

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

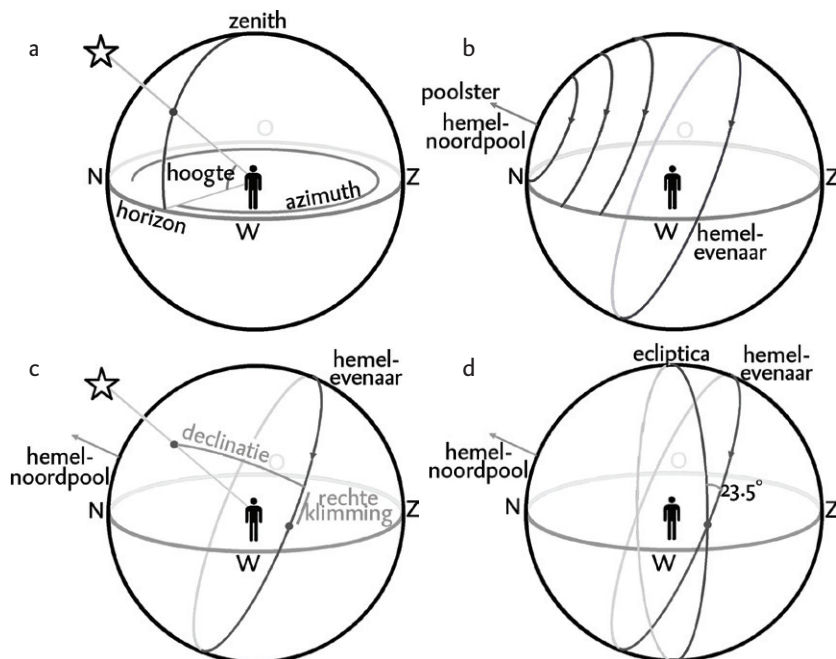
De stereografische projectie die Hipparchus bedacht, gaat uit van de zogenaamde hemelbol. Dit is de bol die de rand van het heelal voorstelt volgens de oude Grieken. Zon, maan, planeten en sterren bevinden zich zo ver van de aarde dat we mogen doen alsof ze zich allemaal op de hemelbol bevinden. Elk 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).

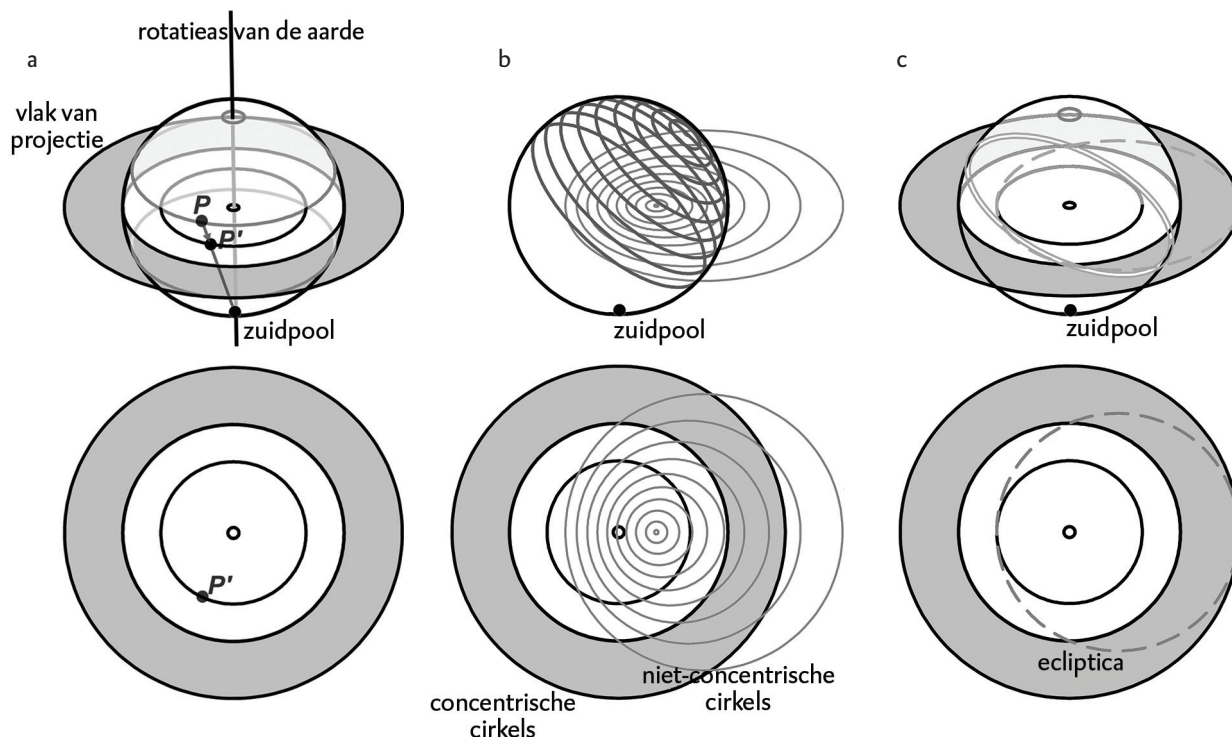
Een prettig kenmerk van de stereografische projectie is dat hemelcirkels op cirkels geprojecteerd worden (of op een lijn, in een gedegenereerd geval). Daarbij blijft de grootte van de hoeken in deze projectie aan de hemel behouden en blijven bijvoorbeeld sterrenbeelden na projectie goed herkenbaar. Een 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 rotatieas 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.

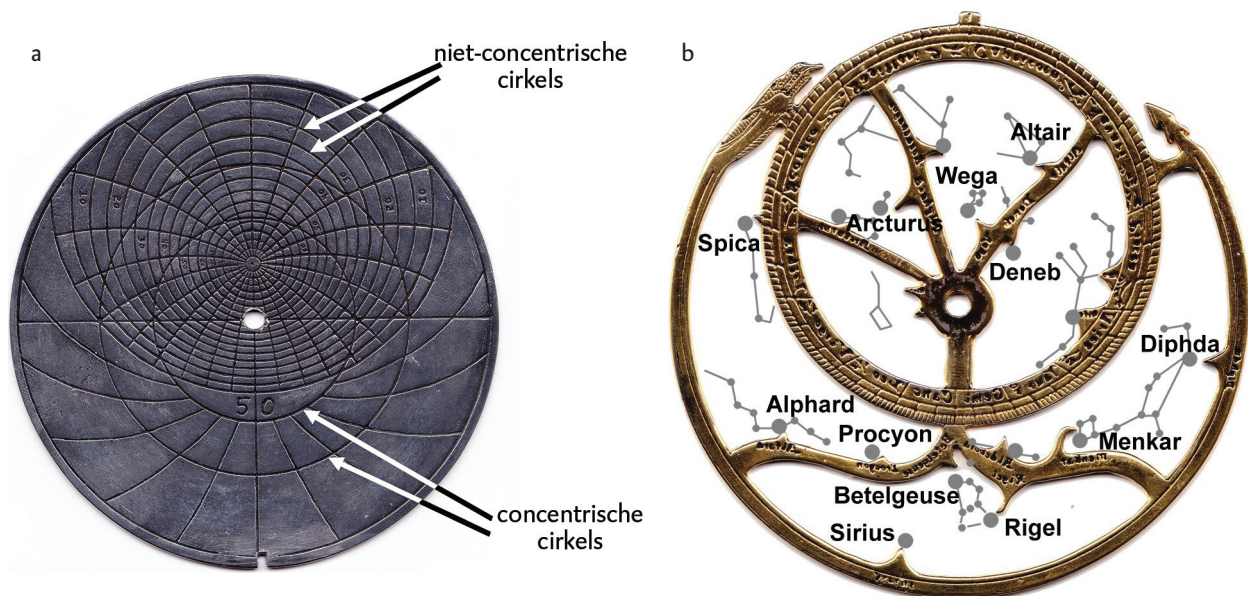
Het onderling roteren van rete en mater gaat heel gemakkelijk omdat ze met een pin door het middelpunt met elkaar zijn verbonden (figuur 5). Dezelfde pin houdt ook de alidade vast. Dit is een soort wijzer die werd gebruikt om de hoogte van de zon of van een ster boven de horizon te meten. De alidade 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 Greenwich, kunnen we de lokale tijd T_{lokaal} , die met een astrolabium is gemeten, omzetten in klokkentijd T_{CET} met behulp van de volgende formule:

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

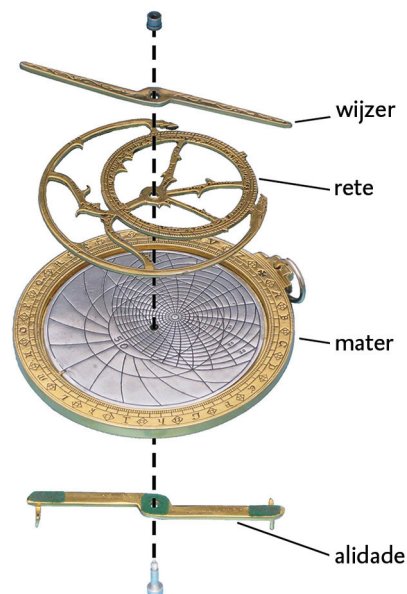
waarin φ_{OL} de geografische oosterlengte is en waarbij we moeten bedenken dat de aarde in 24 uur over 360° om zijn as draait (dus 15° per uur). Voor de stad Leiden, dat op $5^\circ 9' 20''$ oosterlengte ligt, bedraagt de correctie 20 minuten en 37 seconden. Uiteraard moet daar in de zomer nog een uur 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 zonnewijzer, die immers niet de zonneshoogte gebruikt maar de richting waarin de zon (of liever gezegd, haar schaduw) staat. Een belangrijk nadeel van het gebruik van de zonnerichting is dat het instrument daardoor heel precies gericht moet blijven. Er bestaan dan ook geen reisuivoeringen van zonnewijzers, maar wel van astrolabia.

In tegenstelling tot zonnewijzers 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 zonpositie aan de ecliptica. Met de wijzer extrapoleren we deze zonpositie (die zich inderdaad op het astrolabium onder de horizon zal bevinden) naar een uurmarkering.

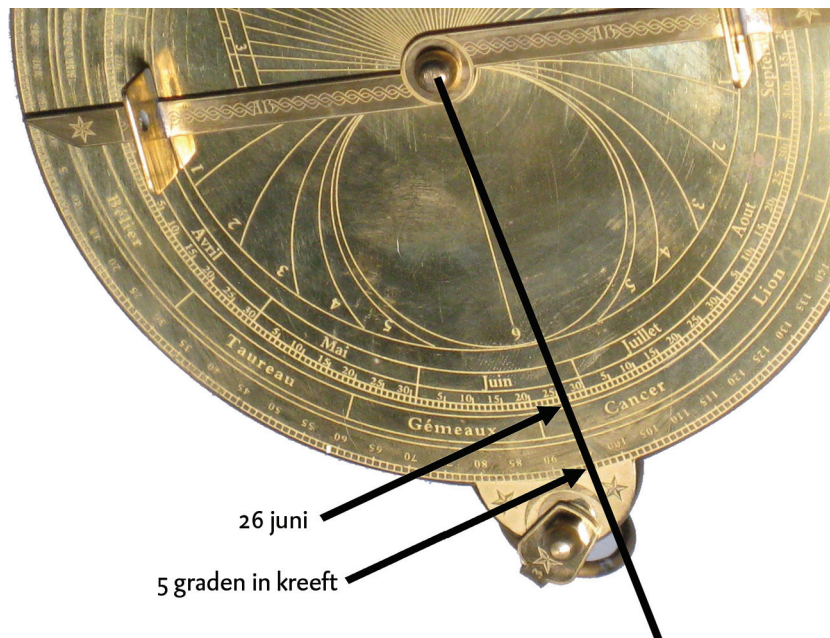
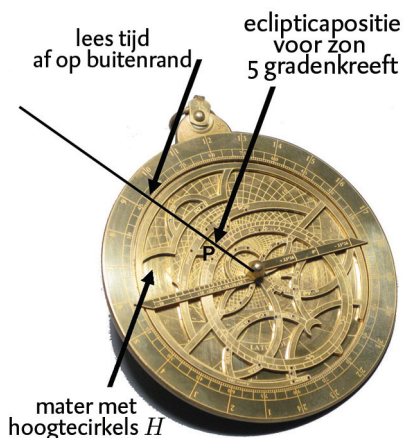
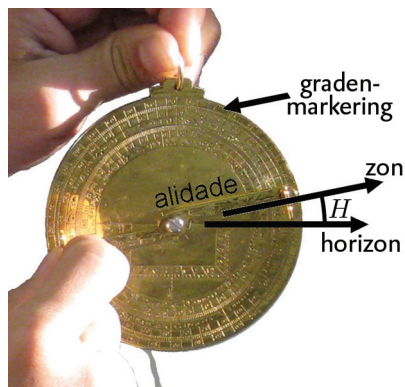
Zonsopkomst, -ondergang en schemering

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 zonposities 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 uitgegraven

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 uittrekken. 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

Nederlands Tijdschrift voor

Natuurkunde

juli 2013-jaargang 79-nummer 7



**Veel aandacht voor
vader en zoon Huygens**

**Driedimensionale chips?
Mesonen en muonen**

Meten met een astrolabium

Hoe nauwkeurig meet je tijd of schemering met dit middeleeuwse instrument?

Nadat we in het meinummer de werking van een astrolabium uitgelegd hebben, onderzoeken we nu de nauwkeurigheid ervan. Hoeveel minuten loopt dit instrument voor of achter ten opzichte van ons moderne polshorloge? Verschilt dat 's nachts en overdag? En hoe precies kun je met dit instrument de tijden bepalen van zonsopkomst en -ondergang, het begin en eind van de schemering, of de richting van het noorden? Eric Kirchner

300

“**W**ie gelooft dat iedereen op bevel metingen kan uitvoeren zonder eerdere oefening en dat elk meetinstrument correcte resultaten oplevert, die vergist zich.” Ibn Yunus (gestorven in 1009), *Kitab az-Zij al-kabir al-Hakimi* [6].

De onderzochte modellen

Bovenstaand citaat laat zien dat de islamitische astronomen in de middeleeuwen zich al bewust waren van meetfouten. Maar hoe groot is de meetfout van een astrolabium?

We hebben ons onderzoek uitgevoerd

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



met twee verschillende astrolabia (figuur 1). In Frankrijk maakt Brigitte Alix astrolabia [1]. Voor 470 euro (exclusief 20 euro porto) kocht ik bij haar een astrolabium met een diameter van 12 cm. Volgens de maakster is het niet een imitatie van een historisch exemplaar, maar een Europees model met een antiek design. Dit astrolabium heeft op mijn verzoek een mater die is gemaakt voor 52° noorderbreedte.

De Amerikaan Norman Greene levert een astrolabium van Gold/Pewter-materiaal voor 280 dollar (exclusief 48 dollar porto en zonder de luxe verpakkingendoos) [2]. Deze heeft een diameter van vier inch (10,2 cm) en is daarmee iets kleiner dan het Franse model. Voor dit geld krijg je een mater voor een breedtegraad van 50° noorderbreedte. Het is niet mogelijk een mater voor 52° noorderbreedte te laten maken, dus één punt van onderzoek was in welke mate dit leidt tot een grotere fout in de tijdsbepaling met het instrument. Dit model is gebaseerd op de oudste Europese beschrijving van een astrolabium door Chaucer in de veertiende eeuw. We zullen

de instrumenten verder aanduiden als het Franse en de Amerikaanse astrolabium.

Misschien lijkt de prijs hoog voor deze instrumenten. Het valt echter mee als we ons realiseren dat elk exemplaar twintig tot dertig uur handwerk kost, waarbij we dan de eenmalige investering om alle berekeningen uit te voeren en mallen te maken niet meetellen [4].

Beide modellen worden geleverd met boekjes die de werking van het astrolabium moeten verhelderen. Deze teksten stellen weinig voor en op internet is al gauw meer en betere informatie te vinden.

Tijdsbepaling overdag

In deel 1 hebben we al beschreven hoe met een astrolabium de tijd overdag bepaald kan worden door middel van een meting van de hoogte van de zon boven de horizon. Enkele voorbeelden hiervan zien we in figuur 2. Horizontaal zien we de met het astrolabium gemeten hoogte van de zon. Verticaal zetten we het tijdstip uit zoals berekend met het astrolabium (markers), en het 'exacte' tijdstip volgens een



Figuur 1 Foto's van de onderzochte astrolabes. Boven het Franse model en onder het Amerikaans model. Links staat steeds de voorkant van het astrolabium, rechts de achterkant.

goed afgesteld modern kwartshorloge (doorgetrokken lijnen in figuur 2).

Figuur 2 laat alleen de resultaten zien voor vier representatieve waarnemingsdagen. In 2011 waren dat 17 juli, 15 oktober en 17 december en daarnaast nog 24 maart 2012. De figuur laat zien dat gedurende het hele jaar de door een astrolabium voorspelde tijd goed overeenkomt met de exacte tijd. Omdat de zon zowel in de ochtend als in de middag dezelfde reeks zonneshoogtes bereikt, gaan we er in de voorspelling wel van uit dat de gebruiker weet of het ochtend of middag is. Dit zal in de praktijk geen probleem zijn. Problematischer worden de tijdsbepalingen rond lunchtijd (figuur 3). Aangezien de zon dan een maximale hoogte bereikt, wordt de tijdsbepaling met het astrolabium minder nauwkeurig. We zullen hieronder laten zien welke gevolgen dit heeft.

Afgezien van de dagen die in figuur 2 zijn vermeld, hebben we gedurende een jaar op veel meer dagen tijdsbepalingen uitgevoerd met beide astrolabia. Van 9 april 2011 tot 24 maart 2012 kon elke kalendermaand een dag gevonden worden waarop gedurende het

grootste deel van de dag elk uur een zonwaarneming kon worden uitgevoerd. Alleen in januari 2012 speelde de bewolking zodanig parten dat de corresponderende meting pas op 4 februari plaatsvond. In totaal werd op zeventien verspreid liggende dagen gemeten. Dit leverde 151 tijdsmetingen op met beide astrolabia.

Om (ernstige) meetfouten te beperken werd elke meting van de zonneshoogte bepaald uit het gemiddelde van drie onafhankelijk herhaalde metingen (een enkele keer verdween de zon achter een wolk en waren herhalingsmetingen niet mogelijk). Het is niet duidelijk of dit een gangbare praktijk was in de moslimwereld tijdens de middeleeuwen, maar Europese zeevaarders gebruikten een dergelijke techniek al tijdens hun ontdekkingsreizen.

Een belangrijke frustratie van de onderzoeker mag niet onvermeld blijven. De zon dient uiteraard goed zichtbaar te zijn om een waarneming te doen van de hoogte van de zon. Tijdens de tijdsbepalingen met de astrolabia bleek dat althans in Nederland de omstandigheden daartoe niet altijd optimaal zijn. Zo schijnt de zon volgens

gegevens van het KNMI in Nederland gemiddeld circa tweehonderd uur per maand in de zomer en slechts vijftig uur in de winter [5].

We vinden een gemiddelde absolute meetfout in de 151 tijdsmetingen van negentien minuten voor het Amerikaanse en vijftien minuten voor het Franse astrolabium. We zagen hierboven al dat de tijdsbepalingen rond lunchtijd de grootste tijdmeetfouten opleveren, omdat de zonneshoogte dan door een maximum gaat. Als we de periode tussen 12:40 uur en 14:40 uur buiten beschouwing laten, dan leveren de resterende 128 tijdsmetingen per astrolabium een gemiddelde absolute tijdsfout van elf minuten voor het Franse en dertien minuten voor het Amerikaanse astrolabium. Voor veel dagelijkse activiteiten is dit waarschijnlijk ruim voldoende.

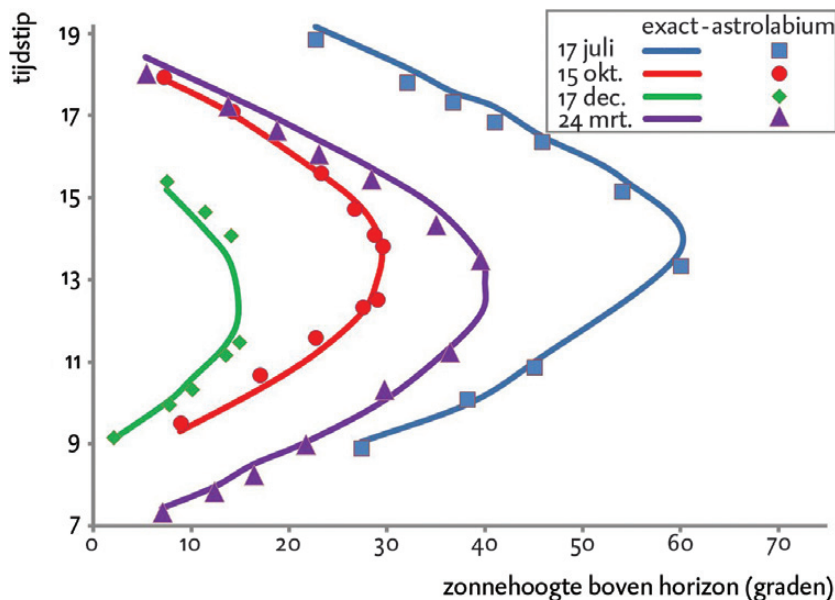
Tijdsbepaling 's nachts

Ook 's nachts kan de tijd worden bepaald met het astrolabium. Daarvoor is het wel noodzakelijk om enkele heldere sterren te kunnen identificeren. Voor de middeleeuwse burger was dit wellicht geen probleem, maar tegenwoordig kunnen nog maar weinig mensen Deneb, Wega of Altair aan de hemel aanwijzen. Een smartphone met Google SkyMap helpt de gebruiker tegenwoordig snel verder. Toch kunnen zelfs daarmee makkelijk vergissingen gemaakt worden, bijvoorbeeld als er in de schemering nog maar weinig sterren zichtbaar zijn.

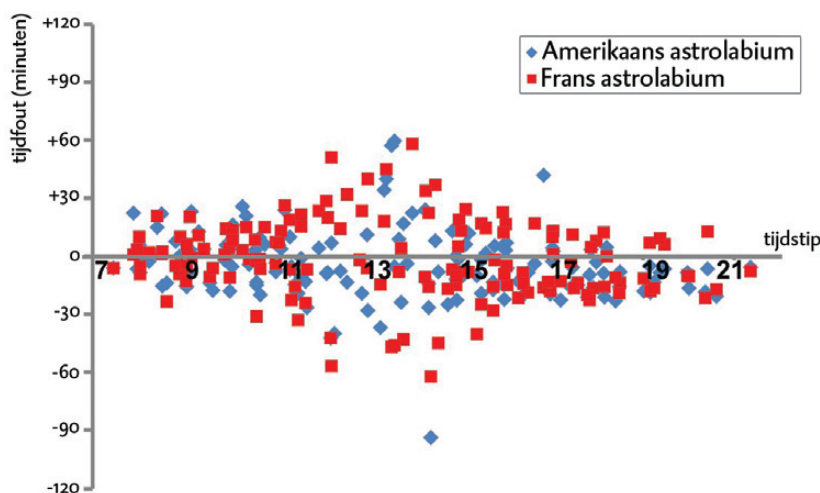
De nachtelijke bepaling van de tijd leverde nog wel wat andere praktische problemen op. Het valt bijvoorbeeld niet mee om in het donker een ster door de kijkgaten van de 'alidade' te laten schijnen, ook al omdat de ogen niet gelijktijdig kunnen focuseren op alidade en ster. Het astrolabium is ook moeilijk stabiel vast te houden voor het observeren van sterren die heel hoog aan de hemel staan.

Door dergelijke problemen bleek het 's nachts een stuk tijdrovender om de tijd te bepalen dan overdag, wat op zijn beurt het doen van drie herhalingsmetingen bijna onmogelijk maakte. Om deze redenen hebben we besloten de nachtelijke tijdsbepaling op slechts drie verschillende nachten uit te voeren.

Gedurende de nacht worden steeds weer andere sterren zichtbaar, die elk weer op het astrolabium opgezocht



Figuur 2 Op vier verschillende data is gedurende de dag herhaaldelijk de hoogte van de zon gemeten (horizontale as). Verticaal staat de corresponderende tijd uitgezet, zowel 'exact' volgens een modern kwartshorloge als uit berekening met het Amerikaanse astrolabium.



Figuur 3 Fout in tijdsbepaling met het Amerikaans en Franse astrolabium. De fout is het grootst rond lunchtijd als de zon zijn maximale hoogte heeft bereikt.

moeten worden. Hierdoor wordt de tijdsbepaling 's nachts een lastig proces waar snel fouten mee gemaakt kunnen worden. Uit onze meetserie halen we voor beide astrolabia een gemiddelde absolute fout in de tijdsbepaling van 22 minuten. De mediaan van de absolute fout is slechts vijftien minuten en dus nauwelijks slechter dan de tijdsbepaling overdag. Echter, door de verschillende eerder genoemde foutenbronnen komen er vooral 's nachts toch soms veel grotere fouten voor van wel bijna een uur.

Zonsopkomst, -ondergang en schemering

Ten opzichte van een modern polshorloge heeft een astrolabium een aantal voordelen. Zo kan er vlot mee bepaald worden hoe laat de zon op- en onder-

gaat. Hiervoor vergelijken we in figuur 4 de voorspellingen van het astrolabium met moderne astronomische berekeningen, zoals gepubliceerd in de *Sterrengids* van 2012 [3]. De moderne berekeningen hebben betrekking op Utrecht als plaats van waarneming. De omrekening naar Leiden levert een constante correctie op van 2 minuten en 35 seconden, veroorzaakt door het verschil in oosterlengte tussen beide plaatsen. Berekeningen werden uitgevoerd voor 36 dagen verspreid over het jaar, namelijk voor dag 1, 11 en 21 van elke kalendermaand in 2012. We vinden dan dat de gemiddelde absolute afwijking voor het astrolabium negen minuten bedraagt voor zonsopkomst, en dertien minuten voor zonsondergang ten opzichte van de *Sterrengids*. In figuur 4 zien we dat over het algemeen

het astrolabium de variatie van zonsopkomst en -ondergang door het jaar heen behoorlijk goed voorspelt. Voor de meeste gebruikers zal de nauwkeurigheid ruim voldoende zijn.

Soortgelijke voorspellingen kan het astrolabium ook doen voor het begin en eind van de schemering. Hiervoor waren astrolabia vaak voorzien van extra altitudecirkels, die aangeven wanneer de zon zich op een bepaalde hoekafstand onder de horizon bevond.

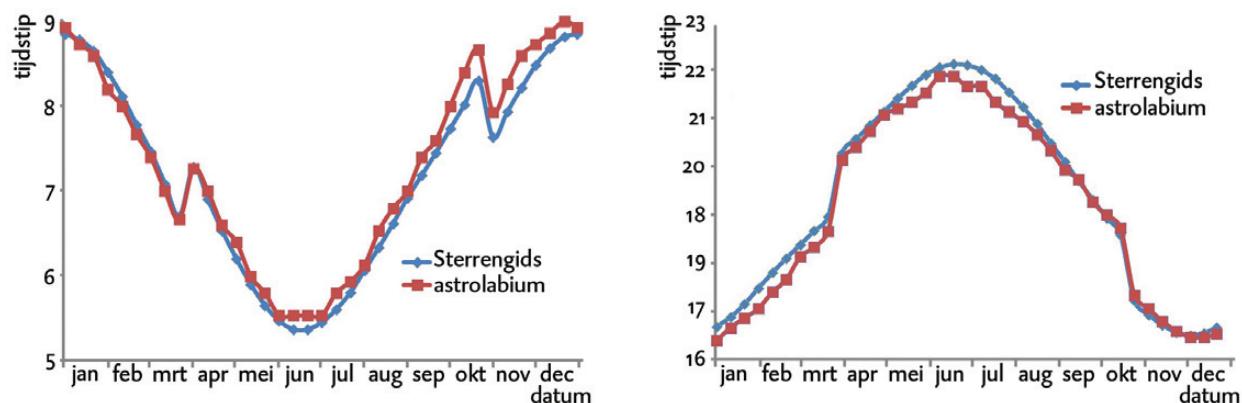
Op het Amerikaanse astrolabium zijn dergelijke schemercirkels niet aangebracht. Op het Franse model daarentegen vinden we cirkels voor zes, twaalf en achttien graden onder de horizon. Deze cirkels volgen daarmee de moderne definities voor het begin ('s ochtends) of het eind ('s avonds) van de zogenaamde Burgerlijke schemering, de Nautische schemering en de Astronomische schemering [3].

Het exacte moment waarop een bepaald type schemering begint is natuurlijk een kwestie van definitie. In de moslimwereld is in de middeleeuwen wel aangenomen dat de schemering begint wanneer de zon negentien graden onder de horizon staat (Ibn Mu'adh, Cordoba, elfde eeuw). In ons onderzoek hier willen we niet zozeer verschillen in definities bekijken, maar de meetnauwkeurigheid van het instrument. We zullen daarom uitgaan van de moderne definities van de diverse typen schemering.

We hebben voor de 36 eerdergenoemde data gedurende 2012 de tijdstippen bepaald dat de drie types schemering 's ochtends beginnen en wanneer zij 's avonds eindigen. We vinden dan dat de voorspellingen met het astrolabium van de moderne waarden afwijken met een gemiddelde absolute waarde variërend van acht tot twaalf minuten. Dit is een opmerkelijke prestatie, aangezien deze tijdstippen zich over een periode van vijftien uur uitstrekken. Alle voorspellingen liggen immers tussen 17:10 uur in de namiddag (het begin van de burgerschemering op 21 december op 11 december) en 08:09 uur in de ochtend (het eind van de burgerschemering op 1 januari).

Een niet-magnetisch kompas

Met een astrolabium kun je ook de kompasrichtingen bepalen. Lokaliseer net als bij de tijdmetingen op de eclipticaring van de rete de positie van de



Figuur 4 Tijdstippen van zonsopkomst (links) en zonsondergang (rechts) gedurende het jaar. Moderne berekeningen uit de *Sterrengids* zijn vergeleken met bepalingen met het Franse astrolabium. Voor het tijdstip hebben we steeds de gangbare kloktijd genomen, waardoor de winter- en zomertijdcorrectie in maart en oktober een sprong van een uur oplevert.

zon voor de gewenste datum en draai de mater zo dat deze overeenkomt met de gemeten zonneshoogte. Laat dan de alidade samenvallen met de zonnepositie op de rete. Houd vervolgens het astrolabium naast een verticaal voorwerp, bijvoorbeeld een stokje dat in de grond steekt. Draai dan het hele astrolabium (zonder de alidade, rete en mater ten opzichte van elkaar te bewegen) zo dat de schaduw van het voorwerp precies langs de rete valt. Dan geeft de noord-zuidmeridiaan op de mater onmiddellijk de richtingen van noord en zuid aan (figuur 5).

Het opvallendste kenmerk van deze kompasmethode is dat er nergens gebruik wordt gemaakt van het magnetische veld van de aarde. Daardoor is de methode met een astrolabium zelfs potentieel nauwkeuriger dan die met een magnetisch kompas, omdat zoals bekend het magnetische noorden niet (altijd) precies samenvalt met het ware Noorden. Alhoewel het magnetische kompas al in de elfde eeuw in China werd uitgevonden, dook het pas tweehonderd jaar later op in Europa en in de islamitische wereld. Tot die tijd was dan ook het astrolabium het meest nauwkeurige instrument om de richting van het noorden te bepalen.

In figuur 5 zien we een voorbeeld waarin het astrolabium en een magnetisch kompas slechts enkele graden van elkaar afwijken. Een aantal praktische tests lijken steeds een soortgelijke nauwkeurigheid op te leveren. Een eenvoudige berekening laat zien dat dit ook te verwachten is. De zon laat overdag op zijn tocht van oost via zuid naar west circa 180 graden aan verschillende richtingen zien binnen circa twaalf uur. Daardoor correspondeert de gemiddelde meetfout van



Figuur 5 Bepaling van het noorden met een astrolabium dat half in de schaduw ligt: de witte pijl geeft de berekende richting van het noorden aan (links). Rechts een magnetisch kompas dat het noorden aanwijst.

circa twaalf tijdminuten die we voor het astrolabium hebben gevonden met een meetfout in kompasrichting van $180/(5 \cdot 12) = 3$ graden. Aangezien voor het bepalen van het noorden met een astrolabium geen meting van de hoogte van de zon boven de horizon nodig is, kan het noorden ook tijdens de uren rond lunchtijd nauwkeurig bepaald worden.

Conclusies

Met een gemiddelde meetfout van minder dan een kwartier lijkt het astrolabium ook voor veel moderne Nederlandse gebruikers voldoende nauwkeurig voor tijdmetingen, zowel overdag als 's nachts. Ook als niet-magnetisch kompas is het instrument goed te gebruiken. Helaas laat het instrument de gebruiker rond het middaguur en bij bewolkte omstandigheden lelijk in de steek.

PS In het eerste deel over het astrolabium, dat in het meinumnummer verscheen, is in vergelijking (1) de tekst '+ 1 uur' weggefallen. In de begeleidende tekst staat dit wel correct vermeld; de totale correctie voor Leiden bedraagt dus 39 minuten en 23 seconden.

Referenties

- 1 B. Alix, contact@astrolabes.fr website: www.astrolabes.fr/astrolabe-Afx.html.
- 2 N. Greene, norm@puzzlering.net website: www.puzzlering.net/astrolabe.html.
- 3 E. van Ballegoij en Jan Meeus. *Sterrengids* 2012. Uitgave van stichting de Koepel, 2011, blz. 4 en 97.
- 4 C. Souplet, Brigitte Alix: *preneuse d'étoiles*, *Astronomie Magazine* 107 (december 2008) 18–22.
- 5 KNMI-gegevens op internet. Zie www.klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php.
- 6 F. Sezgin, *Science and technology in Islam*, Vol. 2 (J.W. Goethe-Universität, Frankfurt, 2010) blz. 78.