

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

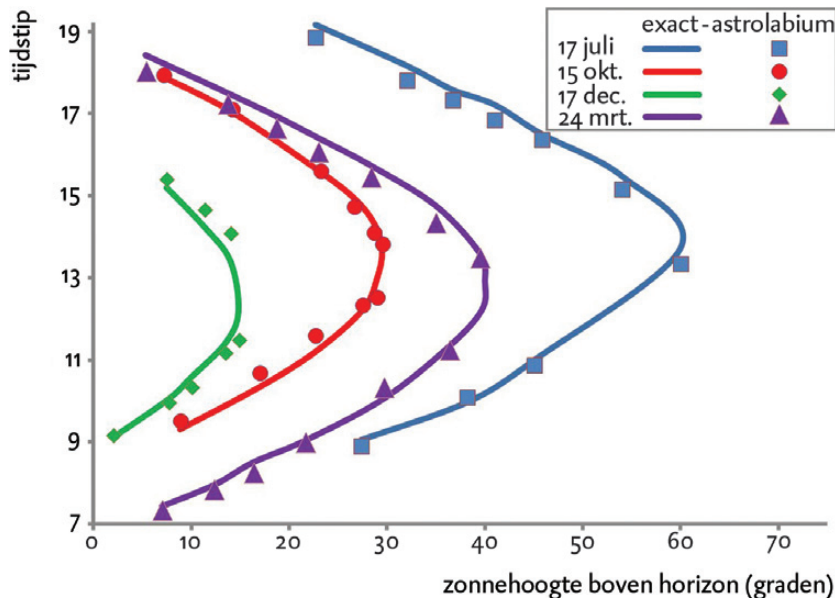
grootste deel van de dag elk uur een zonwaarneming kon worden uitgevoerd. Alleen in januari 2012 speelde de bewolking zodanig parten dat de corresponderende meting pas op 4 februari plaatsvond. In totaal werd op zeventien verspreid liggende dagen gemeten. Dit leverde 151 tijdsmetingen op met beide astrolabia.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

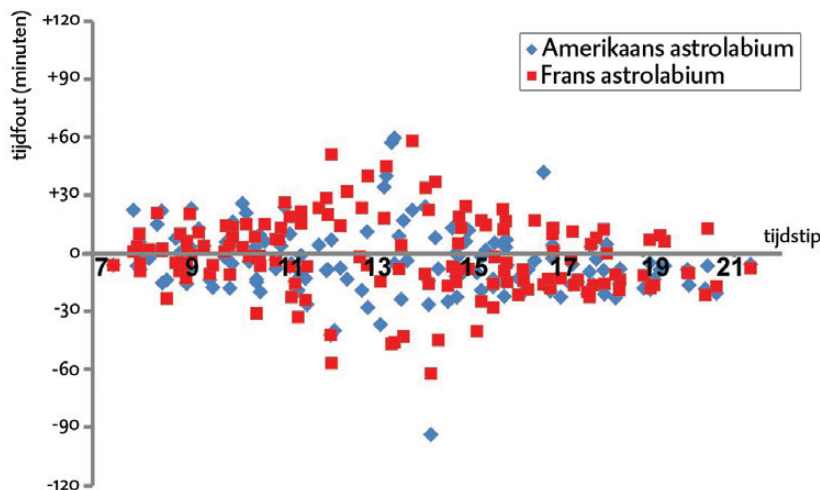
We vinden een gemiddelde absolute meetfout in de 151 tijdsmetingen van negentien minuten voor het Amerikaanse en vijftien minuten voor het Franse astrolabium. We zagen hierboven al dat de tijdsbepalingen rond lunchtijd de grootste tijdsmeetfouten opleveren, omdat de zonneshoogte dan door een maximum 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.

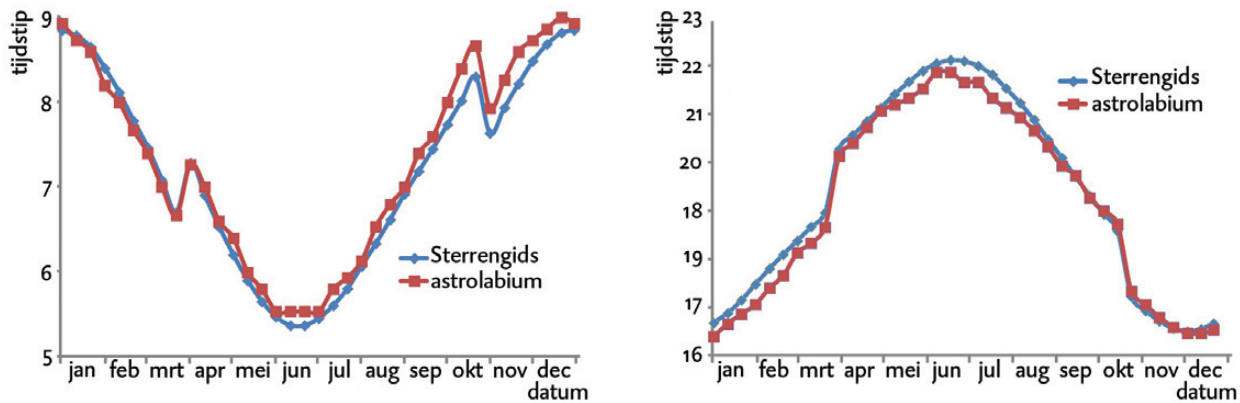
Op het Amerikaanse astrolabium zijn dergelijke schemercirkels niet aangebracht. Op het Franse model daarentegen vinden we cirkels voor zes, twaalf en achttien graden onder de horizon. Deze cirkels volgen daarmee de moderne definities voor het begin ('s ochtends) of het eind ('s avonds) van de zogenaamde 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 Tijdstoppen 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@puzzlerring.net website: www.puzzlerring.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.