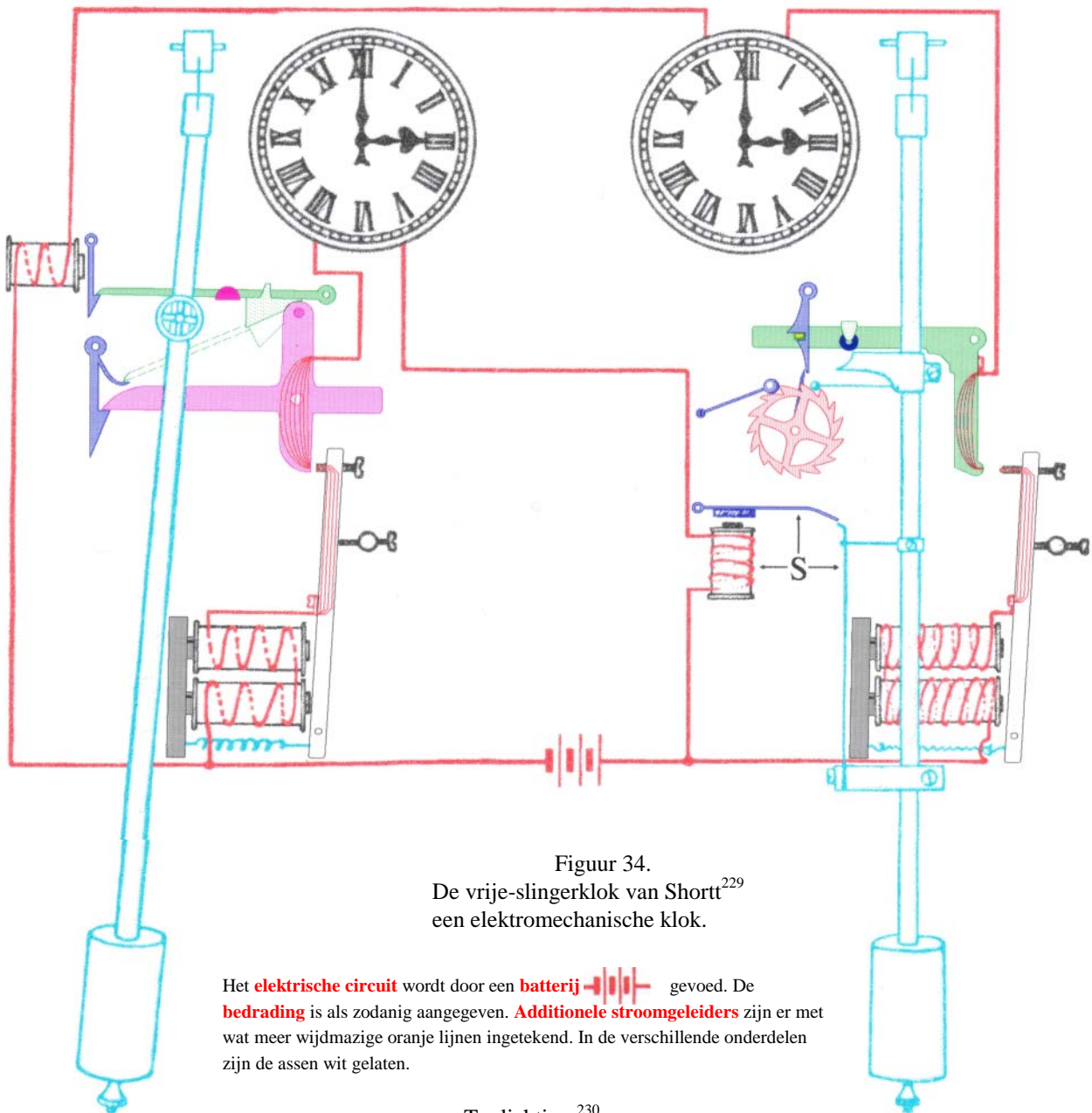
224 Usher, p. 316.

225 Usher, p. 316.

226 Een fraai exemplaar van deze reguleur, die later de rechterhelft van de Shortklok zou vormen, staat in het Goud-, Zilver- en Klokkenmuseum te Schoonhoven (niet in werking).

227 Usher, p. 317.

228 Dekker, p. 27.





Figuur 34.
De vrije-slinger klok van Shortt²²⁹
een elektromechanische klok.

Het **elektrische circuit** wordt door een **batterij**  gevoed. De **bedrading** is als zodanig aangegeven. **Additionalen stroomgeleiders** zijn er met wat meer wijdmazige oranje lijnen ingetekend. In de verschillende onderdelen zijn de assen wit gelaten.

Toelichting ²³⁰

De **hulp-slinger** (rechts) bedient de teller (de klok) door het **kroonwiel** aan te drijven. De oscillaties van de **hulp-slinger** worden met behulp van een synchronisator S (zie hieronder) aan die van de **vrije slinger** (links) gekoppeld.

De **vrije slinger** is in een niet getekende verzegelde kast opgehangen, waarvan de temperatuur is geregeld en waarin de **luchtdruk** laag wordt gehouden (0,75 inch kwik). De **slinger** is van de door Guillaume in 1904 uitgevonden²³¹ staal-nikkel legering 'invar'²³² gemaakt, waarvan de temperatuurcoëfficiënt praktisch gelijk aan nul is. Deze **slinger** heeft een periode van twee seconden. De uitslag is *klein*, waardoor de benadering van de cycloïde goed is en isochroniciteit *bij benadering* is verzekerd.

De **hulp-slinger** trekt per slingerperiode het **kroonwiel** één tand naar rechts. Dit gebeurt door middel van de aan de **slinger** vastzittende kraal . De andere kraal  verhindert eventuele terugslag van het **kroonwiel**.

Het kroonwiel heeft 15 tanden en draait in totaal één keer per 30 seconden rond.

229 Kleurmodificatie van Usher Fig. 118 (de schematische tekening op p. 318). Sommige onderdelen zijn iets vereenvoudigd.

Het rechter deel minus de synchronisator S is de (fabrikaat Synchronome) klok van Hope-Jones.

230 Usher, pp. 317-320.

231 Hope-Jones pp. 144 en 176.

232 De naam 'invar' komt van temperatuur- **in**variabel.

Vervolg van de tekst bij Figuur 3⁴

Onder het **kroonwiel** zit een **tand** gemonteerd. Deze **tand** komt één keer per revolutie van het kroonwiel in contact met de **pal** van de **rechter zwaartekrachtheboom**. De **tand** duwt de **pal** opzij, waardoor deze **hefboom** door het eigen gewicht draaiend naar links omlaag valt.

De stalen **roller** op deze hefboom duwt dan de **slinger** met kracht opzij. Dit gebeurt op het moment dat de slinger door de verticaal naar rechts beweegt en verloopt via de cirkelvormige uitsparing in de nok op deze slinger. Daardoor krijgt de slinger een nieuwe *en stevige -precies uitgerekende*²³³ - impuls voor de volgende periode van 15 oscillaties.

De **rechter zwaartekrachtheboom** maakt dan tevens contact met de ijzeren arm die op een korte afstand van de twee magneetspoelen rechtsonder staat. Hierdoor wordt een **stroomkring** gesloten (de **grote kring** die 'buitenom' loopt).

De stroompuls heeft drie effecten:

1. De stroomstoot activeert de spoelen die de ijzeren arm aantrekken, waardoor de **hefboom** weer in zijn oorspronkelijke stand terug wordt geduwd en zich weer met behulp van de nok op de hefboom zelf en de pal hierin vast laat zetten. De stroom wordt verbroken en de arm wordt door een **veer**, onderaan, in de oorspronkelijke positie teruggezet.

Het is hier nog steeds *de zwaartekracht* die de energie levert waardoor de slingers in gang worden gehouden. De zwaartekrachthebomen zijn dus te vergelijken met de gewichten in de mechanische klok. Na elke tik worden zij door de elektrisch geactiveerde magneten opnieuw 'opgewonden', d.w.z. in hun oorspronkelijke posities teruggebracht.

Voordat dit gebeurt heeft de stroomstoot nog twee andere effecten:

2. De klok wordt met behulp van een hier niet getekende stappenmotor een halve minuut verder gezet.
3. Verder wordt de magneet links van de vrije slinger geactiveerd. Daardoor wordt de pal van de **lichte zwaartekrachtheboom** links weggetrokken. Deze **hefboom** valt draaiend omlaag. Dit gebeurt wanneer de **slinger** zich net door het midden naar rechts beweegt. Een **robijn** die op deze **lichte hefboom** is gemonteerd en die naar voren uitsteekt glijdt dan langs het **wieltje** op deze **slinger** omlaag en geeft de slinger dan door het geringe gewicht van de hefboom *een lichte* impuls, voldoende voor de volgende 15 oscillaties.

De val van de **lichte zwaartekrachtheboom** stoot de **pal** van de **grote linker hefboom** opzij, waardoor deze **hefboom** draaiend naar links omlaag valt. Tijdens deze val omlaag, *door de zwaartekracht*, wordt de **linker hefboom** teruggezet en maakt de **grote hefboom** contact met de ijzeren arm die voor de twee linker spoelen staat. Er gaat een stroom door de binnenste '**kleine**' **stroomkring** lopen.

Deze stroomstoot heeft drie gevolgen:

- De stroompuls activeert de twee magneetspoelen links, waardoor de arm wordt teruggezet en de stroomkring wordt verbroken.
- De stroomstoot verzet ondertussen de wijzer van de linker klok een halve minuut en activeert de magneetspoel van de synchronisator S. De activering van de magneet van de synchronisator beweegt een **gebogen staaf** omlaag die, als de hulpslinger (rechts) inmiddels iets achter is gaan lopen, deze met behulp van de **bladveer aan de slinger** weer in het gareel trekt (d.w.z. naar links duwt).

Op deze manier bepaalt de vrije slinger de oscillatie van het hele systeem. Zelf krijgt deze één keer per 15 perioden (dus per 30 seconden) een minimale impuls, voldoende om net te blijven slingeren. Dit gebeurt op het moment dat de slinger door de verticaal naar links beweegt. De vrije slinger slingert dus het grootste deel van de tijd, ca. 99 procent, ongehinderd door interferentie van buiten. De hulpslinger die wel veel interferentie ondergaat, wordt telkens bijgesteld. Omdat de hele schakelperiode ca. 0,8 seconde duurt, is de hulpslinger ingesteld op 15 slingeringen per 29,2 seconden.

De vrije slinger slingert over een boog van ongeveer 1,5 graad. Gedurende de halve minuut waarin de slinger vrij slingert neemt deze met 4 boogseconde af. Stimulatie door de lichte zwaartekrachtheboom voegt dit bedrag weer aan de amplitude toe²³⁴.

233 Zie hiervoor tekst en tekening op pp. 135 en 136 in Hope-Jones.

234 Hope-Jones, p. 179.

235 Hope-Jones, pp. 179, 206.

Intermezzo 7: in 1927 werd de aarde als klok onttroond

Het was al lang bekend, dat de aardas niet stabiel in de ruimte staat. De aarde gedraagt zich als een tol, waarvan de as onder invloed van de massa's van zon, maan en planeten en door de variabele afstand tot deze objecten slingeringen vertoont. Dit gedrag van de aardas heeft tot gevolg dat de projectie van de poolas op de sterrenhemel cyclisch varieert (de huidige poolster heeft deze positie in termen van eeuwen gesproken nog niet zo erg lang en zal die in de toekomst verliezen - en de dagelijkse passage van dezelfde sterren door de meridiaan iets in tijd varieert.

De grootste slinginging is de precessie, met een periode van ca 26000 jaar. Deze werd in ca -150 door Hipparchus ontdekt²³⁶.

De kleinere slingeringen worden samen de *nutatie* genoemd. Deze worden door het verschil tussen het vlak van de baan van de maan en van de aarde (waarvan de snijlijn in 18,6 jaar ronddraait), door de variatie van de afstand van de zon en van de maan tot de aarde en door de planeten veroorzaakt.

De grootste nutatiecyclus -van 18,61 jaar- werd in de 18e eeuw door James Bradley ontdekt²³⁷.

Kleinere cycli waren theoretisch te verwachten, maar niet gevonden, omdat de ermee samenhangende variatie van het moment van de passage van sterren door de meridiaan nog niet meetbaar was.

*vanaf 1927
is de klok
nauwkeuriger
dan de rotatie
van de aarde*

De accuratesse van de Shortt-klokken bleek op dramatische wijze in 1927 in het Observatorium te Greenwich²³⁸. Aan de hand van de eerste metingen van sterdoorgang observaties (Figuur 35) meende men dat de klok (Shortt klok nr. 3: SH 3) toch variabel was. Dr. Jackson van dit observatorium kwam na opmeten en correctie van de gegevens van de klok en na verdere studie van meer observaties tot de conclusie dat de klok goed was.

De aardrotatie bleek dus *nóg* een variatie te vertonen, berustend op een verplaatsing van de aardas in een 14-daagse cyclus met een verandering van 0,02 seconde per 14 dagen (= 0,003 s/dag)!

*tijdmeting:
meer dan
7000 jaar
astronomie
80 jaar
fysica*

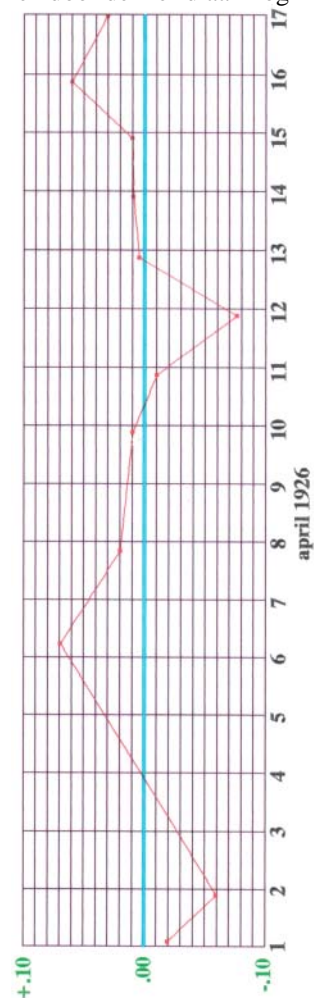
Tot 1927 vormde de rotatie van de aarde de klok waar alle andere klokken aan werden afgemeten.

Maar vanaf 1927 zijn de klokken nauwkeuriger dan de aardrotatie en moest de astronomie haar gedurende vele tientallen eeuwen primaire plaats in de tijdmeting afstaan aan de fysica.

Figuur 35.
De eerste met klok SH3 gemeten meridiaanpassages
van april 1926

Copie van de registratiestrook²³⁹

Het tijdsverschil tussen **de passage van de ster**
en het signaal van klok SH3 ligt tussen de uitersten van
+ en -0,10 seconde die de registratiestrook begrenzen.



236 Grote Winkler Prins Encyclopedie, 7^e editie, 1974, deel 15, p. 659.

237 Mitton, p. 405.

238 Usher, pp. 320-321; Hope-Jones, pp. 205-212.




239 Nagetekend en ingekleurd naar Fig. 103 in Hope-Jones, p. 207.

De 20e eeuw: teruggekoppelde elektronische klokken²⁴⁰

De mogelijkheden van de mechanische oscillator, de slingerklok, hadden in de ontwikkeling van de Shortt-klokken hun hoogtepunt bereikt. Voor nog nauwkeuriger klokken waren heel nieuwe concepten en technieken nodig. In de loop van de 20ste eeuw waren het de ontwikkelingen in de elektronica die nieuwe mogelijkheden schiepen voor het maken van bijzonder nauwkeurig lopende klokken.

De tot dan toe incidenteel gebruikte teruggekoppelde systemen (de waterklok van Hero²⁴¹, en de tegengekoppelde klokken van Christiaan Huygens) werden nu volledig en systematisch gebruikt.

A.D. 1912 Essentieel in de moderne elektronische klokken is de **Armstrong:** *elektronische oscillator*. Dit circuit is in zekere zin het eindproduct van een ontwikkeling van elektronische oscillatoren die begon met de oscillatorlamp (-buis) schakeling van Armstrong in 1912 (Figuur 36)²⁴², de door hem in 1914 en in 1919 gepatenteerde oscillerende circuits²⁴³ en het door Hazeltine in 1924 gepatenteerde afstembare-frequentie- circuit^{244,245}. Dit alles vond plaats in het kader van de ontwikkeling van de radio.


Een uit een spoel , condensator  en bijbehorende weerstand²⁴⁶  bestaand circuit vormt een aan de slinger analoge elektronische oscillator (Figuur 37).


De slinger

De slinger wordt 'opgeladen' door deze naar opzij te bewegen -deze toestand is in figuur 37 aangegeven- en dan los te laten (Figuur 38).

Door de dissipatie van de mechanische energie door de wrijving met de (weerstand van de) lucht (in de vorm van warmte) zullen de uitslagen (de 'amplitude' van de oscillatie) langzaam kleiner worden en tenslotte uitdoven. In de klok zorgt het echappement ervoor dat de slinger telkens weer voldoende energie toe krijgt gevoerd.

Het circuit

De condensator van het circuit wordt door de batterij  opgeladen. Wanneer de schakelaar naar links is gezet (Figuur 37). In deze toestand is de verdeling van de negatieve lading over het circuit schematisch weergegeven. Om de tekeningen niet te ingewikkeld te maken is de bijbehorende positieve ladingsverdeling weggelaten.

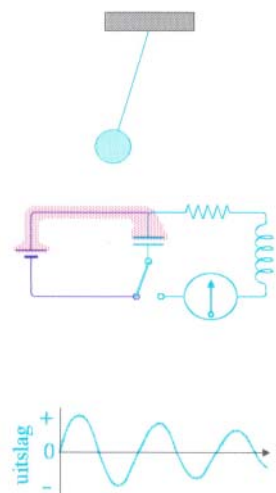
Door de schakelaar naar rechts om te zetten wordt het oscillerende circuit gesloten en kan er stroom gaan lopen (Figuur 38). Deze wordt door de stroommeter  gemeten. Als de wijzer recht naar boven wijst is de stroom door de meter gelijk aan 0.

Door de dissipatie van energie in de weerstand van het circuit (in de vorm van warmte, eventueel ook van elektromagnetische golven) zullen de uitslagen van de stroom langzaam kleiner worden en tenslotte uitdoven.

In de circuits van Figuur 37 en 38 is géén met het echappement corresponderend circuit aanwezig dat de oscillatie onderhoudt door regelmatig energie aan het systeem toe te voeren. om de dissipatie erin te compenseren.



Figuur 36. Lamp van Fleming met oscillatorschakeling van Armstrong



Figuur 37.

240 Voor dit onderdeel is voor de historische delen gebruik gemaakt van het boek van Turner.

241 Zie figuur 9-2: I en M op blz. 19.


242 Uitgelicht en gemodificeerd (draden van de voet bijgetekend), naar de foto in Meyer Fig. 14.1 op p. 206.

De plaat is niet duidelijk genoeg om de verschillende onderdelen te identificeren en hun functie te bepalen.

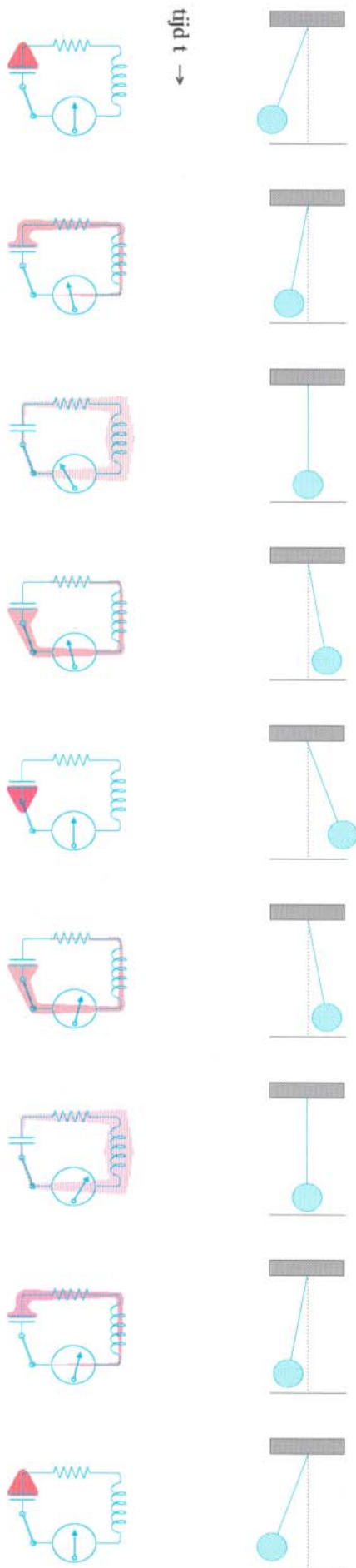
243 Het Nederlands PTT museum heeft een vroege oscillator -uit 1920- in depot.

244 Meyer, pp. 207 en 214.

245 De geschiedenis van oscillerende elektronische circuits moet nog worden geschreven.

246 Het tegenwoordig gangbare symbool voor de weerstand, een blokje , heb ik voor deze tekeningen door een klassiek symbool vervangen.

Figuur 38.
Oscillatie van circuit en slinger



Condensatorlading c.q. slingerhoogte maximaal,
dus arbeidsvermogen van plaats (AVP) maximaal.
Stroom-, c.q. slingersnelheid minimaal (= 0), dus
arbeidsvermogen van beweging (AVB) = 0

De **stroom elektronen** is als een **wolk** getekend,
De **meter** geeft de grootte (amplitude) en richting
van de **stroom** aan, verticaal = 0.

Potentiële energie is deels in kinetische omgezet.

Lading, hoogte minimaal: AVP = 0,
Snelheid maximaal: AVB = maximaal

Kinetische energie is deels in potentiële omgezet.


AVP = maximaal,
AVB = 0

Potentiële energie is deels in kinetische omgezet.

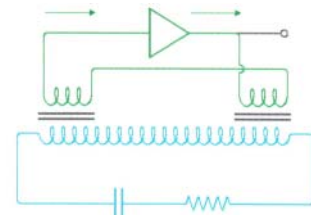
AVP = 0,
AVB = maximaal

Kinetische energie is deels in potentiële omgezet.

AVP = maximaal
AVB = 0

De demping in het **oscillerende circuit** die als gevolg van de dissipatie erin optreedt, kan worden bestreden door met een **terugkoppeling (feedback) via een versterker**  (bijvoorbeeld een triode) op het juiste moment (dwz, in de juiste fase) energie toe te voeren op basis van de gemeten toestand in het circuit.

In Figuur 39²⁴⁷ is dit gerealiseerd door de spoel van het **oscillerende circuit** in twee transformator (afkorting: trafo) koppelingen op te nemen. De linker trafohelix (de **sensor**) neemt het signaal op **uit het circuit**, de rechter trafohelix (de **effector**) voert het versterkt **hierin terug**. Door dit zo te doen dat *de terugkoppeling de invloed van de dissiperende weerstand compenseert (negatieve terugkoppeling of tegenkoppeling)* is een oscillerend systeem verkregen dat de trilling niet meer wegdempt.



Figuur 39²⁴⁷.
Oscillerend circuit met gangregelaar.

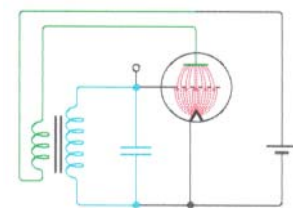
Wanneer de versterker wordt aangezet, zal -door de altijd aanwezige *ruis* in het systeem- het geheel in een blijvende trilling (oscillatie) komen, waarvan de frequentie door het originele circuit wordt bepaald.

Het originele circuit bevoordeelt één frequentie boven alle andere en wordt daarom een (scherp) *bandfilter* genoemd.

A.D. 1919: Het principe van de eerste **gangregelaar** door middel van een aparte tegenkoppeling **elektronische gangregelaar** (apart in letterlijke zin: het gaat hier niet om de terugkoppeling in **de oscillerende lus** zelf) is in figuur 40 afgebeeld^{248, 249}.

De dissiperende weerstand van de elementen in het oscillerende circuit is hier niet apart in getekend. Het rooster van de versterker (de 'buis': een 'triode') fungeert tegelijkertijd als de ingang (sensor) van de terugkoppellus.

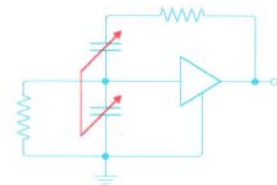
*De basis voor de moderne klokken wordt door zulke elektronische oscillatorschakelingen gevormd: teruggekoppelde systemen waarin een zo scherp mogelijk bandfilter is opgenomen waardoor er een harmonische trilling in ontstaat*²⁵⁰.



Figuur 40²⁴⁸.
Tegengekoppelde oscillator.
elektronenstroom door de buis ingetekend.

A.D. 1924 Wanneer als filter een *instelbaar* elektronisch bandfilter wordt toegepast ontstaat een *frequentiegenerator* (figuur 41)²⁵¹. Na ijking kan men hiermee een signaal met een (binnen een bepaald gebied) frequentie naar keuze opwekken²⁵².

In wetenschappelijk onderzoek registreert men processen die zich in de tijd afspelen op een daartoe geschikt medium (foto of harde schijf). Wanneer men het uit de frequentiegenerator afkomstige tijdsignaal gelijktijdig op dit medium registreert kan men naderhand het tijdsverloop van het bestudeerde proces in detail analyseren.



Figuur 41²⁵¹.
Brugoscillator van Wien

In de in figuur 41 afgebeelde brugschakeling van Wien speelt de versterker zowel de rol van de spoel (faseverschuiving) als van de versterker die de oscillatie onderhoudt. Om dit laatste zonder demping of opslingering van de amplitude van de oscillatie uit te voeren worden voor de versterker speciale stabiliserende circuits gebruikt, die hier niet bij in zijn getekend.

De beide weerstanden zijn aan elkaar gelijk (elk heeft de weerstand R) evenals de twee condensatoren (elk met variabele capaciteit C). De twee in capaciteit variabele condensatoren zijn via een arm met elkaar verbonden, zodat zij gelijktijdig op dezelfde waarde kunnen worden ingesteld.

De frequentie van het geheel is $f = 2\pi / RC$ en is via C te variëren.

Deze versterker levert een sinusvormige oscillatie (Figuur 37). Voor fysiologisch (en ander) onderzoek worden ook oscillatoren gebruikt die een blokvormige oscillatie vertonen, de zgn. multivibratoren.

247 Aangepast schema uit Pippard, Fig. 26, p. 335.

248 Uit Pippard, Fig 11.4 D, p. 314.

249 De eerder genoemde oscillator uit 1920 in het Nederlands PTT Museum is volgens deze schakeling gebouwd.

250 Hier wordt uitsluitend het principe van deze generatoren beschreven, met verwaarlozing van alle praktische details en problemen.

251 Aangepast schema uit Budak, Fig. 15-1b, p. 459.

252 Het prototype van een verschilffrequentie oscillator uit 1930 bevindt zich in de Studieverzameling Elektrotechniek van de TU Delft.

Kwartsoscillatoren

De eerste kristaloscillator werd in 1921 door W.G. Gady gebouwd²⁵³. In 1925 ontwikkelde men in de laboratoria van Bell Telephone^{254, 255} het idee om een uit een kwartskristal (bergkristal) gesneden plaatje kwarts (Figuur 42)²⁵⁶ te gebruiken om de nauwkeurigheid van de frequentiegenerator verder op te voeren.

Zo'n plaatje is *piëzoëlektrisch*: mechanische druk wekt er een elektrisch spanningsverschil over op en omgekeerd (de term piëzo is van een Grieks werkwoord dat 'drukken' betekent afgeleid. Dit verschijnsel werd in 1880 door Pierre en Jacques Curie ontdekt²⁵⁷).

Voert men aan zo'n kristalplaatje een periodiek signaal toe, dan is de amplitude van de respons bij één frequentie maximaal. Het kwartskristal vormt een *nagenoeg* perfecte elektromechanische resonator. De resonantiefrequentie hangt af van de richting van de snede in het kristal en van de afmetingen van het plaatje. Men heeft hiermee inmiddels veel ervaring opgedaan en kan de (tegenwoordig gekweekte) kwartskristallen naar wens snijden en (met een laser) slijpen op een frequentie die ligt tussen enige honderden tot *vele miljoenen trillingen per seconde*.

A.D. 1928 kwartsklok

Plaatst men dit plaatje kristal (dat tussen twee elektroden is gevat) in een op deze frequentie afstembare frequentiegenerator, die men zo afstemt dat de eigen frequentie van het kwartsplaatje wordt versterkt, dan heeft men een heel stabiele klok gekregen. Ook kan men het kwartsplaatje als zodanig in een teruggekoppeld (feedback) circuit opnemen (Figuur 43)²⁵⁸.

De uitgang van de kwartsresonator wordt afgelezen. Vanaf de uitgang voert een terugkoppeltak (feedback) naar de versterker die het kwartsplaatje doet oscilleren. De voeding (levering van elektrische energie) van de versterker is hier eveneens bij getekend. Elk onderdeel is door een 'blok' weergegeven, zonder nadere details van deze onderdelen te geven.

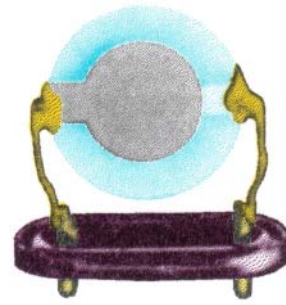
frequentie- deling

Door aan de uitgang van het circuit een serie *flipflops* te plaatsen (schakelingen die op elke serie van twee inkomende stroompulsen één uitgangspuls produceren), wordt de originele frequentie bij herhaling door 2 gedeeld. Dit gebeurt net zo vaak als er flipflops zijn ingebouwd, en wel tot de tijdsduur tussen de opeenvolgende pulsen bijvoorbeeld tot 1 Hz, dwz één puls per seconde is gedaald²⁵⁹. De uitgang van deze laatste flipflop drijft dan de stappenmotor (die per puls één positie verspringt) van de wijzers aan.

De Amerikanen Horton en Marrison pasten de kwartsresonator voor het eerst in klokken toe en beschreven dit in 1928²⁶⁰.

fout: 1 seconde per 3 jaar

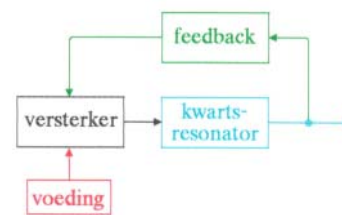
Door hun uitvinding sprong de nauwkeurigheid van deze klokken naar *1 seconde per 3 jaar*²⁶¹.



Figuur 42.
Kwarts-resonator.

Kwartsplaatje, met voor en achter een opgedampte zilverelektrode.

Om het energieverbruik en de stabiliteit te verhogen moet het nog in vacuüm in een glazen of metalen huls worden gemonteerd.



Figuur 43²⁵⁸.
Kwartsoscillator.

253 Haffner, in Frerking, p. V.

254 Meyer, p. 282.

255 Het Nederlands PTT Museum heeft verschillende kwartsoscillatoren in depot, evenals modellen ervan.

256 Tekening naar een deel van een foto uit Frerking (Fig. 5-9 op p. 34).

257 Meyer, p. 282.

258 Kleurmodificatie van de figuur op p. 33 uit Kamas.

259 Voor huishoudelijk gebruik. Bij ander gebruik wordt (vanuit andere, hogere, frequenties) tot andere lagere frequenties afgedaald,

bv. tot 1000 Hz wanneer men een verschijnsel tot op de milliseconde nauwkeurig moet meten of signaleren.

260 Turner, p. 193.

261 Turner, p. 194.

Voor de nu in het dagelijks gebruik algemene kwartsklokken en -horloges gebruikt men stemvorkvormige miniatuur kwartsplaatjes met een frequentie van 2^{15} Hz (32786 trillingen per seconde). Via een reeks van 15 flipflops (delers door 2) wordt deze frequentie tot 1 puls per seconde teruggebracht.

Deze huishoudelijke klokken zijn zeker 10 tot 100 keer nauwkeuriger dan de mechanische klokken die tot die tijd in algemeen gebruik waren²⁶².

*fout:
1 seconde
per 30 jaar*

Maar de klokken voor wetenschappelijk gebruik waren nog veel nauwkeuriger.

In de 50^{er} jaren bereikte men met een verbeterde kwartsklok
*een nauwkeurigheid van 1 seconde per 30 jaar!*²⁶³.

Variaties in de rotatie van de aarde konden hiermee goed worden opgemeten en bleken 1 milliseconde per dag te bedragen²⁶⁴. De deze variaties genererende verschuivingen van de aardas, dus van de Noordpool, konden hiermee worden opgemeten en bleken te variëren van 5 tot 15 meter per jaar!

*atoomklok
een
veredelde
kwartsklok
50 jaar oud*

Atoomklokken: verfijnde kwartsklokken

De kleine variaties van de kwartsklok konden nog verder worden teruggebracht door een extra frequentiestabilisator in te bouwen: de atoomstandaard.

Wanneer een atoom van de ene in een andere energietoestand overgaat (een zg. atomaire overgang), wordt er ofwel energie geabsorbeerd of er komt energie vrij in de vorm van elektromagnetische (licht- of radio-) straling met een gefixeerde frequentie.

Door een bepaalde atomaire overgang te kiezen en die atomen via een speciale opstelling (Figuur 43) in de toestand te brengen dat zij de gewenste straling produceren kan men die straling gebruiken om de frequentie van een kwartsklok te stabiliseren. Die frequentie wordt eveneens door een zeer hoogfrequente kwartskristal oscillator met frequentievermenigvuldiger) geproduceerd. Deze oscillator is in een teruggekoppeld circuit opgenomen. De frequentie van het kristal wordt door het circuit zo bijgesteld dat de stralingsintensiteit van de atomen maximaal is. De beide frequenties zijn dan aan elkaar gelijk en worden door het regelcircuit aan elkaar gelijk gehouden. Hierdoor blijft het kwartskristal automatisch afgestemd op de stralingsfrequentie van het atoom.

*A.D. 1948
fout:
1 seconde
per
3000 jaar*

De eerste 'atoomklok', gebaseerd op een atomaire overgang in het ammoniakmolecuul, werd in 1948 door Harold Lyons gebouwd²⁶⁵.

Deze had een *nauwkeurigheid van circa 1 seconde per 3000 jaar*.

Hiermee vond men dat de aarde in de Noordelijke zomer 30 milliseconde per dag sneller ronddraaide dan in de winter²⁶⁶.

*A. D. 1955
fout:
1 seconde
per
300.000 jaar*

In 1955 kon door voortgaande technische ontwikkelingen op een overgang van het cesiumatoom worden overgeschakeld (de 'cesiumklok', figuur 44). Men behaalt hiermee een *nauwkeurigheid van circa 1 seconde per 300.000 jaar*²⁶⁷.

Het hobbelen van de aardas kan nu van dag tot dag tot op de meter worden gevolgd.

Door via de radio de tijdseinen in huis te halen (de 'tijdpiepjes'), wat zelfs automatisch kan gebeuren, beschikken wij nu thuis over klokken die veel nauwkeuriger zijn dan wij voor dagelijks gebruik nodig hebben!

262 Dekker, p.30.

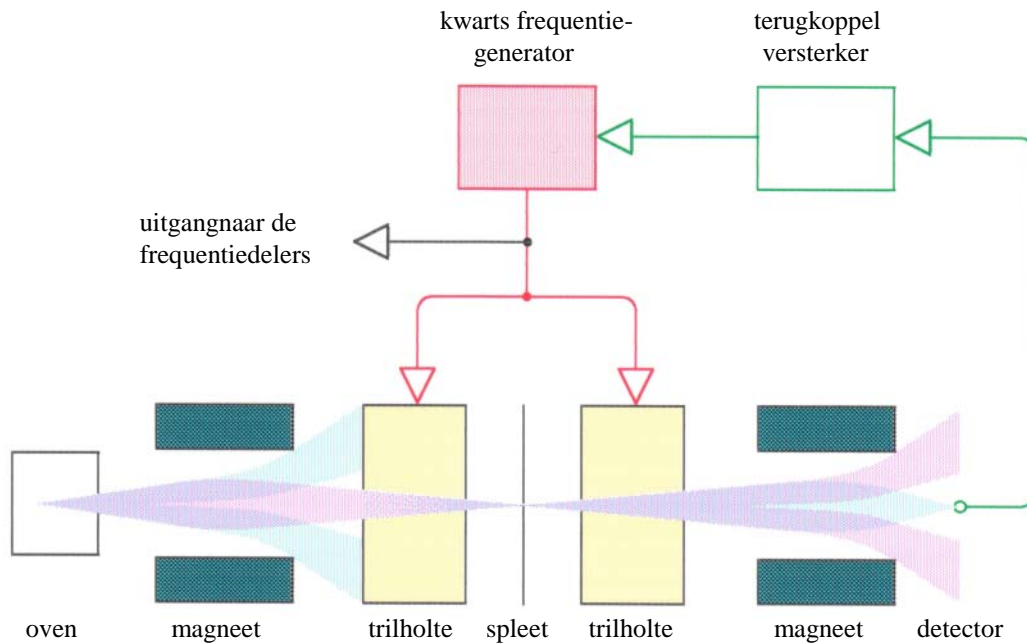
263 Turner, p. 195.

264 Dekker, p. 29.

265 Dekker, p. 30.

266 Grote Winkler Prins, deel 18, 7^e druk, 1974, onder *Tijdmeting*.

267 Dekker, p. 30.



Figuur 44. Schema van een atoomklok^{268, 269}

Een cesiumatoom bestaat uit een zware kern met daar omheen een schil van 55 elektronen. Hiervan bevinden 54 zich in een stabiele positie. Het buitenste elektron -het valentie-elektron- kan in twee verschillende toestanden verkeren. Kern en valentie-elektron draaien elk om hun eigen as (spin). De draaiing van het elektron kan gelijk of tegengesteld zijn aan die van de kern. Spin veroorzaakt een magnetisch veld. De twee toestanden van het atoom hangen samen met de onderlinge spin oriëntatie. Bij de overgang van de ene toestand naar de andere wordt ofwel hoogfrequente energie opgenomen, ofwel afgegeven. In de tekening zijn de atomen die **energie op kunnen nemen rood** (dwz magenta) gekleurd, die **het af kunnen geven blauw** (dwz cyan).

In 1964 is aan de frequentie van deze energieoverdracht de waarde van 9.192.631.770 Hz toegekend.

In een oven (links) wordt cesium verdampt. Via een opening wordt een bundel cesiumatomen doorgelaten. De bundel atomen doorloopt een door **de eerste magneet** gegenereerd inhomogeen permanent magnetisch veld. De atomen die **energie op kunnen nemen** worden hierin **gebundeld, de andere verstrooid**.

De kwarts microgolfgenerator (kwarts frequentiegenerator) houdt in **de twee trillolten** een hoogfrequent magnetisch veld in stand. **In deze holten** kunnen de atomen energie absorberen.

De spleet is zo opgesteld dat na passage van de eerste magneet alleen die atomen worden doorgelaten, die energie kunnen absorberen. De atomen die in **hoogenergetische toestand** verkeren worden tevoren door de magneet **afgebogen**.

Na de passage van **de tweede trillolte** -waarin nog meer atomen zijn 'opgeladen'- passeert de bundel een door de tweede magneet gegenereerd inhomogeen permanent magnetisch veld. Nu worden de atomen die intussen **energie hebben verloren afgebogen**, terwijl **de aangeslagen atomen (die energie op hebben genomen) worden gebundeld** en door de **detector** worden **opgevangen**.

De **detector** levert een elektrische stroom waarvan de intensiteit evenredig is met het aantal opgevangen atomen. De **detector met bijbehorende versterker** is opgenomen in een terugkoppeling naar de **kwarts microgolfgenerator**.

Dit terugkoppelcircuit zorgt ervoor dat de stroom maximaal blijft, dus dat de frequentie op de waarde van 9.192.631.770 Hz blijft gecentreerd.

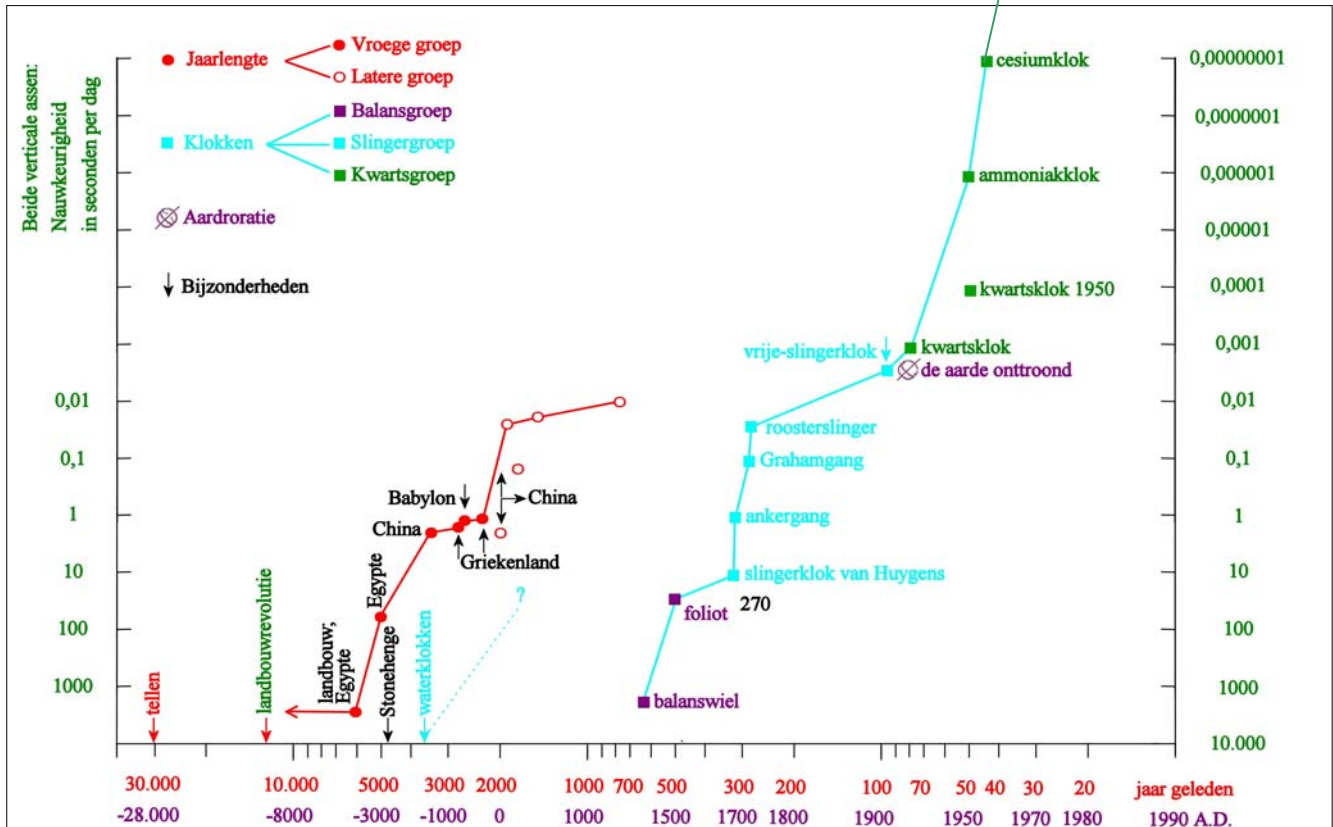
268 Combinatie van de tekeningen van Vos en Vos de Wael, en van Kamas, p. 38; gemodificeerd en ingekleurd.

269 Het Nederlands PTT Museum heeft naast in kastjes gemonteerde rubidium- en cesiumstandaards, een opengewerkte rubidiumstandaard ('rubidiumklok') in depot.

Samenvatting: Nauwkeurigheid van de tijdmeting in de loop der eeuwen

Zie blz. 61

Figuur 45 toont in vogelvlucht de ontwikkeling van de meetnauwkeurigheid in de loop der eeuwen. Eerst die van (de vroege metingen van) de **jaarlengte**, vervolgens die van de **klokken** (afgezien van de waterklokken, waar geen duidelijke historische gegevens over bekend zijn). Ook staat hierin het moment waarop de **rotatie van de aarde** als maatstaf het onderspit moest delven. Dezelfde gegevens staan, wat de klokken betreft, in Tabel III op de volgende pagina. De jaarlengte gegevens staan in Tabel II (op blz. 12).



Figuur 45. Ontwikkeling van de meetnauwkeurigheid*.

Beide assen zijn logaritmisch.

Verticaal staat de nauwkeurigheid in seconden per dag (links en rechts gelijk).

Op de horizontale as staan

zowel de leeftijd van de desbetreffende ontwikkeling in jaren t.o.v. het jaar 2000, als de datum in de hier gebruikelijke jaartelling.

Uit de gegevens die in Figuur 45 en Tabel III samen zijn gevat zijn verschillende interessante ontwikkelingen af te lezen.

Zo zien wij dat pas ruim na 1726 (door de ontwikkeling van temperatuurgecompenseerde slingers) de fysische tijdsbepaling met de astronomische kon gaan wedijveren.

Het duurde echter nog drie eeuwen -tot in de 20e eeuw- voor de rotatie van de aarde om haar as door de ontwikkeling van elektrische (dwz elektromechanische en elektronische) klokken als basis voor nauwkeurige tijdwaarnemingen werd onttroond.

Kijken we naar het verloop van de nauwkeurigheid, dan is het duidelijk dat de ontwikkeling van de metingen van de jaarlengte (in vroeger tijden) en de ontwikkeling van de nauwkeurigheid van de klokken *sprongen* vertoont.

270 Met een 'cross-beat' foliot, zie noot 164 op blz. 39.

* Parafrazering van figuur 8 uit Shallis, p. 59.

TABEL III
Meetnauwkeurigheid in de loop der eeuwen²⁷⁰

Naam	onderwerp	ca Jaar Geleden t.o.v. A.D. 2000	A.D.	fout	fout ca 1 s per	fout in seconden per dag
- Balansgroep (mechanisch):						
Honnecourt	wiel	750	1250	-		
(Dondy)	balanswiel	650	1364	20 min/dag	minuut	1200
?	foliot	620	1380	?		
Bürigi	foliot ²⁷⁰	520	1484	30 s/dag	8 minuten	30
- Slingergroep:						
-- Mechanisch:						
Huygens	slinger klok	330	1673	10 s/dag	2,5 uur	10
Clement	ankergang	320	1680	1 s/dag?	dag	1
Graham	Grahamgang	285	1715		10 dagen	0,1
Harrison	roosterslinger	275	1726		maandag	0,03
-- Elektromechanisch:						
Shortt	vrije-slinger klok	79	1921		jaar	0,003
Jackson	aarde	73	1927		jaar	0,003
- Kwartsgroep (elektronische systemen, tegenkoppeling):						
-- Kwartsklokken:						
Horton &						
Marrison	kwartsklok	72	1928		3 jaar	0,001
Verbeterde	kwartsklok	50	1950		30 jaar	0,0001
-- Atoomstandaards:						
Lyons	ammoniakstandaard	52	1948		3000 jaar	0,000001
	Cesiumstandaard	45	1950		300.000 jaar	0,00000001

In de landbouwgemeenschappen in het Nabije Oosten (Egypte, Babylon en Griekenland) begon men met de bepaling van de lengte van het jaar. De resultaten, behaald met behulp van *de gnomon* en van *meridiaandoorgangen*, laten een duidelijke *verzadiging* zien (de curve gaat vlakker lopen).

Rond het begin van onze jaartelling bereikte men in China een hoge graad van nauwkeurigheid van de meting van de jaarlengte, vermoedelijk door het bijkomende gebruik van reusachtige *waterpassen* in combinatie met *camera obscura* technieken. Ook deze curve verzadigt.

Men slaagde er telkens in met de beschikbare middelen het maximaal haalbare te bereiken.

Voor de oudste mechanische klokken die *door een gewicht (of veer)* werden *aangedreven* en door *de balans (wiel of staaf) m.b.v. de spillegang* werden afgeremd werd de maximale nauwkeurigheid binnen circa 1,5 eeuw na hun uitvinding bereikt²⁷¹. Daarop volgde een periode van *stilstand* die ongeveer 2 eeuwen duurde.

²⁷⁰ Deze tabel vormt een toelichting op Figuur 44. Voor de tijdmeting zijn slechts de essentiële stappen vermeld. Oudere typen bleven vaak nog lang gangbaar. Details en verfijningen zijn niet opgenomen. De ontwikkelingen binnen de kleinere *draagbare klokken* (horloges en bijbehorende gangregelaars) zijn eveneens terzijde gelaten.

²⁷¹ Noot op blz. 59.

Pas door een geheel nieuwe uitvinding, *de slinger* (een zelfstandig oscillerend systeem), en de ontwikkeling van de slingerklok, kwam er weer schot in de verbetering van de nauwkeurigheid.

De mogelijkheden van de slingerklok werden betrekkelijk snel gerealiseerd (binnen een eeuw). De ontwikkelingscurve liep steil omhoog en hield vervolgens abrupt op, waarop weer een periode van 2 eeuwen van betrekkelijke *stilstand* volgde.

Weer was het een geheel nieuwe ontwikkeling, ditmaal de toepassing van *de elektriciteit*, waardoor het idee van de minimaal gestoorde *vrije slinger* in een elektromechanische opstelling worden verwezenlijkt.

Met deze klok werd een nauwkeurigheid bereikt die de 'klok aller klokken', de roterende aardbol, als standaard voor de tijdmeting onttroonde.

De ontwikkelingen in *de elektronica* en de systematische toepassing van de mogelijkheden die de verschillende vormen van *terugkoppeling* bieden, plus de ontdekking van *oscillatoren die berusten op de eigenschappen van de materie zelf*, zetten kort daarop een nog verdergaande ontwikkeling in gang:

Door gebruik te maken van de oscillaties van *kwarts*, later gecombineerd met die van (de elektron overgangsstraling van) moleculen (ammoniak) en atomen (rubidium, cesium) in combinatie met teruggekoppelde versterkers konden extreem hoge nauwkeurigheden worden bereikt.

Dank zij de radiocommunicatie kunnen tegenwoordig zelfs de klokken in huis regelmatig en automatisch met deze nauwkeurigheid worden ingesteld.

Dit is echter geen belangrijk gevolg.

Wat héél belangrijk is is dat

- *de ijking* van in wetenschappelijk onderzoek gebruikte *standaards* (zoals de frequentie van lasers) met deze hoge graad van nauwkeurigheid kan worden uitgevoerd,

- *de plaatsbepaling* nu overal ter wereld, met name op zee, in de lucht en in andere bakenloze gebieden zoals zand- en ijswoestijnen, dank zij via satellieten verzonden signalen met een zeer hoge graad van nauwkeurigheid (van de orde van grootte van een meter), mogelijk is geworden.

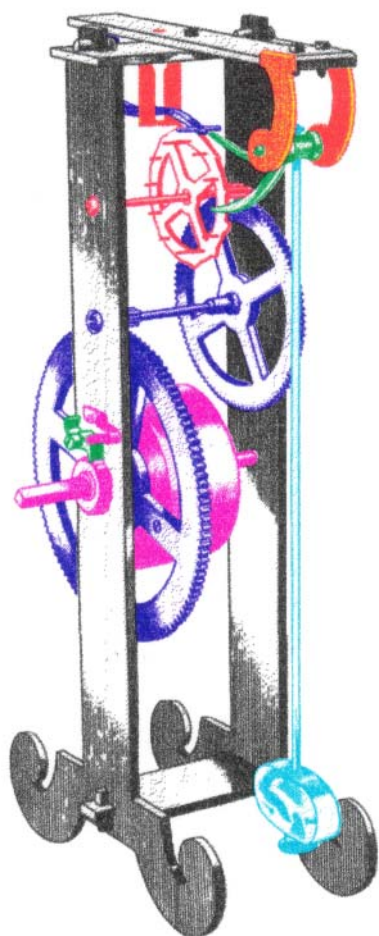
Zowel voor de efficiëntie van het verkeer als voor de veiligheid ervan is dit van groot belang.

* * * * *

Appendix: De slingerklok van Galilei

het bleef
bij een
ontwerp

Galilei kreeg het idee de **slinger** in klokken toe te passen vermoedelijk in 1641. Pas na zijn dood begon zijn zoon Vincenzo met de bouw van een klok volgens Galilei's ontwerp²⁷² (figuur 45). Vincenzo stierf echter in 1649 voordat de klok af was.



Figuur 45.
Galilei's slingerklok

Huygens zou een kopie van een deel van de²⁷³ werktekeningen hebben ontvangen. Mogelijk indirect, omdat Galilei de interesse van de Nederlandse zeevaarders in klokken kende en de Staten Generaal had benaderd met de suggestie een slingerklok te laten ontwikkelen²⁷⁴.

De klok zelf is recent volgens deze tekeningen gebouwd (Figuur 45)²⁷⁵, en heeft daardoor niet veel invloed gehad. Dit blijkt uit de aanwezigheid van een geavanceerd echappement, waarvan de principes pas later (na 1680) gangbaar zouden worden.

Omdat deze vorm van het echappement niet in de Huygensklokken voorkomt en hij zich dus niet met deze modificatie van de gangregelaar bezig heeft gehouden, is men het erover eens²⁷⁶ dat Huygens toen van dit aspect van de tekeningen niet op de hoogte was.

Huygens heeft wel, maar dan op een volkomen andere manier aan de gangregelaar gewerkt: door *teruggekoppelde systemen* te ontwerpen die de oscillatiefrequentie op een vloeiende manier

Wijzerplaat en wijzer zijn niet op de tekening aangegeven. Deze klok bevat de reeds lang bekende aandrijving met behulp van een **veer in de trommel** in plaats van een gewicht. Een **pal met palveer** houdt de **veer** na het opwinden gespannen. De daarbij gebruikelijke snek ontbreekt omdat de gangregelaar in deze combinatie goed genoeg werkt! Dit aspect is ook in de Huygensklokken terug te vinden.

²⁷² De reconstructie staat in het Science Museum in Londen.

²⁷³ Usher, p. 310.

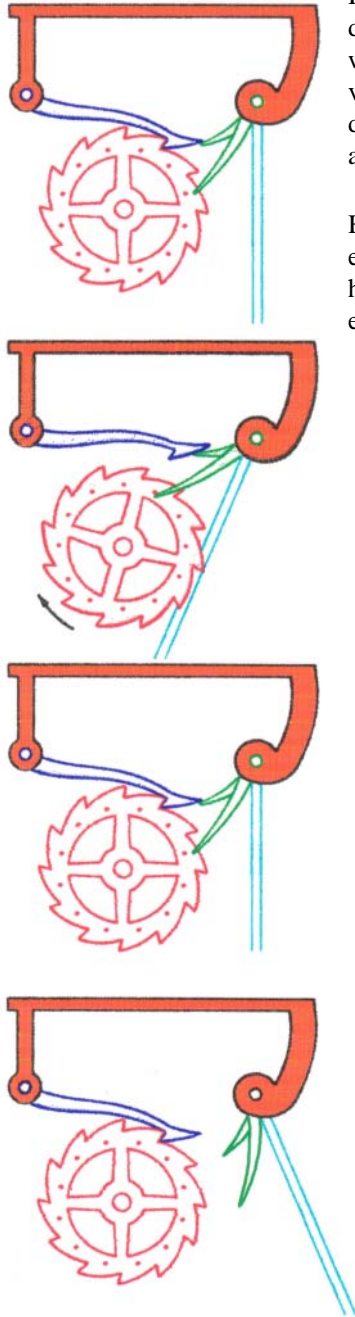
²⁷⁴ Omdat die zich bij zijn papieren bleken te bevinden (Lloyd I, p. 662). Het is (nog?) niet bekend in welk jaar hij die kreeg.

²⁷⁵ Kleurmodificatie van figuur 401 op p. 663 van Lloyd I.

²⁷⁶ Lloyd II, p.45.

Het echappement van Galilei's klok

een fraai ontwerp



Hoewel de latere ontwikkelingen van het echappement al in dat van de klok van Galilei zijn te vinden (Figuur 46)²⁷⁷ werden die pas veel later ontdekt, omdat Galilei's klok vermoedelijk alleen op papier heeft bestaan. Maar er zijn in die tijd, rond 1660, in Italië toch al enige door slingers aangedreven klokken aanwezig geweest²⁷⁸.

Het is jammer dat Galilei niet bij zijn leven contact met een echte klokkenmaker heeft opgenomen, zoals Huygens heeft gedaan. De ontwikkeling van een nauwkeurig lopend echappement zou daardoor aanzienlijk zijn versneld.

Let op de bijzondere vorm van het slingerdeel (de **twee tanden**) van het echappement.

Tanden, **kroonwiel** en **slinger** liggen in parallelle vlakken.

De **slinger** krijgt één keer per periode kinetische energie toegediend, nadat het de **pal** van het **kroonwiel** op heeft gelicht en slingert verder vrij.

Het **kroonwiel** staat dan stil.

Alleen in 'fase 2', nadat de **slinger** met de bovenste **tand** de **pal** heeft opgelicht, draait het **kroonwiel** één **tand** verder door en voegt het **kroonwiel** via de **tweede tand** energie aan de slinger toe.

Daarop fixeert de **pal** het **kroonwiel** weer.

Onduidelijk is of de vorm van de **tanden** van het **kroonwiel** en van de **pal** door een cirkelboog door de as van de **pal** worden bepaald.

In dat geval zou deze gang zelfs geen terugstoot vertonen en een 'rustende gang' zijn.

Figuur 46.
Echappement van Galilei²⁷⁷
De opeenvolgende fasen
in de werking van deze gangregelaar.

²⁷⁷ Kleurmodificatie en uitbreiding, naar Spierdijk, p. 81.

²⁷⁸ Spierdijk, pp. 83-84.

Referenties

Ahlers, W. *Kalenders.*

De Postzak nr 100, augustus 1955, pp. 213-237. ISBN 0922-7636.

Bijbel,

Enschede, Haarlem, 1903.

Bijleveld, W. *Tijd in de sterrekunde,*

p. 16-27 in Grashuis e.a.

.BIONieuws. Nieuwsmedium voor biowetenschappen en technologie.

1995, 5, nrs. 14 (9 september) en 16 (7 oktober).

Budak, A. *Passive and active network analysis and synthesis.*

Houghton Mifflin Company, Boston, 1974. ISBN 0 395 17203 9.

Combridge, J.H. The celestial balance; a practical reconstruction.

Horological Journal, vol. **104**, p. 82. Repr. Antiq. Horol. Soc., London 1962.

Daumas, M. *Precision mechanics.*

Hfdst. 13 in Singer IV, pp. 379-416.

Dekker, E. *Van een wereld die de tijd regelde naar een tijd die de wereld regelt.*

pp. 24-32 in Turner.

Dirringer, D. *Writing.*

Thames and Hudson, London, 1962.

Flood, R. en Lockwood, M. *Onomkeerbaarheid van de tijd.*

Aramith, Amsterdam, 1988 (Uit het Engels vertaald, Blackwell, Oxford, 1986).

ISBN 90-6834-044-1.

Ferking, M.E. *Crystal oscillator design and temperature compensation.*

Van Nostrand Reinhold Company, New York, etc., 1978. ISBN 0 442 22459 1.

Goldschmidt, T. *Darwins hofvijver.*

Prometheus, Amsterdam, 1995. ISBN 90 5333 255 3.

Grashuis, J. e.a. *Wat is tijd?*

Rotterdamse Kunststichting, Rotterdam, 1983.

ISBN 90 6686 501 6 (n.a.v. een tentoonstelling over tijd).

Grimbergen, C.A., Lazoe, D., Tweel, L.H. van der & Wijnberg, C.J.

Willem Barentsz en zijn Uurwerk, tentoonstelling 1596-1996.

Stichting Zaans Uurwerkmuseum, Zaandam, 1996.

Hartman, T. en Kornack, F.C. *Groningen, Gids voor cultuur en landschap.*

Profiel, Bedum. ISBN 90 5294 103 3.

Hartmann, W.K. *Astronomy: the cosmic journey.*

Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1978. ISBN 0 534 00546 2,

Hawkins, J. en Woolley, L. *Prehistory and the beginnings of civilization. Vol. 1.*

Harper & Row, New York and Evanston, 1963.

Hope-Jones, E. *Electrical timekeeping*.
N.A.G. Press, London, 1940, 2d ed. 1949, facsimile edition, April 1976,
ISBN 7198 0070.

Hose C. & McDougall, W. *Pagan tribes of Borneo*.
MacMillan, London, 1912.

Hero, Encyclopedie, MS. Scal. 45.
Grieks handschrift, in de verzameling van de Universiteits Bibliotheek te Leiden.

Jacobs, H.R. *Geometry*
Freeman and Company, San Francisco, 1974. ISBN 0-7167-0456-0
(voor de -ingekleurde- tekening die op blz. 39 is gereproduceerd, afkomstig van p. 573).

Janich, P. *Die Protophysik der Zeit*.
Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1980. ISBN 3-518-06416-9.

Jelinek, J. *De grote encyclopedie van de mens in de oertijd*.
Praag, 1972. Nederlandse vertaling 1974. Holland, Haarlem, 1974. ISBN 90 251 0225 5.

Jespersen, J and Fitz-Randolph, J. *From sundials to atomic clocks*.
Understanding time and frequency.
Dover Publications, Inc. New York, 1982. ISBN 0 486 24265 X.

Jones, H.S. *The Calendar*.
Hfdst. 21 in Singer, III. pp. 558-581.

Kamas, J and Lombardi, M.A. *Time and frequency users manual*,
NIST Special Publication 559 (revised 1990).
National Institute of Standards and Technology, Washington, 1990.

Kline, M. *Mathematical thought from ancient to modern times*.
Oxford University Press, New York, 1972.

Koch, R. *Bi-Lexikon Uhren und Zeitmessung*
Bibliographisches Institut, Leipzig, 1987. ISBN 3 323 00100 1.

Kuipers, L en Timman, R. *Handboek der wiskunde*.
Scheltema & Holkema, Amsterdam, 1963.

Laan, K. *ter, Nederlandse spreekwoorden, spreuken en zegswijzen*.
24ste druk. Elsevier, Amsterdam [etc], 1988. ISBN 90 10 0320 2.

Leach, E.R. *Primitive Time-reckoning*.
Hfdst. 5 in Singer I, pp. 110-127.

Leopold, J. H. (Leopold I). *The Almanus manuscript*.
Slaats- und Stadbibliothek Augsburg Codex in 2^o no. 209.
Rome circa 1475 - circa 1485.
Hutchinson & Co. (Publishers) Ltd, London 1971. ISBN 0 09 099750 6.

Leopold, J.H. (Leopold II). *Uurwerken*.
Grote Winkler Prins Encyclopedie, deel 19, pp. 34-38.
Elsevier, Amsterdam, Brussel, 1975. ISBN 90 10 000060 5.

- Lloyd, H. Allan. (Lloyd I). *Mechanical timekeepers*.
Hfdst. 24 in Singer III, pp. 648-675.
- Lloyd, H. Allan. (Lloyd II). *Some outstanding clocks over seven hundred years 1250-1950*.
Leonard Hill Ltd, London, 1958.
- Lübcke, A. *Das grosse Uhrenbuch. Von der Sonnenuhr zur Atomuhr*.
Verlag Ernst Wasmuth, Tübingen, 1977. ISBN 3 8030 6006 0.
- Medawar, B.P. & Medawar, J.S. *Aristotle to Zoos. A philosophical dictionary of biology*.
Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1983. ISBN 0 674 04535.
- Meyer, H.W. *A History of Electricity and Magnetism*.
MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1971. ISBN 0 262 13070 X.
- Mitton, S. ed. *The Cambridge encyclopaedia of astronomy*.
Jonathan Cape, London, 1977. ISBN 0 224 01410 9.
- Morpurgo, E. *Nederlandse klokken- en horlogemakers vanaf 1300*.
Scheltema & Holkema, Amsterdam, 1970. ISBN 90 6060 006 1.
- Needham, J. (Needham III) *Science and civilisation in China*.
Vol. III. Mathematics and the sciences of heaven and earth.
At the University Press, Cambridge, 1959.
- Needham, J. (Needham IV-2) *Science and civilisation in China*,
Vol. IV: Physics and physical technology, Part 2: Mechanical engineering.
At the University Press, Cambridge, 1965.
- Neugebauer, O., *Ancient mathematics and astronomy*.
Hfdst. 31 in Singer I, pp. 785-804.
- Peters, Ellis, A. *Morbid taste for Bones, A mediaeval whodunit*.
Futura publications, Macdonald & Co (Publishers) Ltd, London 1984.
ISBN 0 7088 2-552 4 (first published in 1977 by Macmillan London Ltd.).
- Pippard, A.B. *The physics of vibration. Vol. 1. The classical vibrator*.
Cambridge University Press, Cambridge 1978. ISBN 0 521 21899 3.
- Price, D.J. *Precision instruments to 1500*.
Hfdst. 22 in Singer III, pp. 582-619.
- Price, D.J. *The manufacture of scientific instruments from c 1500 to c 1700*.
Hfdst. 23 in Singer III, pp. 620-647.
- Sawelski, F.S. *Die Zeit und ihre Messung*. (Vertaald uit het Russisch, 1972).
Verlag Harri Deutsch, Thun, 1977. ISBN 3 87144 288 7.
- Shallis, M. *Tijd en kosmologie*.
Hfdst. 5 in Flood & Lockwood, pp. 57-74.
- Schmidt, M.C.P., *Kulturhistorische Beiträge zur Kenntniss des Griechischen und Römischen Altertums, II Die Entstehung der Antiken Wasseruhr*.
Dürr, Leipzig, 1912.
- Singer, C., Holmyard, E.J. and Hall, A.R. (Singer I). *A history of technology*,
Vol. 1. From early times to the fall of the Ancient Empires.
At the Clarendon Press, Oxford, 1954.

Singer, C., Holmyard, E.J. and Hall, A.R. (Singer III). *A. history of technology, Vol. III. From the Renaissance to the Industrial Revolution c. 1500 – c. 1750.*
At the Clarendon Press, Oxford, 1957, herdruk 1964.

Singer, C., Holmyard, E.J. and Hall, A.R. (Singer IV). *A. history of technology, Vol. IV. The Industrial Revolution c. 1750 - c. 1850.*
At the Clarendon Press, Oxford, 1958, herdruk 1967.

Spierdijk, C. *Klokken en klokkenmakers, zes eeuwen uurwerk 1300-1900.*
J.H. de Bussy, Amsterdam, 1962.

Turner, A.J. *Tijd.*
Catalogus van een tentoonstelling over Tijd.
Stichting Tijd voor Tijd en de auteurs. Amsterdam 1990. ISBN 90 12 06856 8,

Usher A.P. *A History of Mechanical Inventions.*
Hfdst.7: *Water Clocks and Mechanical Clocks: 16 B.C. - A.D. 1500*
Revised Edition, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1954
(4th printing 1970).

Vaux, C. de, Notice sur deux manuscrits Arabes.
J Asiat. b, 1891. Band 17, pp 287-322.

Veen, S.C. van. *Gewone differentiaalvergelijkingen*
Hfdst. VIII in: Kuipers en Timman. (pp. 326-373).

Vos, J.E. en Vos de Wael, L.R.M. *Cesiumklok.*
Grote Winkler Prins Encyclopedie, deel 5, pp. 249-250.
Elsevier, Amsterdam, Brussel, 7^e druk, 1971. ISBN 90 10 00046 X.

Vries, J. de, en De Tollenaere, F. *Etymologisch woordenboek.*
Aula pocket 6, Het Spectrum, Utrecht/Antwerpen, 13e druk, 1983.
ISBN 90 274 481.2 4.

Wiedemann, E. Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften
X. Sitzungsberichte der Physikalisch-medizinische Sozietät in.Erlangen,
vol. **38**, 1907.

Winter, M.de, *Tijdsbeelden.*
pp. 49-62 in Grashuis, e.a.

(17-01-2005): Helaas heb ik bij het schrijven het volgende boek gemist:
F.A. Hofer, *Geschiedenis der openbare tijdsaanwijzing*, Brill, Leiden, 1887.

In Nederlandse musea tentoongestelde of in depot aanwezige uurwerken en boeken

Uurwerken die in directe relatie staan tot de in de tekst genoemde ontwikkelingen worden hieronder met naam en nummer genoemd. De voetnoten in de tekst verwijzen naar de hieronder genoemde klokken. De nummers verwijzen naar de nummering die in het genoemde museum in 1995 werd gebruikt. Sommige relevante klokken zijn niet regulier tentoongesteld maar **in depot aanwezig**.

Zaans Uurwerkenmuseum

Kalverringdijk 3, Zaanse Schans, 1509 BT Zaandam, ☎075 6179769.

Open: mrt t/m oct dagelijks 10-17 u, nov t/m febr za, zo, feestdagen 12-17 u.

Overzicht en historie van het Nederlandse mechanische uurwerk 1500-1850.

Replica van de **Egyptische waterklok** uit ca -1550, gevonden in de tempel van Amon te Karnak (Egypte).

Werkende replica van het 16^e eeuwse **Willem Barentsz uurwerk met spillegang en balanswiel**²⁸⁰.

Werkende spillegang met balans in toren-uurwerk uit ca 1520.

Huygens-slinger klok met veer-aandrijving, spillegang en cycloïde boogjes, tussen 1657 en 1659 gemaakt door Salomon Coster.

Huygens slingerklokken, idem, gemaakt door leerlingen van Coster:

ca 1660, gemaakt door Severijn Oosterwyck te Den Haag,

ca 1665, gemaakt door Pieter Visbach te Den Haag en

ca 1670, gemaakt door Louis Le Verroux te Parijs.

Fraaie **werkende anker gang in torenuurwerk met slinger, uit 1740, met goed zichtbare terugwerking.**

Standaard horloge met slinger en anker gang (niet zichtbaar) **in werking**, in 1785 gemaakt door Reyn de Jong te Westzaandam.

Een van de eerste klokken waarvan de secondewijzer centraal is aangebracht, boven de uren- en minutenwijzers, nr. 24 (boven).

De aanwezigheid van de terugwerking is zichtbaar in het gedrag van de secondewijzer.

Bijzonder mooie **werkende pennengang in torenuurwerk met slinger**, uit ca 1700, met carillon.

Hoewel de pennen iets zijn afgesleten is er nog geen terugslag zichtbaar.

Precisie-uurwerk (regulateur) met pennengang (niet zichtbaar) en roosterslinter (zichtbaar), **in werking**, uit 1840, gemaakt door F. Knebel.

Boerhaave Museum

Lange St. Agnietenstraat 10, 2312 WC Leiden. ☎071 5214224.

Open: di t/m za 10-17 u, zo 12-17 u.

Bibliotheek: ma t/m vr 9-17 u. .

Fraaie **veertrommel plus snek in zonneuurwerk (heliostaat) van van der Cloesen uit 1730.**

Grote **Christiaan Huygens collectie**, inclusief

- de verschillende typen slingerklokken (alle met spillegang): met gewicht als aandrijving:

van Salomon Coster, Den Haag, uit 1657, met gewicht. Nr 9853.

De oudste nog bestaande Huygens klok.

van Isaac Thuret, Parijs, ca 1675. **Met secondewijzer.** Nr 9854.

- met **veertrommel** als aandrijving:
 - van Claude Pascal (een concurrent van Coster), Den Haag 1660. Nr 6503.
 - van Severijn Oosterwijck (een leerling van Coster), Den Haag 1665. Nr 6504.
 - van Peter Visbach (de opvolger van Coster), Den Haag 1670. Nr 6504
 - van Johannes van Ceulen, Den Haag 1695. Nr 9727.
- met **onrust en spiraalveer**:
 - Planetarium van Christiaan Huygens, gemaakt door Johannes van Ceulen, Den Haag, in 1682.
 - Het enige overgebleven mechanisme van Huygens met een onrust.
- **Werken van Huygens over klokken**, o.a.:
 - Horologium, Den Haag, 1658,
 - opengeslagen op de beroemde tekening van de slingerklok.
 - Blad met aantekening over de cycloïde boogjes.
 - Blad met uitwerking van de ontdekking op 1 december 1659, van de isochroniciteit van de cycloïdale slinger.
 - Blad met schets van de parabolisch-conische slinger (zie hieronder) uit 1665.
- Reconstructies van klokken die Huygens voor de zeevaart ontwikkelde**
 - (begane grond), waarvan de meeste **in werking** worden getoond:
 - met horizontale spillegang:
 - Cylindrische slinger**, hangend aan drie draden, uit 1683.
 - Driehoekslinger** uit 1686 (niet in werking).
 - Met **trommelveer** en '**kopstaande**' spillegang.
 - Balansslinger** uit 1694.
 - *met terugkoppeling in plaats van een echappement*:
 - Conische slinger** uit 1659. Aan de slinger hangt (via katrollen) een gewicht dat gedeeltelijk in een vat kwik is gedompeld, waardoor de draadlengte en daarmee de slingerperiode automatisch op peil wordt gehouden.
 - Ronddraaiende parabolische goot**, waarin twee losse kogels voor de terugkoppeling zorgen (maar hun gewicht blijkt gering te zijn in vergelijking tot dat van de goot. Het systeem mist dus gevoeligheid.
 - Parabolisch-conische slinger**. De voorloper van de reguleur van Watt!

Teylers Museum

Spaarne 16, 2011 CH, Haarlem, ☎023 531901.0.

Open: di t/m za 10-17 u, zo, feestdagen 13-17 u.

Boeken van Huygens over klokken (in depot).

Demonstratiemodel van de **isochrone slinger aar Huygens** (achter glas).

Een **werkende astronomische klok uit 1865 met kwik-compensatieslinger**.

Enkele elektrische klokken.

** Tijdelijk tentoongesteld.

Nederlands Goud-, Zilver- en Klokkenmuseum

Kazerneplein 4, 2871, CZ Schoonhoven, ☎0182 385612.

Open: di t/m zo 12-17u.

Grote collectie uurwerken, van torenuurwerken tot horloges, 1500-1930, inclusief veel fraaie elektromechanische uurwerken.

Werkende spillegang met balans in torenuurwerk uit 1830, terugslag zichtbaar, nr. TD 183.

Veertrommel en snek: goed te zien bij verschillende exemplaren van het onderdeel horloges, met name aan de achterkant (achter in de zaal, niet in werkende toestand).

Comptoire **slingerklok met werkende horizontale spillegang**, begin 19e eeuw, **terugwerking zichtbaar**, nr. WA 119.

Torenuurwerk met slinger en pennegang uit 1888, **in werking**.

Zou geen terugwerking moeten hebben, maar vertoont dit door slijtage van de pennen.

Bijzonder fraaie **Hope-Jones elektromechanische reguleur** (slingerklok) uit ca **1920**, fabrikaat Synchronome, London, nr. EAU 109.

Niet inwerking. Invar slinger.

Identiek met het **rechter deel van de Shortt klok** (zonder de synchronisator).

Verschillende andere interessante elektromechanische uurwerken.

Het Nederlands PTT Museum

Zeestraat 82, 2518 AD 's-Gravenhage, ☎070 3307500.

Open: ma t/m vr 10-17 u, za, zo, feestdagen 12-17u.

Elektronische uurwerken (van kwartsklok tot atoomstandaard).

Elektromechanische telegraaf met door gewicht aangedreven en zelf te bedienen 'ankergang'

die een letter aanwijst n.a.v. het aantal ontvangen elektrische stroomstoten.

Omdat er geen oscillator aan is gekoppeld vertoont deze 'gang' geen terugwerking.

In depot:

- vroege **elektronische lamposcillator** (uit **1920!**) (in houten kastje).
inventaris nr. 10242

Deze oscillator is vermoedelijk gebouwd naar het patent van Armstrong uit 1919.

Zij genereert frequenties in het toen voor de telefonie gebruikte spraakgebied tussen 600 en 2000 Hz.

De oscillator werd tussen 1920 en 1935 gebruikt om demping en overspraak aan interlokale kabels te meten.

De lamp moet herhaaldelijk zijn vervangen. Nu zit er een vroege uitvoering in van de -voor het eerst in 1925 gefabriceerde- Philips A 410 Miniwatt triode.

- **kwartoscillatoren** (inclusief fraaie demonstratieversies),

- demonstratiemodel oscillerende kwartsring, inventaris nr. 31232,

- demonstratiemodel frequentienauwkeurigheid van een kwartskristal, inventaris nr. 31391,

- kwarts frequentiestandaard, inventaris nr. 32410.

- verschillende kwartskristallen in houder.

- **atoomklokken**:

- in originele kastjes, waardoor er weinig aan is te zien:

- **rubidium standaard**, inventaris nr.45469,

- **cesium standaard**, inventaris nr. 45467.

- rubidium standaard in 'doorgesneden' versie!

Studieverzameling Elektrotechniek (Technische Universiteit Delft)

Mekelweg 4, 2628 CD Delft, ☎ 05 2785757.

Alleen op afspraak, met rondleiding, za, zo en feestdagen gesloten.

Allerlei elektronische apparaten en onderdelen, o.a.:

Oude radiolampen

Prototype verschilfrequentie-oscillator (zwevings-toongenerator),

Ontworpen door Ir. Huydts voor Philips in **1930**

en commerciële uitvoering 1937 (Philips, type CM 22307)

'De werking berust op twee frequentieoscillatoren, waarvan de verschilfrequentie als uitgangssignaal dient. Deze is daardoor heel nauwkeurig in te stellen (mits de originele frequenties niet te dicht bij elkaar komen ('phaselock')).

Werkende reguleur met Grahamgang en kwik-compensatieslinger.

Het uurwerk is geheel mechanisch. De gewichten worden via relais automatisch opgehesen. Het tijdssignaal wordt vanuit de moederklok elektrisch naar een nevenklok gestuurd.

Doordat de wijzerplaat van glas is gemaakt is de werking van deze fraaie mechanische klok, met name de Grahamgang, goed te zien.

Rijksmuseum Muiderslot

Herengracht 1, 1398 AA, Muiden, ☎ 0294 261325

Open: 1 apr t/m 31 okt: ma t/m vr 10-16 u, za, zo, feestdagen 13-16 u;

1 nov t/m 31 mrt: za, zo 13-15 u.

Gesloten: 1 ja, 25/26 dec

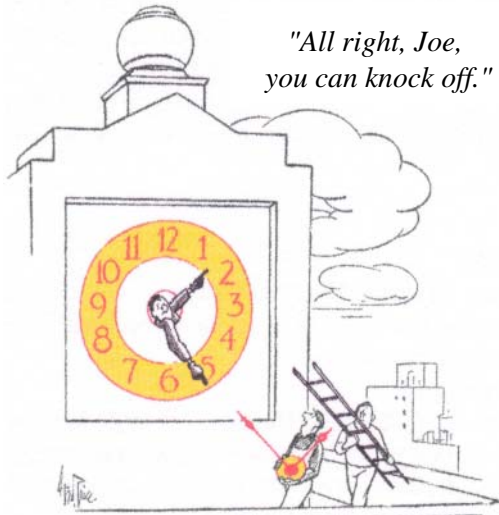
Braadspit uit 1640 van Christiaan Huygens (?) in de keuken van het Muiderslot.

Het spit wordt door een **grote trommelveer met snek** aangedreven.

Wanneer de veer ongeveer was afgelopen werd het slagwerk geactiveerd om aan te geven dat het speenvarken gaar was.

Dit gegeven werd evenals de uitbreiding van noot 142 op blz. 34 toegevoegd vanaf exemplaar nr. 77.

*"All right, Joe,
you can knock off."*



DRAWING BY GEO. PRICE © 1950 THE NEW YORKER MAGAZINE INC.