

Nederlands Tijdschrift voor

Natuurkunde

mei 2013-jaargang 79-nummer 5



Hoe werkt
een astrolabium?

Wij gaan naar de sauna!
Virussen onder spanning

Hoe werkt een astrolabium?

Theorie en geschiedenis van het middeleeuwse polshorloge

De basisprincipes van het astrolabium werden in de hellenistische wereld door de sterrenkundige Hipparchus uitgevonden. In de middeleeuwen ontwikkelden islamitische geleerden het instrument verder totdat het bijna net zo gebruiksvriendelijk en wijdverbreid was als het tegenwoordige polshorloge. We leggen hier de basisprincipes van het instrument uit en laten zien hoe je er zowel overdag als 's nachts de tijd mee bepaalt. Ook kun je er eenvoudig de tijden van zonsopkomst en -ondergang mee berekenen en begin en eind van de schemering. In een vervolgartikel zullen we de praktische nauwkeurigheid van het instrument bespreken. Eric Kirchner

140

In de Grieks-hellenistische oudheid bepaalden astronomen zoals Hipparchus (190-120 voor Christus, Rhodos) de posities van hemellichamen met een zogenaamd armillarium (figuur 1). In dit instrument representeren de vele ringen volgens diverse coördinaatsystemen hemelcirkels. Zo wordt de positie van bijvoorbeeld de zon of een ster bepaald door zowel de hoek boven de horizon als de azimutrichting (richting vanaf het noorden). Door de draaiing van de aarde

verschuiven deze coördinaten echter gedurende dag en nacht. Het is daarom beter om poolcoördinaten te gebruiken, gerefereerd aan de rotatie-as van de aarde. Met zo'n armillarium kunnen posities in beide coördinaatsystemen worden afgelezen. De dierenriem (ecliptica) – de lijn aan de sterrenhemel waarlangs de zon gedurende het jaar beweegt – neemt een belangrijke plaats in op het armillarium.

Om voldoende nauwkeurig te kunnen waarnemen is een vrij groot en dus zwaar armillarium nodig. Hipparchus begreep als eerste dat in plaats van het armillarium het ook mogelijk moet zijn om een tweedimensionale stereografische projectie van de hemelcirkels te gebruiken. Hiermee was de theoretische basis voor het astrolabium gelegd.

In de Grieks-hellenistische tijd werden de eerste theoretische verhandelingen over het astrolabium geschreven, maar het is niet duidelijk in hoeverre het instrument toen al werkelijk gebruikt werd. Het

oudst bewaard gebleven astrolabium is in Irak gevonden en dateert uit de achtste eeuw na Christus. Vele honderden astrolabia uit latere eeuwen zijn inmiddels teruggevonden, vooral in de islamitische wereld. Uit deze vondsten uit verschillende perioden is gebleken dat in de middeleeuwen het instrument nog aan grote veranderingen onderhevig is geweest.

In West-Europa duiken beschrijvingen van astrolabia op vanaf de elfde eeuw. In de veertiende eeuw maakte Geoffrey Chaucer de eerste Engelstalige beschrijving van het astrolabium. In de vijftiende en zestiende eeuw gebruikten ontdekkingsreizigers zoals Columbus en Vasco da Gama een (sterk vereenvoudigd) astrolabium tijdens hun ontdekkingsreizen. De beste moderne beschrijving van astrolabia werd door North opgesteld [1], maar een recentere tekst van Hoskin is ook heel goed leesbaar [2]. Wie een meer diepgaande analyse zoekt kan terecht bij Morrison [3] of King [4]. Dit inleidende artikel is voor een

Eric Kirchner (1966) studeerde theoretische natuurkunde in Utrecht, en promoveerde in de Quantumchemie aan de Vrije Universiteit Amsterdam. Vanaf 1996 werkt hij als onderzoeker voor een chemische onderneming en onderzoekt de optica van autolakken.



ekirchnr@xs4all.nl

groot deel gebaseerd op deze bronnen.

Stereografische projectie

De stereografische projectie die Hipparchus bedacht, gaat uit van de zogenaamde hemelbol. Dit is de bol die de rand van het heelal voorstelt volgens de oude Grieken. Zon, maan, planeten en sterren bevinden zich zo ver van de aarde dat we mogen doen alsof ze zich allemaal op de hemelbol bevinden. Elk punt van de hemelbol wordt vervolgens geprojecteerd op een vlak dat de aardse evenaar bevat. De stereografische projectie voer je uit door een lijn te trekken vanaf het hemellichaam op de bol P tot aan de zuidpool van deze bol (figuur 3). Het geprojecteerde punt P' is het snijpunt van deze lijn met het vlak door de aardse evenaar.

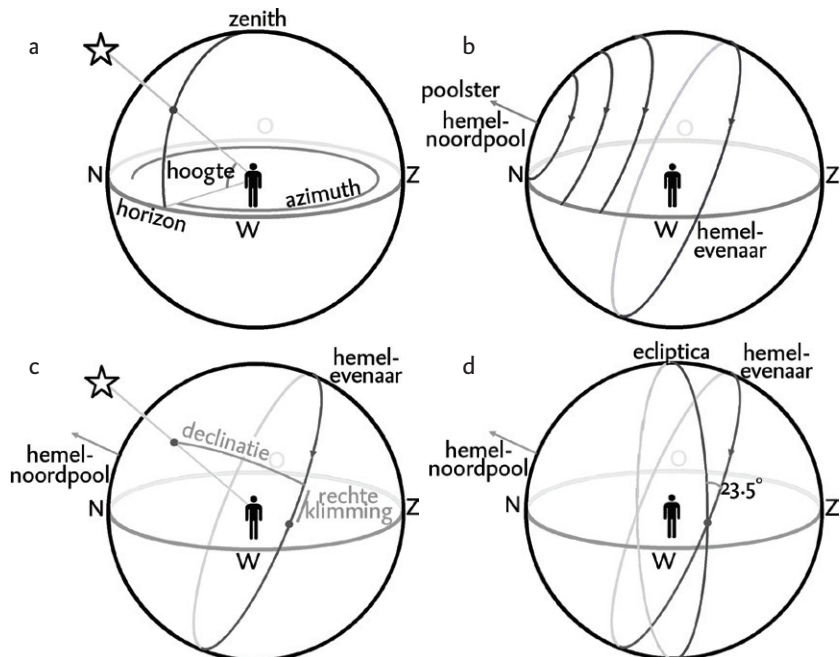
Uit deze definitie van de projectie volgt dat de evenaar in het vlak van projectie (oftewel de 'mater') en de hemelcirkels die evenwijdig lopen aan dit vlak (zie figuur 2b) na projectie in dit vlak een set concentrische cirkels vormen met als centrum de geprojecteerde hemelnoordpool. Op de mater van een astrolabium is deze verzameling concentrische cirkels goed te zien (figuur 3).

De verzameling cirkels die je krijgt voor verschillende hoogtes boven de horizon worden in de stereografische projectie afgebeeld op een reeks niet-concentrische cirkels (figuur 3). De grootste van deze zogenaamde hoogtecirkels die nog afgebeeld wordt in een astrolabium is de projectie van de horizon. Ook de projectie van de ecliptica wordt op een astrolabium aangegeven en vormt daar een excentrisch gepositioneerde cirkel (figuur 3).

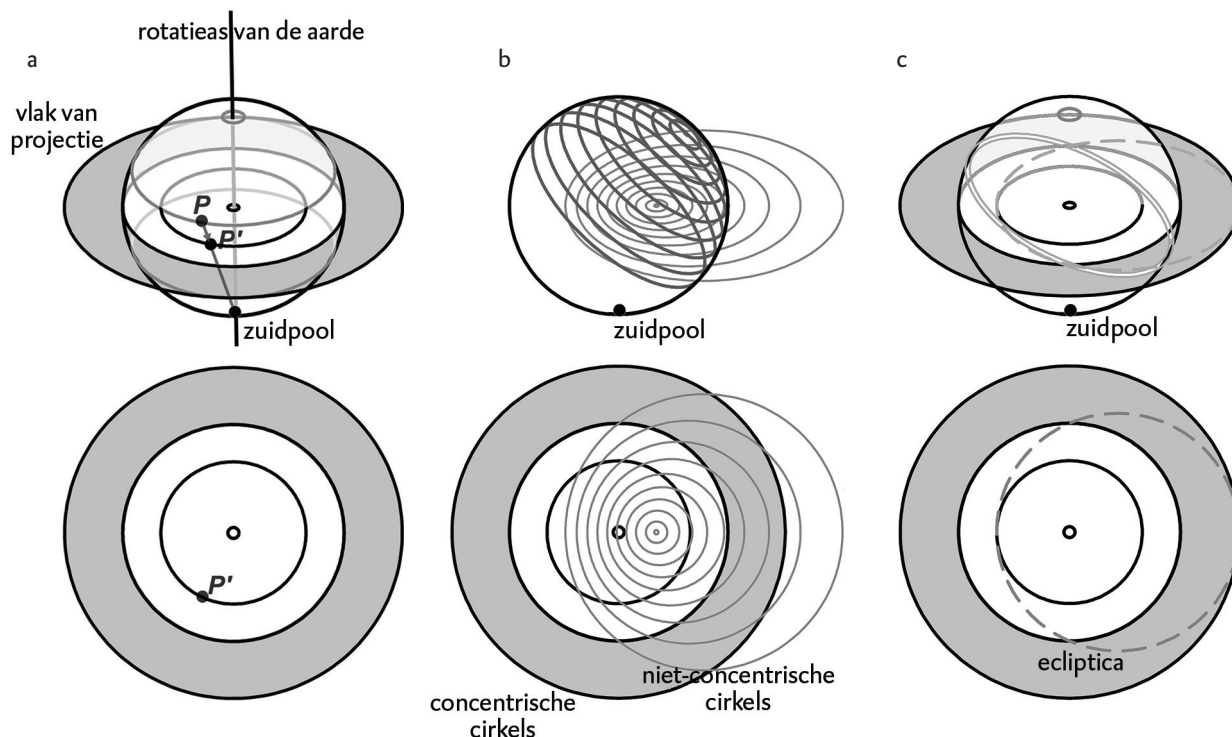
Een prettig kenmerk van de stereografische projectie is dat hemelcirkels op cirkels geprojecteerd worden (of op een lijn, in een gedegenereerd geval). Daarbij blijft de grootte van de hoeken in deze projectie aan de hemel behouden en blijven bijvoorbeeld sterrenbeelden na projectie goed herkenbaar. Een belangrijk nadeel van deze projectie is dat hij afhangt van de positie van de hemelpolen. Aangezien de hemelnoordpool zich voor een waarnemer op de noordpool recht boven zijn hoofd bevindt, maar voor een waarnemer op de aardse evenaar juist aan de horizon, is deze projectie jammer genoeg afhankelijk van de breedtegraad



Figuur 1 Met een armillarium kan de positie van een hemellichaam aan de hemel worden gemeten volgens verschillende coördinatenstelsels.



Figuur 2 a) De positie van bijvoorbeeld een ster kan worden uitgedrukt in hemelcoördinaten: hoogte boven de horizon en azimuth. b) Verandering van hemelcoördinaten gedurende dag en nacht, vanwege de rotatie van de aarde om zijn as. c) Equatorcoördinaten drukken de positie uit ten opzichte van de hemelevenaar en de rotatie van de aarde. d) De ecliptica (zonnebaan) maakt een hoek met de hemelevenaar.



Figuur 3 Projecties van de belangrijkste hemelcirkels na stereografische projectie. a) Boven: een punt P belandt daarbij op plaats P'. Beneden: hemelcirkels met constante hoogte boven de hemelevenaar worden afgebeeld als concentrische cirkels op de rete. b) Hemelcirkels met constante hoogte boven de lokale horizon worden afgebeeld op een reeks niet-concentrische cirkels op de mater. c) Projectie van de ecliptica, die zich ook op de rete bevindt.

waarop de waarnemer zich bevindt. Islamitische astronomen bedachten overigens al in de negende eeuw geavanceerdere methodes die het instrument onafhankelijk maken van de geografische positie van de waarnemer.

Opbouw van het astrolabium

De belangrijkste onderdelen van een astrolabium zijn de 'mater', de 'rete' en de 'alidade'.

In figuur 4a zie je dat in de mater de stereografische projecties zijn gegraveerd van de cirkels voor de lokale horizon en de hemelcirkels met constante hoogte boven de horizon (zie ook figuur 3b).

De rete is een opengewerkte plaat met de stereografische projectie van de meest opvallende sterren aan de hemel en de ecliptica. In figuur 4b zien we de rete van een van de astrolabia waar we hemelwaarnemingen mee zullen gaan doen. In het grijs zijn daarbij in stereografische projectie de posities van enkele belangrijke sterren aan de nachthemel getekend (zie ook figuur 3a). We zagen in figuur 1b al dat in de loop van de nacht de sterren aan de hemel rond de hemelnoordpool draaien. Omdat in de stereografische projectie de hemelnoordpool de centrale plek inneemt, betekent dat dat de rete (met daarop de

posities van de sterren) roteert ten opzichte van de mater.

Om tegelijk de hemelcoördinaten onder de rete met de sterrenhemel op de mater te laten zien, zouden de vroegere makers van astrolabia ongetwijfeld graag transparant plastic of een ander doorzichtig materiaal hebben gebruikt. Helaas was dat destijds niet voorhanden. Dit probleem werd opgelost door de rete als een open netwerk uit te voeren (rete is dan ook Latijn voor net). Sterposities worden aangegeven door de uiteinden van de puntige uitsteeksels op de rete.

Door de rete ten opzichte van de mater te laten roteren kan een waarnemer de sterren rond de hemelnoordpool laten cirkelen, zoals dat elke nacht aan de hemel gebeurt. En omdat de positie van de zon zich ergens op de ecliptica bevindt, kun je op dezelfde manier de dagelijkse beweging van de zon aan de hemel nabootsen.

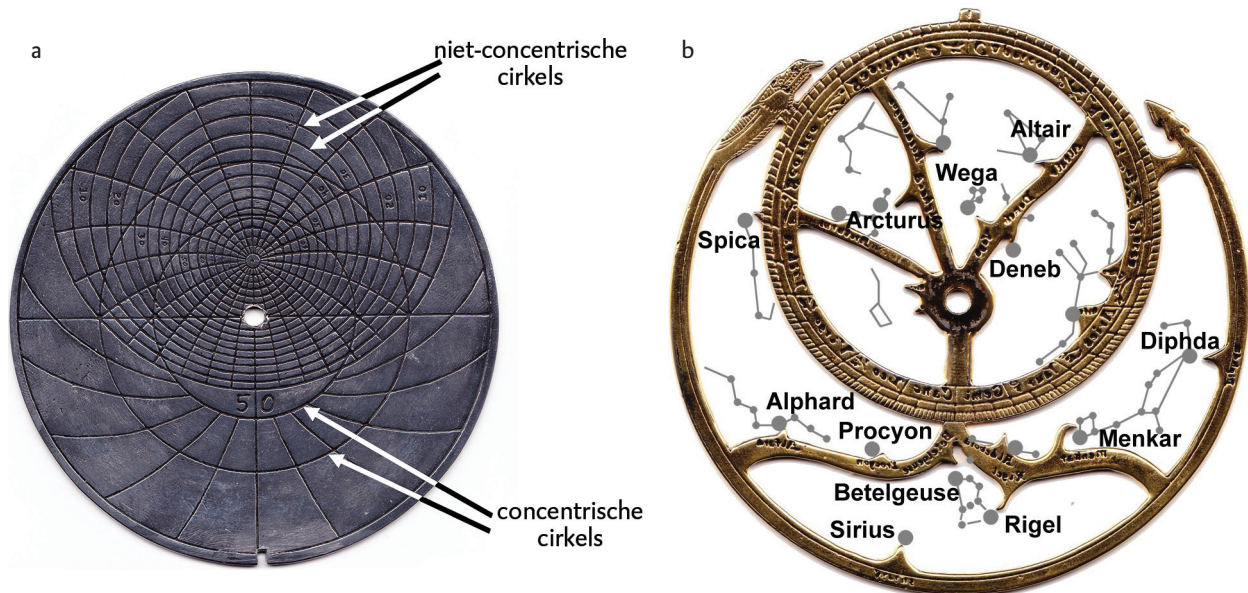
Het onderling roteren van rete en mater gaat heel gemakkelijk omdat ze met een pin door het middelpunt met elkaar zijn verbonden (figuur 5). Dezelfde pin houdt ook de alidade vast. Dit is een soort wijzer die werd gebruikt om de hoogte van de zon of van een ster boven de horizon te meten. De alidade wordt op een hemellichaam gericht en met een graden-

markering aan de buitenrand van de astrolabe kun je dan de hoogte van dat hemellichaam boven de horizon aflezen.

Tijdmeting

Met een astrolabium kun je overdag de tijd als volgt meten (figuur 6). Allereerst meet je met behulp van de alidade en de gradenmarkering de hoogte H van de zon boven de horizon (figuur 6a). Vervolgens zoek je langs de rand van het astrolabium de datum van de waarneming op. Met de alidade als lineaal vind je dan de bijbehorende positie van de zon aan de ecliptica (figuur 6b). Een datum van 26 juni komt dan bijvoorbeeld overeen met een zonnepositie van 5° in het sterrenbeeld Kreeft (en inderdaad staat de zon dan op die plek aan de hemel). Je ziet aan dit voorbeeld al dat de conversie van datum naar zonnepositie in feite plaatsvindt met een tabel die ingegraveerd is in het astrolabium.

We draaien nu het astrolabium om, zodat we de kant met de rete zien. Op de rete lokaliseer je het punt P op de eclipticacirkel waar de zon zich kennelijk bevindt (figuur 6c). Vervolgens draai je nu de rete ten opzichte van de mater, totdat het punt P op de rete samenvalt met een hoogtecirkel met waarde H op de mater. Daarna draai



Figuur 4 a) De mater bevat de stereografische projectie van de lijnen van constante hoogte boven de lokale horizon (zie ook figuur 3b). b) De puntige uitsteeksels op de rete wijzen naar de belangrijkste sterren aan de hemel (zie ook figuur 3a).

je bovendien de wijzer zover dat deze precies door het punt P gaat. In het verlengde van dat punt wijst de wijzer dan naar een uurmarkering aan de rand van het astrolabium. Hiermee hebben we de lokale tijd gevonden! In de middeleeuwen en zelfs tot aan het begin van de twintigste eeuw zouden we nu klaar zijn geweest met de tijdmeting. Maar honderd jaar geleden werd er een landelijke tijd ingevoerd en tegenwoordig volgen onze klokken zelfs de Central European Time (CET), die een uur later is gedefinieerd dan de lokale tijd in Greenwich in Engeland (Greenwich Mean Time). Omdat de geografische oost-westcoördinaten worden uitgedrukt ten opzichte van één of meer sterren boven de horizon kunnen we de lokale tijd T_{lokaal} die met een astrolabium is gemeten, omzetten in klokkentijd T_{CET} met behulp van de volgende formule:

$$T_{\text{CET}} = T_{\text{lokaal}} - \frac{\varphi_{\text{OL}}}{15^\circ} \text{uur} \quad (1)$$

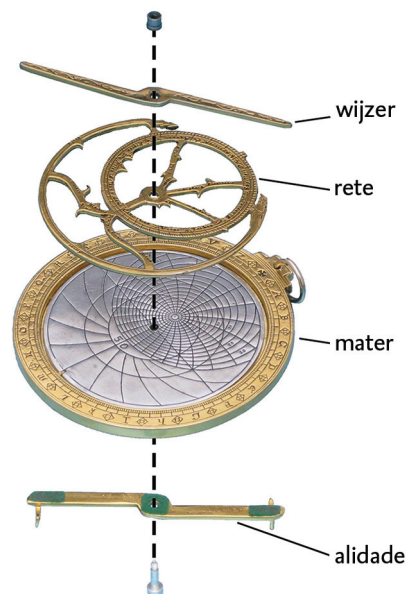
waarin φ_{OL} de geografische oosterlengte is en waarbij we moeten bedenken dat de aarde in 24 uur over 360° om zijn as draait (dus 15° per uur). Voor de stad Leiden, dat op $5^\circ 9' 20''$ oosterlengte ligt, bedraagt de correctie 20 minuten en 37 seconden. Uiteraard moet daar in de zomer nog een uur zomertijd bij opgeteld worden. Hiermee hebben we de tijdmeting overdag afgerond. In een volgend artikel zullen we de nauwkeurigheid van deze tijdmeting bekijken. In de hierboven beschreven methode gebruikten we de meting van de zon-

nehoopte als invoerparameter. Daarmee is het astrolabium complementair aan de zonnwijzer, die immers niet de zonnhoogte gebruikt maar de richting waarin de zon (of liever gezegd, haar schaduw) staat. Een belangrijk nadeel van het gebruik van de zonnrichting is dat het instrument daardoor heel precies gericht moet blijven. Er bestaan dan ook geen reisuivoeringen van zonnwijzers, maar wel van astrolabia.

In tegenstelling tot zonnwijzers hebben astrolabia bovendien nog het voordeel dat ze ook 's nachts gebruikt kunnen worden. We kunnen immers met het astrolabium de hoogte van één of meer sterren boven de horizon meten en dan weer de rete ten opzichte van de mater draaien totdat deze sterrenhoogtes correct op het astrolabium zijn aangegeven. Vervolgens bepalen we dan uit de datum weer de zonnepositie aan de ecliptica. Met de wijzer extrapoleren we deze zonnepositie (die zich inderdaad op het astrolabium onder de horizon zal bevinden) naar een uurmarkering.

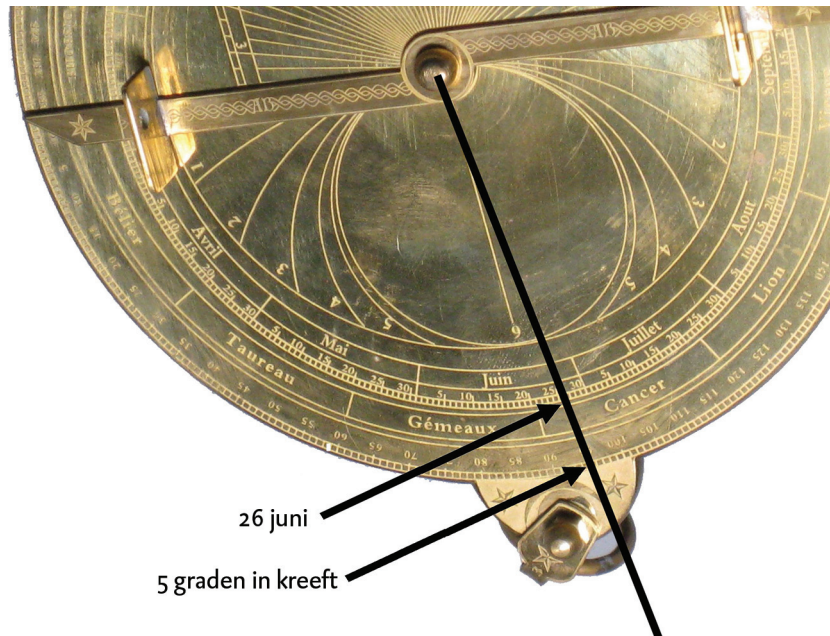
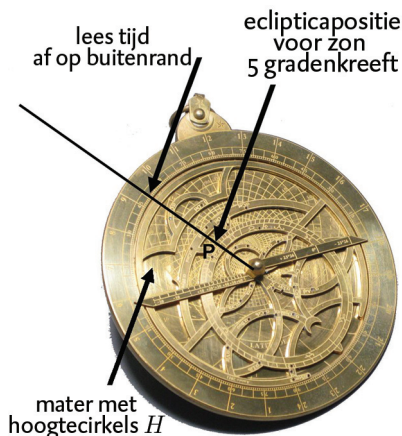
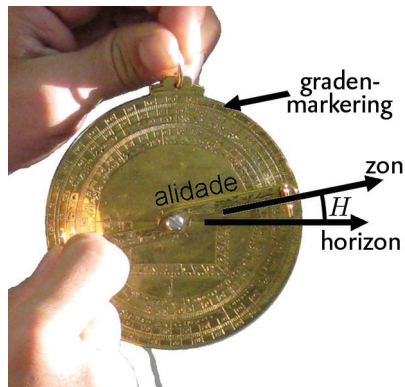
Zonsopkomst, -ondergang en schemering

Uit het voorgaande blijkt dat we het astrolabium ook kunnen gebruiken om te voorspellen hoe laat de zon opkomt of ondergaat. Zeker in islamitische landen is dat heel praktisch, omdat hierdoor ook gebedstijden af te lezen zijn. Het enige wat nodig is voor deze berekeningen is de datum. Hieruit wordt weer met het astrolabium



Figuur 5 De onderdelen van een astrolabium: de rete en mater tonen de stereografische projectie van sterren en lokale hemelcoördinaten. De alidade wordt gebruikt om de hoogte van een hemellichaam boven de horizon te meten. Met de wijzer worden de gemeten posities omgezet in een tijdmeting.

de positie van de zon aan de ecliptica bepaald. De rete wordt vervolgens ten opzichte van de mater gedraaid totdat de zon de horizoncirkel snijdt. Je vindt dan uiteraard twee verschillende oplossingen. Met de wijzer worden vervolgens deze twee zonneposities op het astrolabium geëxtrapoleerd tot aan de overeenkomende uurmarkeringen. Daarmee zijn dan ook de tijden van zonsopkomst en zonsondergang gevonden. Misschien nog praktischer voor het



Figuur 6 Het meten van de tijd, zoals uitgelegd in de tekst: a) bepaal de zonnehoogte H . b) Zet de datum om in een positie van de zon aan de ecliptica en c) laat de eclipticapositie samenvallen met de hoogte H en lees aan de buitenrand de tijd af.

dagelijks gebruik is het bepalen van het moment waarop de schemering begint ('s ochtends) of eindigt ('s avonds). Het is natuurlijk moeilijk om precies het moment aan te geven waarop de schemering begint of eindigt, maar tegenwoordig wordt daarvoor een praktische definitie gebruikt die zegt dat de (astronomische) schemering begint als de zon 18° onder de horizon staat. In de islamitische middeleeuwen werd vrijwel dezelfde definitie gebruikt, maar dan bij 19° . Om

een goede vergelijking met moderne berekeningen te kunnen maken, zullen we in een volgend artikel in de numerieke vergelijkingen de moderne definitie aanhouden.

Ten slotte

Vanwege de vele toepassingsmogelijkheden van het astrolabium is het geen verrassing dat het instrument in de middeleeuwen, met name in de islamitische wereld, zeer veel gebruikt werd. Het is door een moderne auteur zelfs wel beschreven als een middeleeuws equivalent van het polshorloge. In Europa werd het astrolabium voor-

al populair als precisie-instrument voor ontdekkingsreizigers. In het volgende artikel zullen we de nauwkeurigheid van het astrolabium in de praktijk testen.

Referenties

- 1 J.D. North, *The astrolabe*. *Scientific American* **230-1** (1974) 96-106.
- 2 M. Hoskin, *The astrolabe*. In: M. Hoskin (Ed.), *The Cambridge illustrated history of Astronomy*, Cambridge University Press (1997) 64-67.
- 3 J.E. Morrison, *The astrolabe*, (Janus, Rehoboth Beach) (2007)
- 4 D.A. King, *In synchrony with the heavens, Vol. 2: Instruments of mass calculation*, Brill, Leiden (2005).

De uitdaging



Wij gaan naar de sauna!

De sauna zoals we die nu kennen heeft een lange geschiedenis. De oude Grieken legden al in de vierde eeuw voor Christus zweetbaden aan in hun sportcomplexen. Ook kenden ze het principe van het stoombad al. Vooral atleten en militairen maakten van de stoombaden gebruik om hun lichaam te harden. De eerste sauna's in Finland waren waarschijnlijk slechts uitgraven

kuilen in de helling van een heuvel. Deze werden voornamelijk gebruikt als onderdak tijdens de wintermaanden. Voor warmte werden in een kuil stenen opgewarmd totdat ze gloeiend heet waren. Daarna werd er water over de stenen gegooid om stoom te creëren waardoor er meer warmte werd afgegeven. De temperatuur liep zo hoog op dat de mensen hun kleren konden uitrekken. In Finland is nog

een aantal van deze 'holsauna's' te vinden. Het woord sauna is een oud Fins woord dat komt van 'savu', wat 'gat in de aarde' betekent. Natuurkundig gezien beschrijft de warmteleer alle processen die in een sauna gebeuren, maar die zijn niet altijd voor de hand liggend. Een vraag die niet makkelijk te beantwoorden is, is de volgende: wat gebeurt er met de temperatuur in de sauna als we wat