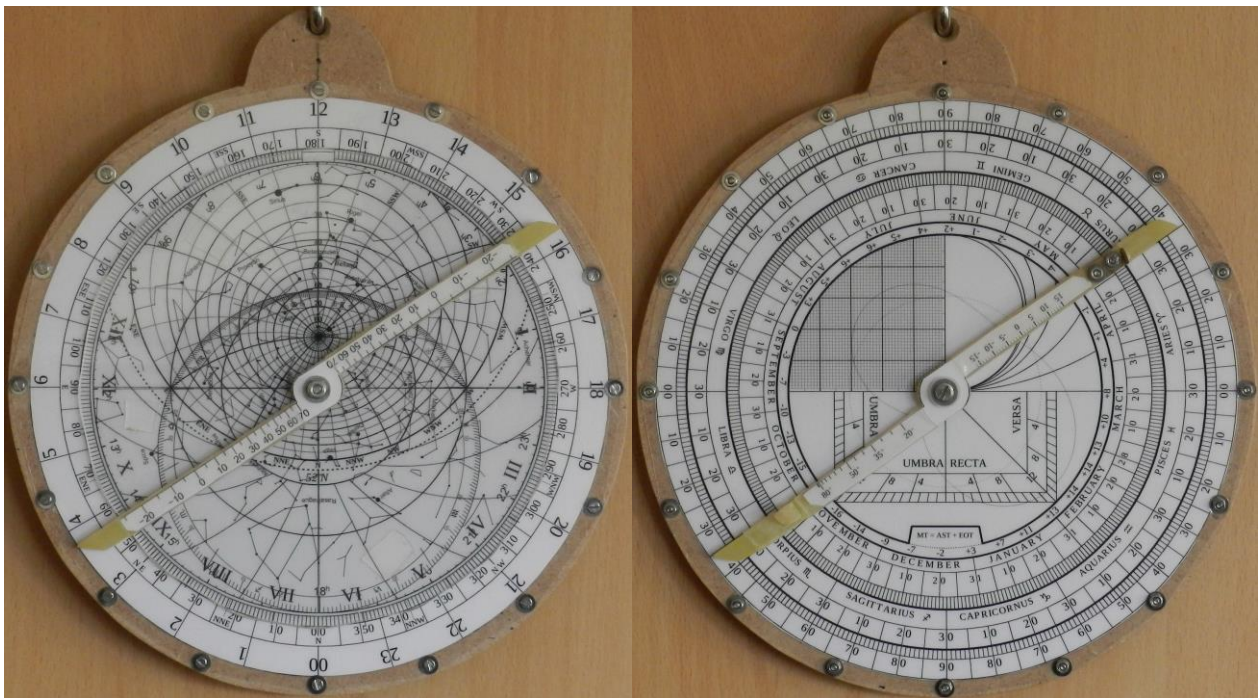


Beschrijving
aangaande 't
Astrolabium,
zowel
Planisferisch (particulier)
alswel
Universeel,



te Julianadorp,
ing. Harold R. Plooijer.

Inhoud

1	Inleiding.....	4
2	Hoe wist men vroeger hoe laat het was?	4
3	Historie.....	5
4	Meetkundige achtergrond	6
5	Verschillende versies.....	8
6	Anatomie van het planisferisch astrolabium	9
7	Tijdbepaling.....	12
8	Overige toepassingen.....	16
9	Het universeel astrolabium.....	21
10	De “Meßkarte zur Auflösung sphärischer Dreiecke”	26
11	Zelfbouw	31
12	Terminologie	36
13	Tekens van de dierenriem.....	36
14	Bibliografie	37

Lijst van figuren

Figuur 1: Astrolabium van Jean Fusoris, c. 1400 (foto: Wikipedia / Creative Commons)	4
Figuur 2: Armillairsfeer met astronomische klok (1585), Nordiska Museet (foto: Wikipedia / public domain)	5
Figuur 3: Stereografische projectie van het hemelgewelf	7
Figuur 4: Stereografische projectie van de almucantaren	7
Figuur 5: Sferisch astrolabium (links) en nautisch astrolabium (rechts)	8
Figuur 6: Astrolabium in onderdelen (Mathematisch-Physikalischen Salon, Dresden. Foto: Wikipedia / Creative Commons)	9
Figuur 7: Voorzijde van het planisferisch astrolabium (zelfbouw)	10
Figuur 8: Tympaan met hemelhuizen	10
Figuur 9: Achterzijde van het astrolabium (zelfbouw)	11
Figuur 10: het vizier van de alidade. Links: schaduw van de zon, rechts: meting aan een ster	12
Figuur 11: Astrolabium als kompas	13
Figuur 12: Hoogtemeting met de alidade	14
Figuur 13: Overige gegevens op de achterzijde (tijdvereffeningsgrafiek Wikipedia / Creative Commons)	15
Figuur 14: Tijdmeting, eindresultaat	15
Figuur 15: Zonsondergang	16
Figuur 16: Burgerlijke schemering	16
Figuur 17: Maximale zonshoogte	16
Figuur 18: Ongelijke uren op de tympaan	17
Figuur 19: Ongelijke uren, bogendiagram op de achterkant	17
Figuur 20: Qibla op het sinus-cosinuskwadrant	18
Figuur 21: Gebruik van het schaduwvierkant	19
Figuur 22: Afstandsmeting met het sin/cos kwadrant	19
Figuur 23: Astrolabium Catholicum (zelfbouw)	21
Figuur 24: Qibla vanaf Den Helder met het Astrolabium Catholicum.	22
Figuur 25: Plaatsbepaling met het astrolabium catholicum	23
Figuur 26: Hoogte vs. Declinatie	24
Figuur 27: Astrolabium Catholicum:	24
Figuur 28: Grensgevallen voor poolshoogte = 53°	25
Figuur 29: Meßkarte met de spin op poolshoogte (53°N)	26
Figuur 30: Regula (boven) en alidade (onder).	32
Figuur 31: Opbouw	33
Figuur 32: Astrolabium Catholicum (zelfbouw)	34
Figuur 33: Regula en spin met vleugelmoer. Inzet: M3 lagerbusje	35

1 Inleiding

Hoe komt iemand erbij om zich met een middeleeuws astronomisch instrument te gaan bezighouden, in een tijd waar we de beschikking hebben over go-to telescopen, Internet, computers en wat dies meer zij? Welnu, ik was een lezing aan het voorbereiden over “horloges met astronomische complicaties”. Daarbij stuitte ik op een tamelijk uniek exemplaar van de Friese horlogemaker Christiaan van der Klaauw: het Astrolabium. Voor weinigen weggelegd, niet alleen het horloge maar ook de prijs is astronomisch... Maar, het wekte wel mijn belangstelling: als ik zoiets in die lezing opneem, wil ik ook weten wat de achtergrond is en hoe het werkt. Zo begon een nieuw aspect van de hobby.

Literatuur over dit onderwerp is dun gezaaid. Veel webpagina's, maar veelal dezelfde informatie en weinig diepgang. Er bestaat wel een standaardwerk over het onderwerp, “The Astrolabe” van James E. Morrison. Helaas is de schrijver in 2016 overleden en er is nooit een reprint van verschenen, met als gevolg dat het boek niet meer regulier te koop is en exemplaren die nu nog te koop worden aangeboden schandalig hoge prijzen moeten opbrengen. Gelukkig heb ik via Museum Boerhaave in Leiden een exemplaar kunnen inzien. Ik ben Museum Boerhaave (en de gemeentelijke bibliotheek in Julianadorp) dus veel dank verschuldigd: zonder hun medewerking was dit artikel niet tot stand gekomen. Mijn dank gaat ook uit naar collega Ben de Rooij, dr. Paul van der Wal (Zenit Den Helder) en naar dr. Rob van Gent (Universiteit Utrecht) voor tips en het corrigeren van het manuscript.

2 Hoe wist men vroeger hoe laat het was?

In de oudheid (vóór de uitvinding van het slingeruurwerk en de telescoop) was het aanmerkelijk lastiger om een redelijk nauwkeurige indruk van het tijdstip van de dag te krijgen dan tegenwoordig. Het Internet, smartphones, smartwatches en allerlei andere elektronische hulpmiddelen helpen ons daarbij, met een nauwkeurigheid in de orde van milliseconden. In de middeleeuwen en daarvóór had men de beschikking over de zonnwijzer [1]. Er waren ook wel klokken, maar de nauwkeurigheid daarvan liet behoorlijk te wensen over [2]. Er was echter nog een ander instrument beschikbaar, dat resultaten leverde die qua nauwkeurigheid vergelijkbaar waren met de zonnwijzer: het astrolabium (de naam is afgeleid van twee Oudgriekse woorden: *astron* (ster) en *labanein* (nemen)).



Figuur 1: Astrolabium van Jean Fusoris, c. 1400 (foto: Creative Commons)

Ten opzichte van de zonnwijzer had het astrolabium nog een paar voordelen: ook als het geografische noorden niet bekend was, of gedurende de nacht, was het mogelijk om een tijdwaarneming te doen. Enig vereiste daarbij is kennis van de datum en de geografische breedte van de waarnemer. Daarnaast heeft het astrolabium nog een aantal andere toepassingen. Zo is het mogelijk om tegelijkertijd met de tijdwaarneming ook de richting (azimut) van het waargenomen object te bepalen, waardoor het astrolabium als kompas kan worden gebruikt. Verder is het mogelijk om met een geschikt astrolabium de richting te bepalen naar een andere plaats op de Aarde, zoals Moslims doen om de richting naar Mekka (de *qibla*) te achterhalen. Op veel astrolabia is een hoogte/afstandsmeter te vinden (het z.g. “schaduwvierkant”, zie § 6.2).

Het astrolabium is dus een mechanische rekenschild, bedoeld voor het oplossen van allerlei sterrenkundige en geografische problemen. Het instrument is een mooi voorbeeld van hoe men in de oudheid lastige wiskundige opgaven oploste met meetkundige middelen. Tegenwoordig lijkt dat precies andersom te zijn ...

3 Historie

De meetkundige principes waarop het astrolabium is gebaseerd dateren – voor zover we nu weten – uit de Griekse oudheid, enkele eeuwen vóór het begin van onze jaartelling. In die tijd bestond er een model van het universum om ons heen: de armillairsfeer¹ [3], waarvan de uitvinding in Europa is toegeschreven aan Eratostenes. Zie Figuur 2. De armillairsfeer bestaat uit ringen (*armilla* (Lat.) = ring) waarop de diverse hemelcoördinaten zijn afgebeeld: lengte, breedte (declinatie), rechte klimming, azimut en elevatie enzovoort. Het is een handig instrument waarop allerlei sterrenkundige berekeningen kunnen worden uitgevoerd, zoals coördinaattransformaties. Het is echter omvangrijk en weinig transportabel. Bovendien is het geen waarneeminstrument.



Figuur 2: Armillairsfeer met astronomische klok (1585), Nordiska Museet (foto: public domain)

De oplossing was: “platslaan” van de armillairsfeer met een techniek die we kennen als stereografische projectie ([4] p. 32, [5] en [6]), en het resultaat te combineren met een hoekmeetinstrument. Bij stereografische projectie wordt het oppervlak van de (hemel)bol afgebeeld op een plat vlak. Hipparchus (c. 130

¹ Er bestaat enige verwarring over de benaming “astrolabium” met de armillairsfeer. Dit wordt veroorzaakt door de *Almagest* van Ptolemaeus: daarin wordt de armillairsfeer consequent “astrolabium” genoemd (zie [39] en [8], § 7). In deze beschrijving worden beide begrippen strikt gescheiden gehouden en de benaming “astrolabium” verwijst hier altijd naar het platte instrument.

v.Chr.) wordt wel gezien als de grondlegger van deze techniek, hoewel dit niet zeker is: wellicht waren de Egyptenaren hem voor.

Ptolemaeus (c. 100-170 n.Chr.) was de eerste die de stereografische projectie beschreef [7], maar uit die tijd is geen fysiek astrolabium bewaard gebleven. Over Ptolemaeus gaat de volgende anekdote²:

*Ptolemaeus reed op een ezel met een armillairsfeer in zijn hand.
De armillairsfeer viel op de grond, de ezel ging erop staan en trapte hem plat.
Het resultaat was een astrolabium.*

Of in de tijd van Ptolemaeus astrolabia zijn vervaardigd en of hij vertrouwd was met het instrument is onderwerp van discussie³ [7] [8] [9] [10] [11].

Uit een gedetailleerde verhandeling over het astrolabium door Theon van Alexandrië [8] [12] (c. 390) blijkt dat het astrolabium in zijn tijd bestond, maar er is geen fysiek exemplaar van bewaard gebleven. Wel staat vast dat vanaf de vierde eeuw astrolabia gemaakt zijn.

Daarna werd het in de oude wereld stil rond het astrolabium. Deze kennis was echter ook aanwezig in de Islamitische wereld⁴, waar het astrolabium verder is doorontwikkeld ([4] pp. 34-37), vooral in een periode die nu bekend staat als de Islamitische Gouden Eeuw (9^e-13^e eeuw) [13]. Er zijn exemplaren bewaard gebleven die dateren uit de tiende eeuw. Via de kruistochten en via het Moorse gebied in het zuiden van Spanje [14] kwam het instrument weer terug in Europa. Daarna is het astrolabium in de westerse wereld ook weer in gebruik genomen en was het rond 1300 gemeengoed [15].

Het instrument werd in zijn hoogtijdagen voornamelijk gebruikt door [16]:

- Alchemisten
- Astrologen en astronomen
- Hoger opgeleiden

Het gebruik van het astrolabium werd destijds aan universiteiten onderwezen zoals dat tegenwoordig gebeurt met wetenschappelijke rekenmachines en in het recente verleden met rekenlinialen.

De in Toledo gevestigde instrumentmaker en astronoom Abū Ishāq Ibrāhīm al-Zarqālī [17] (In de Latijnse schrijfwijze Arzachel. Er is een maankrater naar hem vernoemd) ontwierp in de elfde eeuw een universele versie. De Leuvense hoogleraar Gemma Frisius [18] heeft het universeel astrolabium verder doorontwikkeld en het instrument is daarna onder de naam Astrolabium Catholicum (Algemeen astrolabium) in gebruik geweest bij o.a. stuurlieden op de grote vaart als hulpmiddel bij de navigatie [19] [20]. In gewijzigde vorm is deze versie nog tot in WO2 in gebruik geweest bij de Duitse Kriegsmarine als "Meßkarte zur Auflösung sphärischer Dreiecke" [21] [22] [23].

Het planisferisch astrolabium raakte na de uitvinding van de telescoop en het slingeruurwerk grotendeels buiten beeld. Tegenwoordig wordt het astrolabium soms nog wel gebruikt als onderwijshulpmiddel. De draaibare sterrenkaart (planisfeer) heeft veel kenmerken van het astrolabium in zich.

Er is documentatie over het astrolabium op het Internet te beschikbaar, maar er is eigenlijk maar één bron waarin vrijwel alles over het onderwerp te vinden is: het boek "The Astrolabe" van James E. Morrison [4]. In dit document wordt er veelvuldig naar verwezen. Belangstellenden kunnen terecht bij universiteits- en museumbibliotheken.

4 Meetkundige achtergrond

Zoals reeds genoemd is het astrolabium gebaseerd op stereografische projectie van de hemel op een plat vlak [24] [25]. Het platte vlak is een vlak loodrecht op de aardas, bijvoorbeeld het vlak van de evenaar of het vlak dat raakt aan de tegenoverliggende pool. Bij "noordelijke" astrolabia wordt geprojecteerd vanuit de Zuidpool, omdat op die manier de noordelijke sterrenhemel compact op het evenaarvlak wordt afgebeeld. Wordt de Noordpool gekozen, dan komt alles onhandig ver uit elkaar te liggen. Voor het zuidelijk halfmond geldt uiteraard het omgekeerde.

Er is sprake van twee projecties:

- Die van het hemelgewelf, onderverdeeld in een gradennet van rechte klimming en declinatie;
- Die van de omgeving van de waarnemer, onderverdeeld in een gradennet van azimut en elevatie.

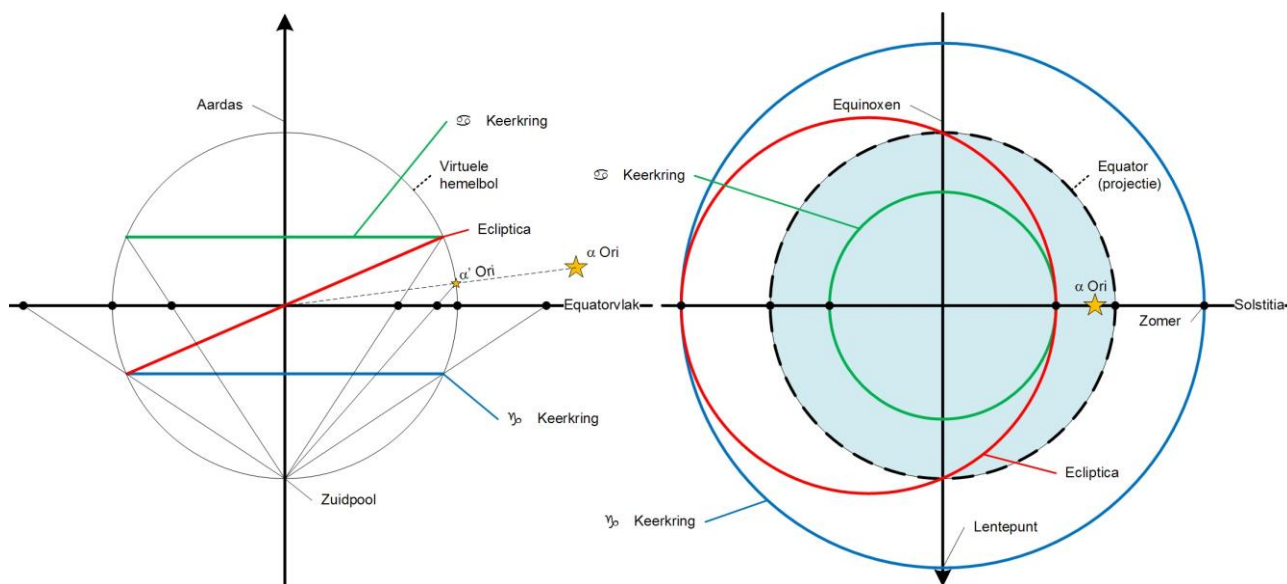
Deze twee projecties zijn op het astrolabium draaibaar ten opzichte van elkaar aangebracht.

² Legende opgetekend in een dertiende-eeuws Arabisch handschrift ([38], XIII: p. 595).

³ Ptolemaeus' *Planisphaerium* [7] beschrijft de stereografische projectie, maar niet het (planisferisch) astrolabium als *instrument*.

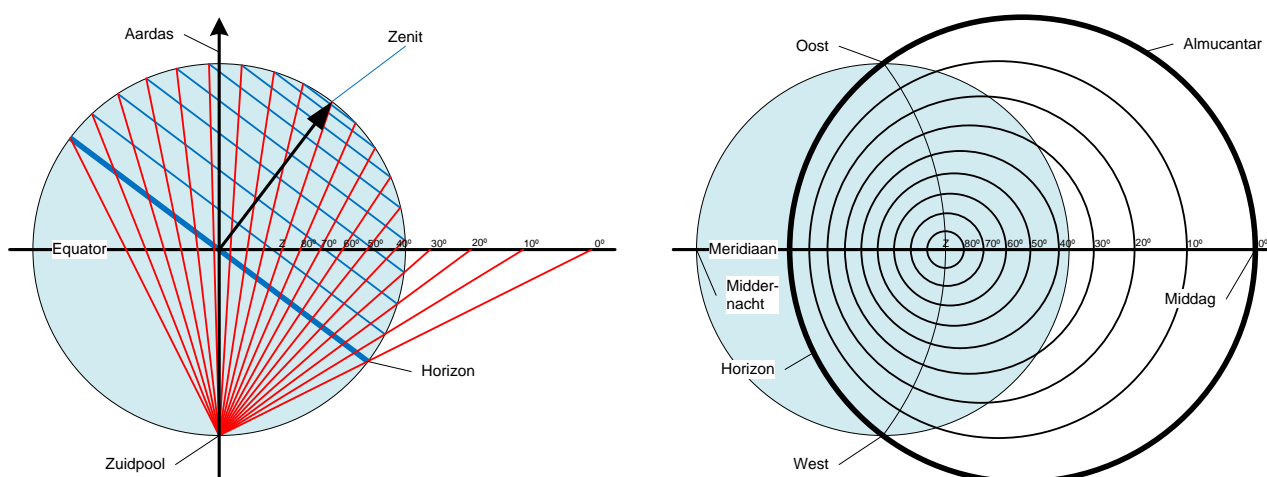
⁴ Vermoedelijk door interculturele uitwisseling te Harrān, in het huidige zuidoost-Turkije (tegen de Syrische grens ([38], XIII: p. 411)), toentertijd een centrum van Hellenistische cultuur en wetenschap.

In het linkerdeel van Figuur 3 wordt aangegeven hoe het hemelgewelf, met daarin de keerkringen, de equator, de ecliptica en de ster Betelgeuze⁵ (α Ori), wordt geprojecteerd op het equatorvlak. De zichtrichting is langs de jaargetijnsnede van de equinoxen. Van sterren en andere hemellichamen moet eerst de projectie (α' Ori) worden bepaald op hetzelfde denkbeeldige boloppervlak als waarop de ecliptica en de keerkringen zijn afgebeeld (de z.g. *sfeer*). In Figuur 3 (links) wordt de sfeer voorgesteld door de cirkel. α' Ori wordt op zijn beurt weer geprojecteerd op het equatorvlak. Rechts in Figuur 3 is het eindresultaat te zien, gezien vanaf de hemelpool.



Figuur 3: Stereografische projectie van het hemelgewelf

In het linkerdeel van Figuur 4 is aangegeven hoe de projectie van de hoogtelijnen (*almucantaren*), uitgaande van de elevatie t.o.v. de waarnemer, tot stand komt. Uitgangspunt is een geografische breedte van 53°N (daar is het zenit van de waarnemer te vinden) en de zichtrichting is langs de oost-west lijn. De blauwe lijnen stellen de elevatie voor, in stappen van 10 graden. De snijpunten van deze lijnen met de sfeer worden geprojecteerd op het evenaarvlak via de rode lijnen. Door cirkels te tekenen (Figuur 4, rechts) met het middelpunt op het vlak van de evenaar en de linker- en rechterkant door de twee snijpunten met de evenaar die horen bij dezelfde elevatie, ontstaat het patroon van de almucantaren (zwarte cirkels). Duidelijk is te zien dat deze cirkels elkaar weliswaar geheel omsluiten, maar geen gemeenschappelijk middelpunt hebben! De oost-west boog is de projectie van de eerste verticaal.



Figuur 4: Stereografische projectie van de almucantaren

De azimuthaalbogen worden geconstrueerd door allereerst de middelpunten te vinden van deze bogen. Al die middelpunten bevinden zich op een loodlijn midden tussen de projectie van het nadir en het zenit ([4] p. 82).

⁵ Betelgeuze is hier gekozen omdat deze (vrijwel) in de jaargetijnsnede van de zonnewendes staat. Daardoor is in Figuur 3 geen correctie nodig voor de rechte klimming ($\alpha \approx 6h00' = 90^\circ \rightarrow \sin(\alpha) \approx 1$).

Als we stellen dat:

- De afstand van een dergelijk middelpunt tot de meridiaan = MM ;
- De afstand tussen de projectie van het nadir en het zenit = NZ ;
- Het azimut + $90^\circ = AZ$;

Dan geldt:

$$MM = \frac{NZ}{2} \cdot \tan(AZ)$$

Neem een aantal waarden voor het azimut, bijvoorbeeld elke 5 graden, en voer deze bewerking uit voor het interval $\langle 0^\circ, 180^\circ \rangle$. De constructeur moet vervolgens cirkelbogen tekenen door de projectie van het zenit, elk met hun middelpunt in de hierboven berekende punten⁶. Dit kan lastig zijn voor azimutaalbogen in de buurt van de meridiaan, omdat de straal van de cirkel dan erg groot wordt. De zo geconstrueerde azimutaalbogen horen elkaar in het zenit te snijden onder een hoek die gelijk is aan het bijbehorende verschil in azimut. Voor overige constructiedetails wordt verwezen naar de literatuur ([4] pp. 67-82).

5 Verschillende versies

Er zijn vele versies van het astrolabium. De meest voorkomende versie wordt het *planisferisch* astrolabium⁷ genoemd. Een beperking van deze versie is dat een bepaald onderdeel (de tympaan) geschikt is voor slechts één geografische breedte. Er bestaan ook *universele* astrolabia, die dit bezwaar niet hebben. Het universeel astrolabium is echter lastiger in het gebruik. Deze versie zal in dit document uitgebreid aan de orde komen. Verder kan nog het sferisch astrolabium worden genoemd (Figuur 5, links). Dit instrument heeft echter geen voorziening voor hoekmetingen. Andersom bestaat er ook een nautisch astrolabium⁸ [26], maar die versie bevat alleen het hoekmeetinstrument (Figuur 5, rechts). Dan bestaat er nog het prisma-astrolabium [27], waarmee tegelijkertijd de breedte en de tijd kunnen worden bepaald.



Figuur 5: Sferisch astrolabium (links) en nautisch astrolabium (rechts) (foto's: Creative Commons)

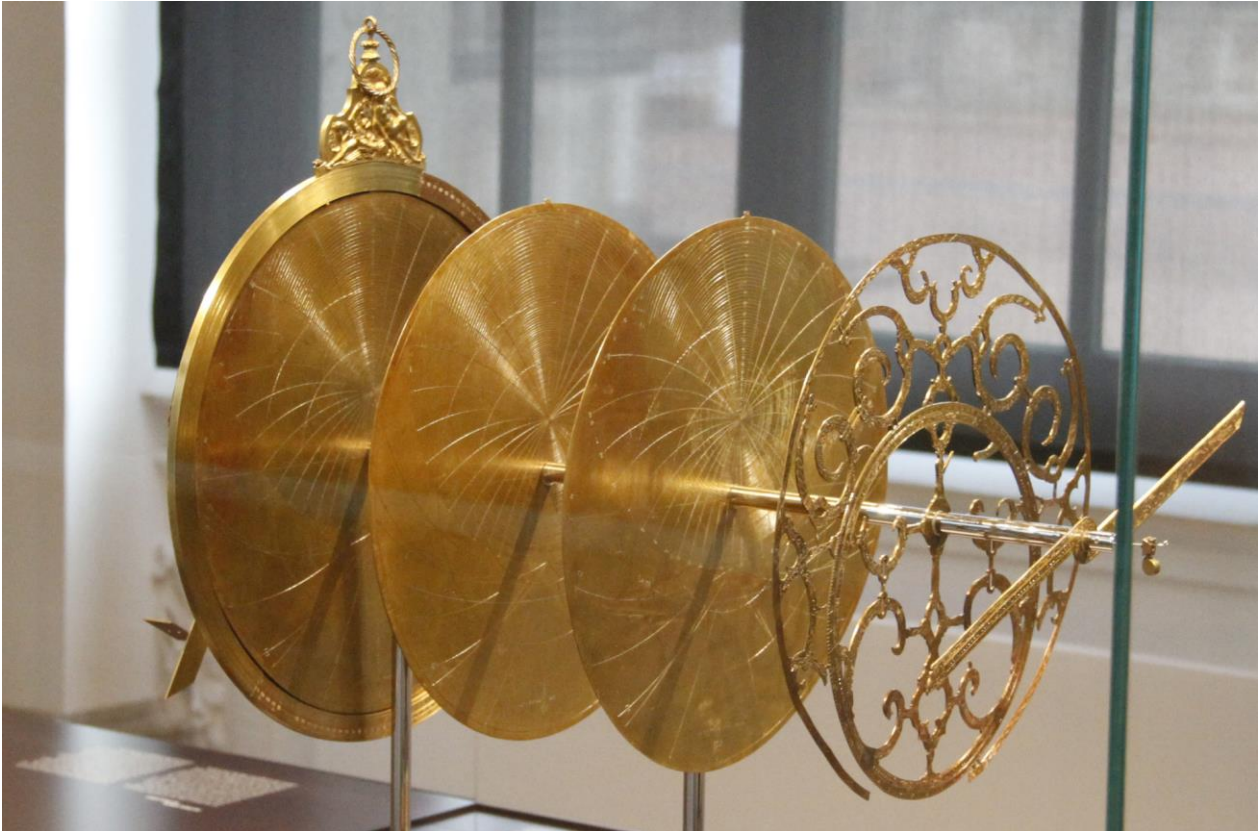
⁶ Deze procedure wijkt af van hetgeen hierover vermeld staat in [4], maar is waarschijnlijk makkelijker uit te voeren.

⁷ Naamgeving overgenomen van Morrison [4]. Welbeschouwd is *elk* plat astrolabium een projectie van een bol op een plat vlak, en daardoor planisferisch.

⁸ Volgens King [39] zou dit geen astrolabium mogen heten ...

6 Anatomie van het planisferisch astrolabium

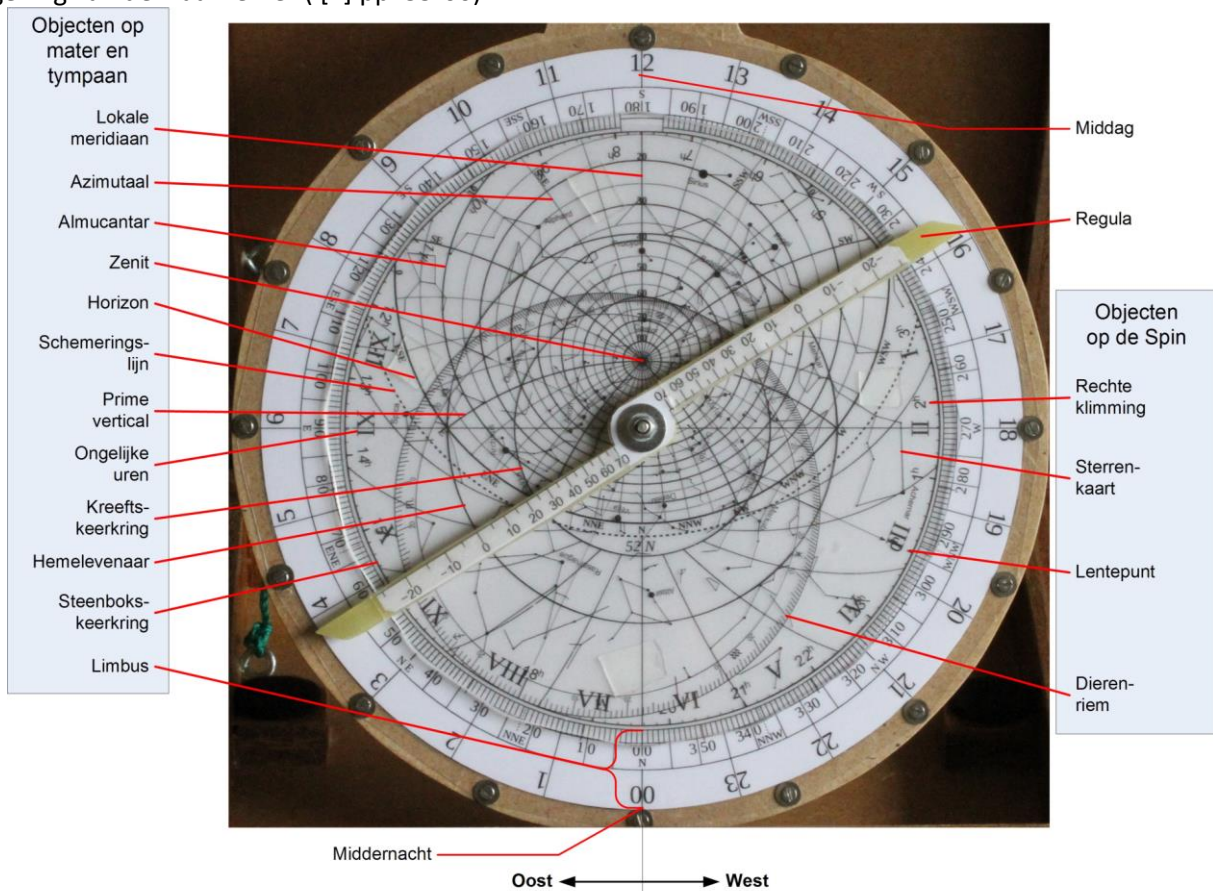
Het planisferisch astrolabium bestaat uit een aantal onderdelen ([28], [29] en [4] p. 53). Op de achterkant bevinden zich de onderdelen die worden gebruikt voor waarneming. Op de voorkant zitten de onderdelen die gebruikt worden voor het oplossen van astronomische vraagstukken, zoals het bepalen van de tijd. Al die onderdelen zijn gemonteerd op de *mater*, de basisplaat van het astrolabium. De meeste afbeeldingen zijn van het zelfbouw-model. Dit model wordt verderop in dit document uitgebreid besproken.



Figuur 6: Astrolabium in onderdelen (Mathematisch-Physikalischen Salon, Dresden. Foto: Creative Commons)

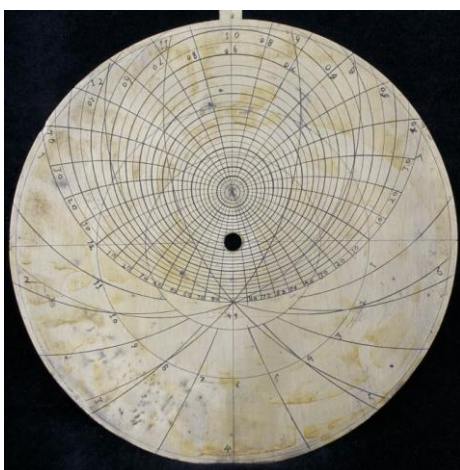
6.1 De voorkant van het astrolabium

Op de voorkant vinden we de twee projecties genoemd in hoofdstuk 4: die van het hemelgewelf en die van de omgeving van de waarnemer ([4] pp. 55-66).



Figuur 7: Voorzijde van het planisferisch astrolabium (zelfbouw)

De projectie van de omgeving van de waarnemer is afgebeeld op de *tympan*, het gedeelte dat zich binnen de buitenste gradenverdeling bevindt. In Figuur 6 zijn dat het derde en vierde onderdeel van rechts. Omdat deze projectie, afhankelijk van de geografische breedte waar de waarnemer zich bevindt, steeds verschillend is, is dit onderdeel verwisselbaar. Originele astrolabia uit de middeleeuwen waren vaak voorzien van een aantal tympanen voor verschillende geografische breedtes, in intervallen van bijvoorbeeld 3 of 5 graden. De ongebruikte tympanen werden opgeborgen in een holte in de voorkant van de mater. Op de tympan zijn cirkels te vinden die de hoogte boven de horizon weergeven, de almucantaren (in de rest van het verhaal zal ik ze hoogtelijnen noemen) en de azimutalen (cirkelbogen die de richting ten opzichte van het ware noorden aangeven). Het snijpunt van de azimutalen is het zenit van de waarnemer. De 0° hoogtelijn is de horizon. De gestippelde boog daaronder is de -6° hoogtelijn, de grens van de burgerlijke schemering. Vaak vinden we onder de horizon, buiten het gebied van de hoogtelijnen, nog een aantal cirkelbogen waarin de Romeinse cijfers I t/m XII vermeld staan. Deze zijn bedoeld voor de omzetting van gelijke uren naar ongelijke uren en omgekeerd. Soms werden, ten behoeve van astrologen, op de tympan de "hemelhuizen" aangegeven ([30] en [4] pp. 62-63), zie Figuur 8 (de bogen die elkaar snijden in het noordpunt).



Figuur 8: Tympan met hemelhuizen

De projectie van het hemelgewelf is afgebeeld op het fraai bewerkte onderdeel dat op de tympan ligt: de *spin*, zie Figuur 6 (tweede van rechts). De puntige uitsteeksels zijn de posities van de vaste sterren en de excentrische cirkel is de projectie van de ecliptica. Traditioneel is de ecliptica onderverdeeld in de tekens van de

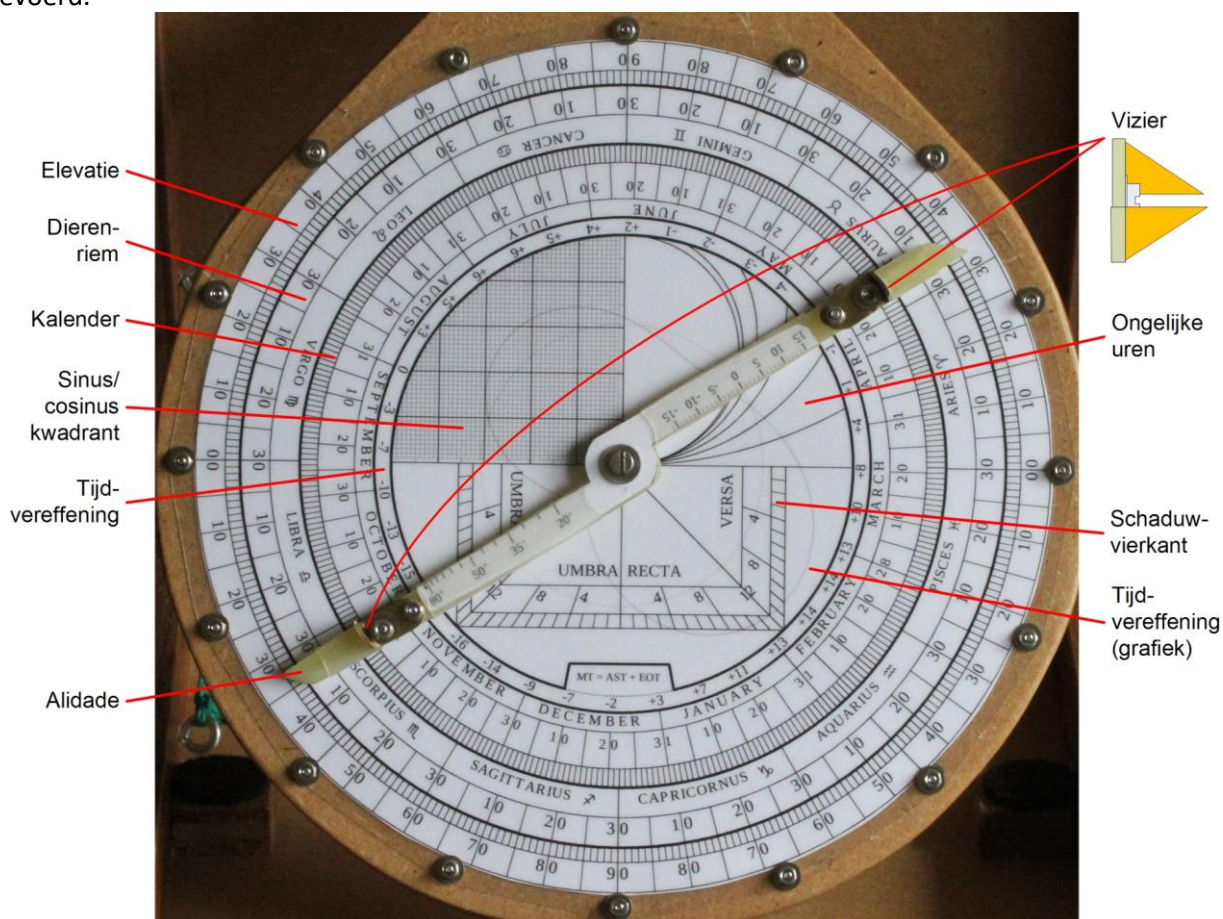
dierenriem⁹. Als we de spin zodanig draaien dat Ram links ligt en Weegschaal rechts, dan stelt de horizontale lijn die het lentepunt ($0^\circ \Upsilon$) verbindt met het herfstpunt ($0^\circ \Omega$) de jaargetijnsnede van de equinoxen voor. De lijn loodrecht daarop is de jaargetijnsnede van de zonnewendes¹⁰. De spin omvat geen projectie van de hele hemelbol. Meestal ging de maker van het astrolabium niet verder dan de keerkring in het tegenoverliggende halfrond (in ons geval dus de Steenbokskeerkring, zie Figuur 7), omdat – naarmate we dichterbij het brandpunt van de projectie komen – parallellen op de aardbol progressief steeds verder uit elkaar worden afgebeeld. De rand aan de buitenkant van de spin heeft een schaalverdeling in uren rechte klimming. De spin heeft geen eeuwigheidswaarde! Door de precessie van de aardas verandert de oriëntatie van de sterren t.o.v. het lentepunt, waardoor na een tijdsbestek van ongeveer een eeuw de spin onbruikbaar begint te worden voor wat betreft sterposities.

Op de mater, rond de tympan en de spin, is ook een schaalverdeling te vinden. Deze is onderverdeeld in uren en – vaak ook – in graden. Deze rand wordt de *Limbus* genoemd.

Het onderdeel dat hier weer op ligt is de *regula* (de indexwijzer, ook wel *ostensor* genoemd). Zie Figuur 6, uiterst rechts. De regula wordt gebruikt om een gevonden oplossing te vertalen naar de limbus in datgene waarin we geïnteresseerd zijn: de tijd en het azimut. Op de regula is een schaalverdeling aangebracht, onderverdeeld in graden declinatie.

6.2 De achterkant van het astrolabium

De achterkant ([4] pp. 109-146) bevat het eigenlijke meetinstrument en de bijbehorende schaalverdelingen. Het meetinstrument is een draaibare liniaal met een vizier erop: de *alidade*. Hiermee worden hoogtemetingen uitgevoerd.



Figuur 9: Achterzijde van het astrolabium (zelfbouw)

Onder de alidade zijn, op de mater, de volgende schaalverdelingen aanwezig:

- Gradens elevatie;
- Gregoriaanse kalender. Door de excentriciteit van de Aardbaan is de kalender gecomprimeerd aan de “zomerkant” (aphelium, ≈ 3 juli) t.o.v. de “winterkant” (perihelium, ≈ 3 januari). Op andere astrolabia wordt hetzelfde effect bereikt door de kalender excentrisch te tekenen. Zie de perkenwet van Kepler;

⁹ Er zijn ook "moderne" astrolabia, waarbij op deze plaats een Gregoriaanse kalender is aangebracht.

¹⁰ De jaargetijnsneden vinden we ook terug op de armillaire sfeer, maar daar zijn het ringen!

- Zonsposities in de ecliptica, onderverdeeld in de tekens van de dierenriem.

Vaak vinden we hier ook nog een of meer van de volgende zaken:

- Schaduwvierkant voor hoogte- en afstandsmetingen;
- Bogendiagram voor schatting van ongelijke uren;
- Sinus- en cosinuskwadrant, voor het bepalen van de richting naar een andere plaats op de Aarde;
- Tijdvereffening (niet op historische instrumenten).

7 Tijdbepaling

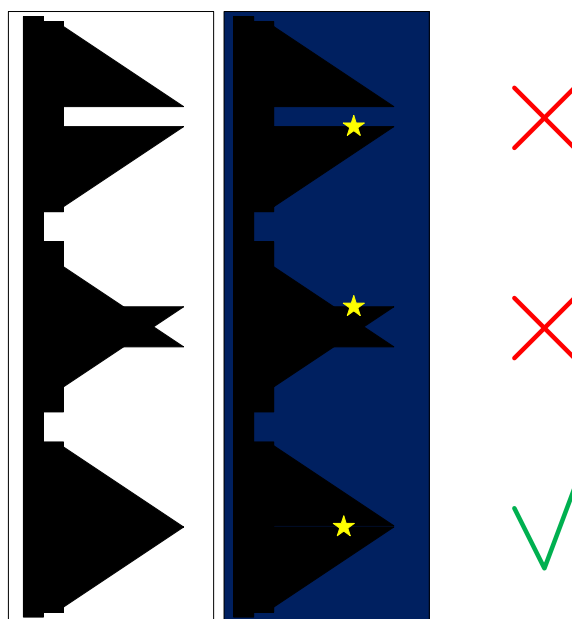
Het primaire gebruiksdoel van het planisferisch astrolabium is tijdwaarneming [16]. Om de juiste uitkomst te krijgen is het eerst nodig dat de mater wordt voorzien van de tympan voor de juiste geografische breedte. Een tympan voor 52°N is in heel Nederland te gebruiken met voldoende nauwkeurigheid. In België voldoet 51°N beter.

7.1 Kies het waar te nemen object

In de meeste gevallen zal dat de zon zijn. Echter, als een ster wordt gebruikt: kies een voldoende helder exemplaar in de omgeving van de ecliptica. Bedenk dat als het object in kwestie in de buurt staat van zijn maximale hoogte boven de horizon (culminatie), dat de nauwkeurigheid van de tijdwaarneming sterk afneemt. Dat geldt ook voor de zon: metingen rond de middag zijn onnauwkeurig, want op dat moment verandert de zonshoogte nauwelijks met het verstrijken van de tijd.

7.2 Meet de hoogte

Houd het astrolabium stevig vast bij de ring, zodanig dat het instrument vrij kan scharnieren om het bevestigingspunt. Draai vervolgens de alidade zodanig dat het object in het vizier staat. Pas op bij de zon: gebruik in dat geval de schaduw van het vizier of zet een eclipsbril op! Zie Figuur 10. De ster mag nog door een zeer smalle spleet zichtbaar zijn tussen de twee helften van het vizier.



Figuur 10: het vizier van de alidade. Links: schaduw van de zon, rechts: meting aan een ster

Lees de hoogte van het object af bij de rand van de alidade. Een valkuil is hierbij het gebruik van de verkeerde rand: neem de rand die door het middelpunt loopt! Onthoud ook of het object is waargenomen boven de oostelijke of de westelijke horizon.

7.3 Overige gegevens

Nu de hoogte bekend is, kunnen de overige gegevens worden afgelezen op de achterkant van de mater. Zoek bij de datum de positie van de zon in de dierenriem en de tijdvereffening. De positie van de zon is altijd nodig, want de zon is de uurwijzer!

7.4 Bewerkingen op de voorkant

Het is nu tijd om het astrolabium om te draaien.

- Zoek op de ecliptica-ring van de spin de positie van de zon op zoals gevonden in paragraaf 7.3.

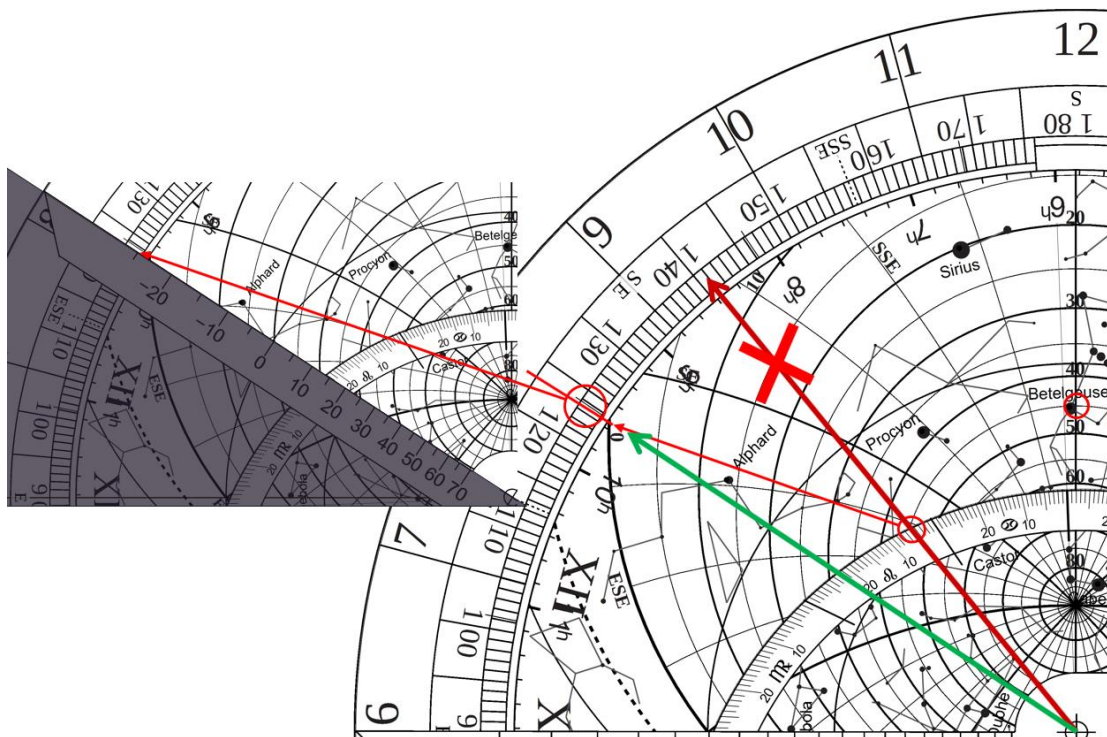
- Draai de spin zodanig dat de positie van het waargenomen object overeenkomt met de waargenomen hoogte. Er zijn twee punten waarvoor dit klopt: een boven de oostelijke en een boven de westelijke horizon. Neem dus het juiste punt!
- Draai de regula zodanig dat deze de zonspositie op de spin aanwijst, *zonder de spin te verdraaien*.
- Lees nu op de limbus bij de zonspositie de ware plaatselijke tijd af. Daar is middelbare plaatselijke tijd van te maken door de tijdvereffening in rekening te brengen, en standaardtijd door het lengteverschil met de standaardmeridiaan in rekening te brengen volgens 1 uur = 15 graden.

Er zijn vanaf dit punt nog meer gegevens uit deze waarneming te halen. Bijvoorbeeld:

- Als het waargenomen object een ster was, kan de lokale uurhoek (LHA) hiervan worden gevonden door de regula op te lijnen met de ster. Vervolgens kan op de limbus de LHA worden afgelezen *tegenover* de sterpositie. Tegenover, omdat in tegenstelling tot de plaatselijke tijd de LHA niet wordt gerekend vanaf noord (middernacht), maar vanaf zuid (middag).
- De sterrentijd is te vinden door deze af te lezen op de limbus op het punt waar de herfstequinox (0°♏) op de spin naar wijst.
- De richting van het noorden. Dit lukt het makkelijkst bij waarneming van de zon. De uitkomst is, met inachtname van de onnauwkeurigheid van de meting en het instrument zelf, exact.

Zie Figuur 11: zon op 5°♏ , hoogte 45° , voor de middag.

- Lees bij de zonspositie, op de tympan, het azimuth van de zon af (in Figuur 11 iets oostelijk van ZOto, afgerond 123°). Gebruik daarbij de azimuthaalbogen.
- Wijs deze *hoekwaarde* (123° , groene pijl) met de regula aan op de limbus (soms wordt de fout gemaakt dat de regula wordt opgelijnd met de zonspositie in de ecliptica. Dit geeft niet het juiste resultaat. De foute richting is hier aangegeven met een dikke rode pijl en een rood kruis). Reken de hoek rechtsom vanaf noord (middernacht).
- Leg het astrolabium plat op de grond, zodanig dat de schaduw van een verticaal object (bijvoorbeeld een paal of de hoek van een gebouw) opgelijnd is met de regula.
- De lokale meridiaan wijst nu in de noord-zuid richting (uiteraard zuid aan de kant waar de zon zich bevindt).



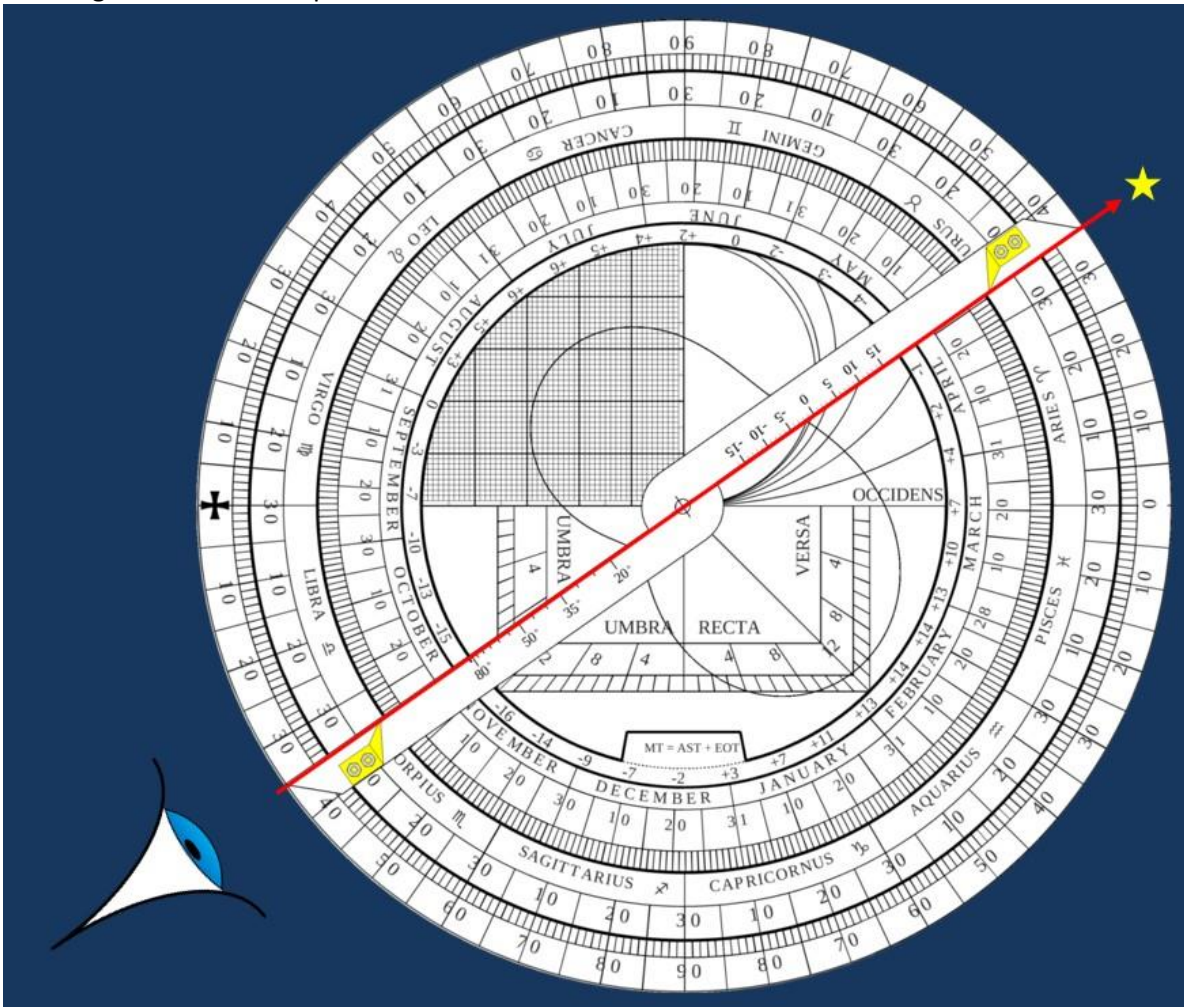
Figuur 11: Astrolabium als kompas

7.5 Voorbeeld.

Het voorbeeld betreft een meting aan de ster Alpheratz (α Andromedae) op 35° boven de oostelijke horizon (rijzend dus). De datum is 26 oktober en de geografische positie is $52^\circ\text{N } 4^\circ 48'\text{E}$. Er moet dus een tympaan worden gemonteerd die geschikt is voor 52°N . In dit voorbeeld is de tympaan voor die breedte geconstrueerd.

7.5.1 Hoogtemeting

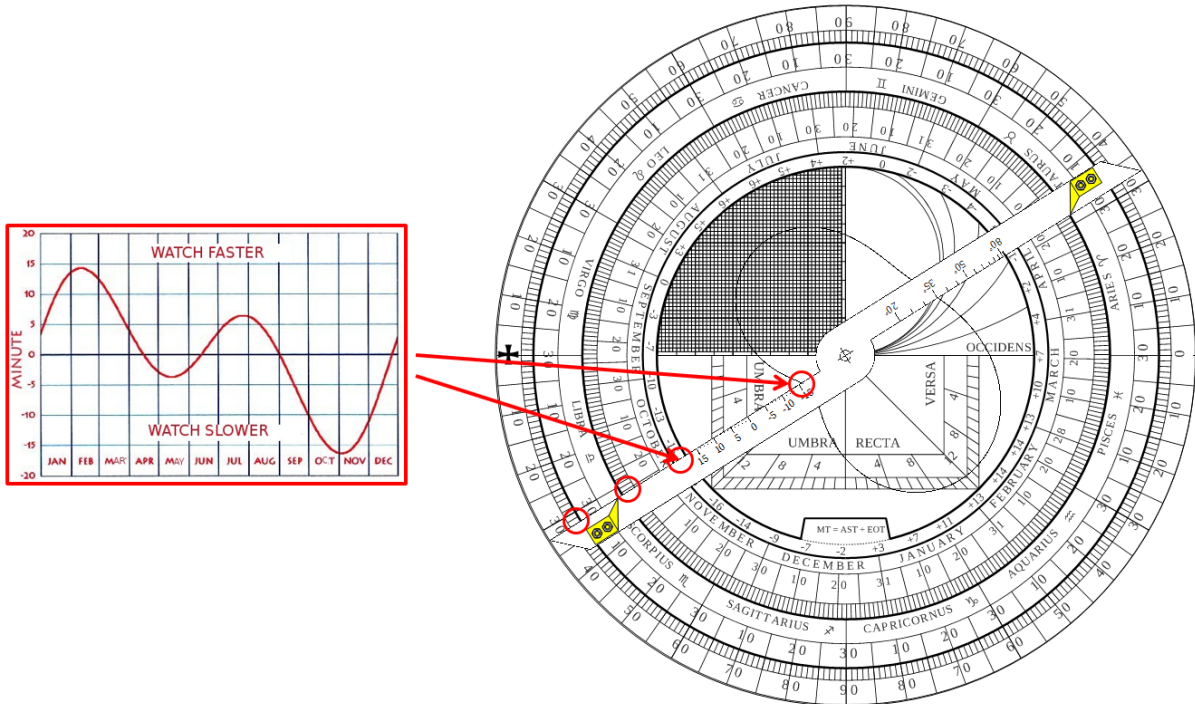
Hoogtemeting met de alidade op 35° :



Figuur 12: Hoogtemeting met de alidade

7.5.2 Overige gegevens op de achterkant.

Op 26 oktober staat de zon op 2° Scorpius (♏), tijdvereffeningscorrectie -16 minuten:



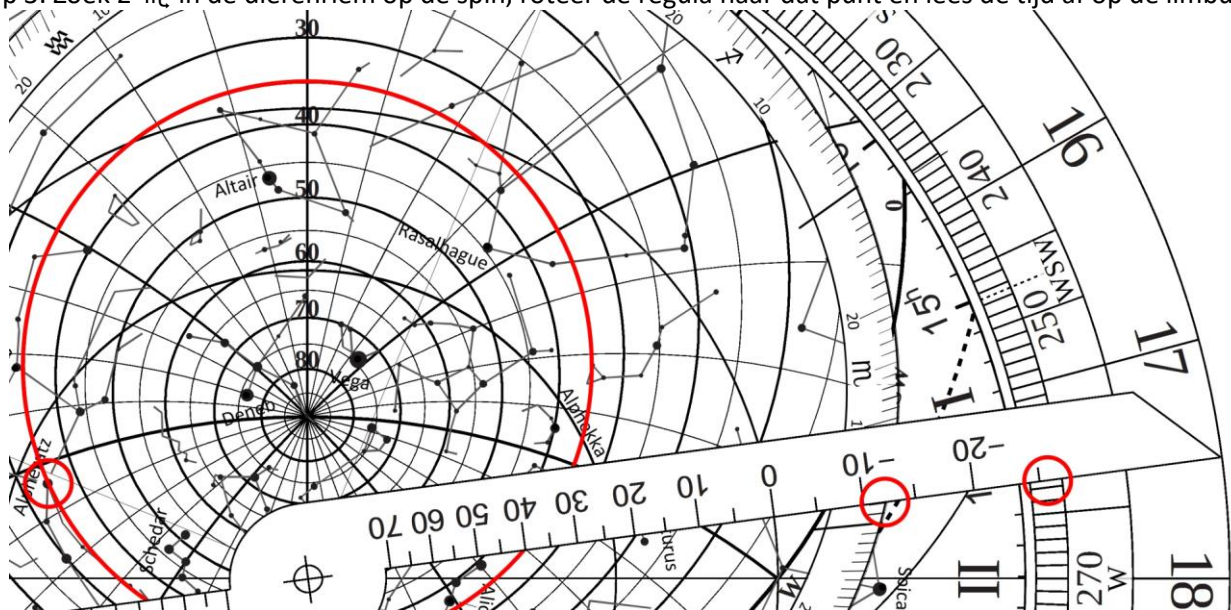
Figuur 13: Overige gegevens op de achterzijde (tijdvereffeningsgrafiek Wikipedia / Creative Commons)

7.5.3 De tijdbepaling

Stap 1. Zoek Alpheratz op de spin, en lokaliseer de 35° hoogtelijn.

Stap 2. Zie Figuur 14: roteer de spin en zet Alpheratz op 35° hoogte boven de oostelijke horizon.

Stap 3. Zoek 2° ♏ in de dierenriem op de spin, roteer de regula naar dat punt en lees de tijd af op de limbus.



Figuur 14: Tijdmeting, eindresultaat

Ware plaatselijke tijd = 17:30 uur.

Tijdverschil met middeleuropese zomertijd (MEZT) = 1h41'.

MEZT = 17:30 + 01:41 – 00:16 = 18:55 uur.

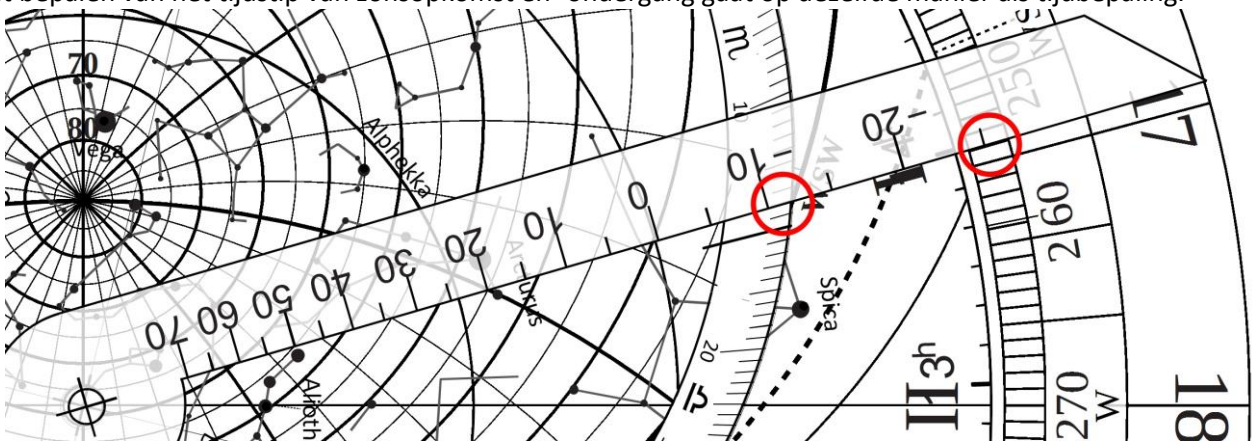
Alpheratz staat op ongeveer 40% vanaf oost tussen de oostelijke en de oost-ten-noorden azimuthalen in. Een “ten”-streek is ongeveer elf graden, dus het azimuth is $90^{\circ} - (11^{\circ} \times 0.4) = 85^{\circ}36'$.

Werkelijke waarden (cf. Stellarium): 18:52:25 MEZT, azimuth $85^{\circ}52'$. Beide uitkomsten kloppen dus binnen één graad.

8 Overige toepassingen

8.1 Zonsopkomst en -ondergang

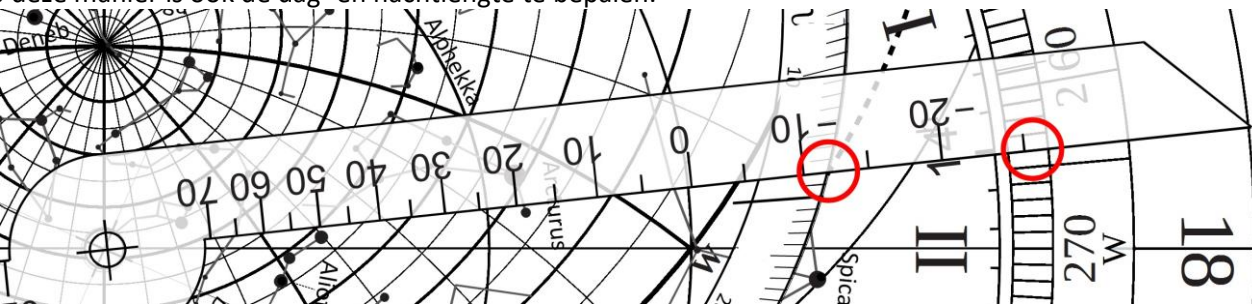
Het bepalen van het tijdstip van zonsopkomst en -ondergang gaat op dezelfde manier als tijdbepaling.



Figuur 15: Zonsondergang

Gebruik als object de zon en als hoogtelijn die van 0 graden (de horizon dus). Aan de linkerkant (oostelijke horizon) is het tijdstip van zonsopkomst te vinden, in spiegelbeeld er tegenover (westelijke horizon) het tijdstip van zonsondergang. In Figuur 15 is het tijdstip van zonsondergang te zien met de zon op $2^{\circ}M$: vier minuten voor vijf 's middags (ware plaatselijke tijd). In MEZT wordt dat dus $16:56 + 01:41 - 00:16 = 18:21$.

Op deze manier is ook de dag- en nachtlengte te bepalen.



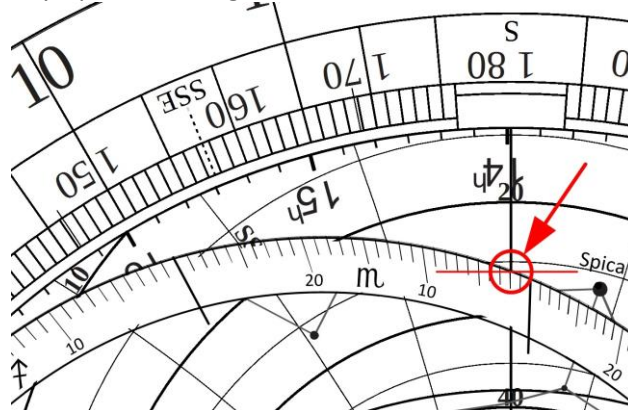
Figuur 16: Burgerlijke schemering

De burgerlijke schemering wordt aangegeven met de gestippelde boog onder de horizon. In dit voorbeeld (Figuur 16) is de schemering voorbij om 17:36 ware plaatselijke tijd, $17:36 + 01:41 - 00:16 = 19:01$ MEZT.

8.2 Maximale zonshoogte

Hoe hoog komt de zon vandaag boven de horizon?

Zoek daarvoor op de achterkant de zonspositie bij de datum. Draai het astrolabium om, en roteer de spin zodanig dat de zonspositie in het zuiden staat (op 12 uur). Lees vervolgens bij het snijpunt van de dierenriem met de lokale meridiaan op de tympan de hoogte af.



Figuur 17: Maximale zonshoogte

Uit Figuur 17 blijkt de maximale zonshoogte ongeveer 26 graden te zijn voor $2^{\circ}M$.

8.3 Ongelijke uren

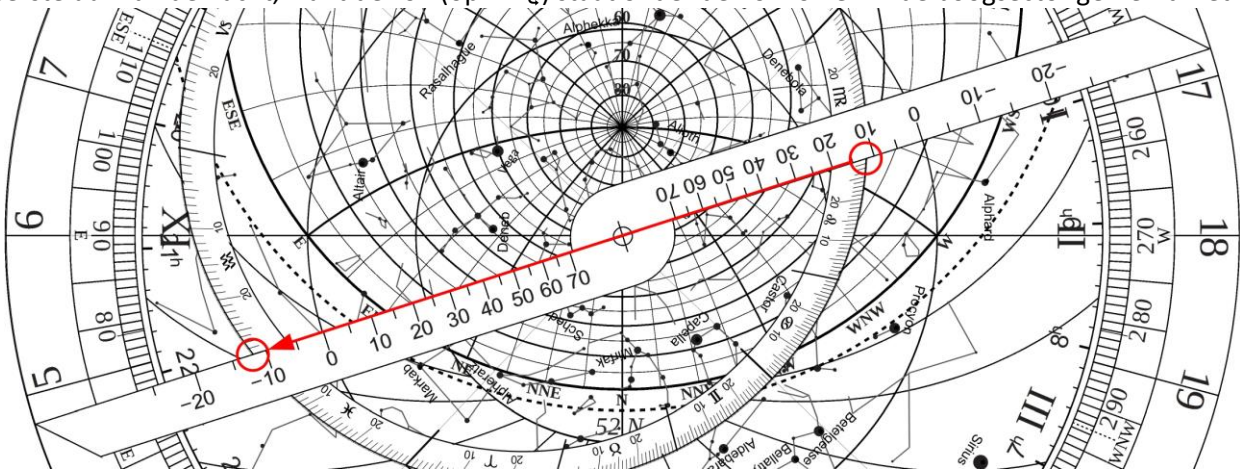
In de vroege middeleeuwen werd de tijd ook wel anders aangeduid: het eerste uur na zonsopgang was het eerste uur van de dag, het laatste uur voor zonsondergang was het twaalfde uur van de dag. Vanzelfsprekend verschilde dat per seizoen: tijdens hoogzomer waren de uren overdag langer omdat de dag langer duurde, in de winter waren de uren overdag juist korter.

Het omrekenen kan zowel op de tympaan als met het bogendiagram op de achterkant.

Met de tympaan ([4] pp. 55-66), zie Figuur 18:

- Stel de regula en de spin in op datum en tijd.
- Zoek op de spin het antisolaire punt. Dat ligt op de dierenriem, diametraal tegenover de zonpositie.
- De sector waarin het antisolaire punt zich bevindt is genummerd (in Romeinse cijfers) met het bijbehorende ongelijke uur van de dag.

Voor de ongelijke uren van de nacht wordt de zonpositie zelf gebruikt. In Figuur 14 is het ongelijke uur het eerste uur van de nacht, want de zon (op $2^{\circ}M$) staat onder de horizon en in de boogsector gemerkt met **I**.

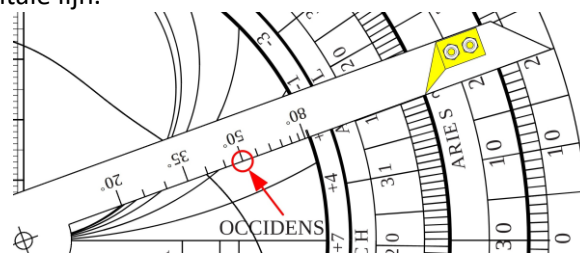


Figuur 18: Ongelijke uren op de tympaan

In het voorbeeld van Figuur 18 is uitgegaan van 22 augustus, zonpositie $29^{\circ}\delta$. De gemeten hoogte is 20° boven de westelijke horizon. Het antisolaire punt, gemerkt met pijl en cirkel, bevindt zich in de boogsector gemerkt **XI**, het elfde uur van de dag dus.

Hetzelfde voorbeeld, met het bogendiagram op de achterkant ([4] pp. 117-120), zie Figuur 19:

- Bepaal de maximale zonshoogte voor de datum.
- Meet de zonshoogte met de alidade.
- Op de alidade bevindt zich een schaalverdeling van 20° tot 80° . Zoek de maximale zonshoogte op deze schaalverdeling.
- De boogsector waarin dit punt zich bevindt is het ongelijke uur na zonsopkomst of vóór zonsondergang, gerekend vanaf de horizontale lijn.



Figuur 19: Ongelijke uren, bogendiagram op de achterkant

Volg de procedure van paragraaf 8.2 met de zon op $29^{\circ}\delta$: dat geeft een maximale hoogte van 50° . Dit punt bevindt zich in de tweede boogsector boven de horizontale lijn (zie Figuur 19). Dus lezen we af uit het diagram dat het ongelijke uur het tweede uur na zonsopkomst of vóór zonsondergang is, oftewel het tweede of het elfde uur van de dag. Omdat de zon boven de westelijke horizon staat en het dus na de middag is, kiezen we voor het elfde uur. Dat komt overeen met het voorbeeld in Figuur 18.

Omdat de zonshoogte gemeten moet kunnen worden, is deze methode alleen overdag bruikbaar.

Het resultaat met het bogendiagram is een benadering ([4] pp. 219-220).

8.4 Richting naar een andere plaats op de Aarde

Hiervoor wordt het sinus-cosinuskwadrant gebruikt [31], zie Figuur 20. Als voorbeeld wordt – om in stijl te blijven – de richting naar Mekka gevraagd. Uitgangspunt is Den Helder.

Nodig hiervoor zijn:

- De eigen geografische positie: $52^{\circ}58'N$ $4^{\circ}48'E$;
- De geografische positie van Mekka: $21^{\circ}25'N$ $39^{\circ}49'E$;
- Het breedteverschil Δlat . Afgerond $21.25^{\circ} - 52^{\circ}58' \approx -31^{\circ}30'$ (rode lijn in de figuur¹¹).
- Het lengteverschil $\Delta long$. Afgerond $39^{\circ}49'E - 4^{\circ}48' \approx 35^{\circ}$ (blauwe lijn in de figuur).
- Het kwadrant waar Mekka te vinden is, in dit geval zuidoost.

Het lengteverschil wordt linksom gerekend vanaf 90° . De groene pijl (door het snijpunt van de sinus van het breedteverschil en de sinus van het lengteverschil) wijst nu in de richting waar we Mekka kunnen vinden, *gerekend vanaf de lokale parallel*. Voor het vinden van de rechtwijzende peiling geldt:

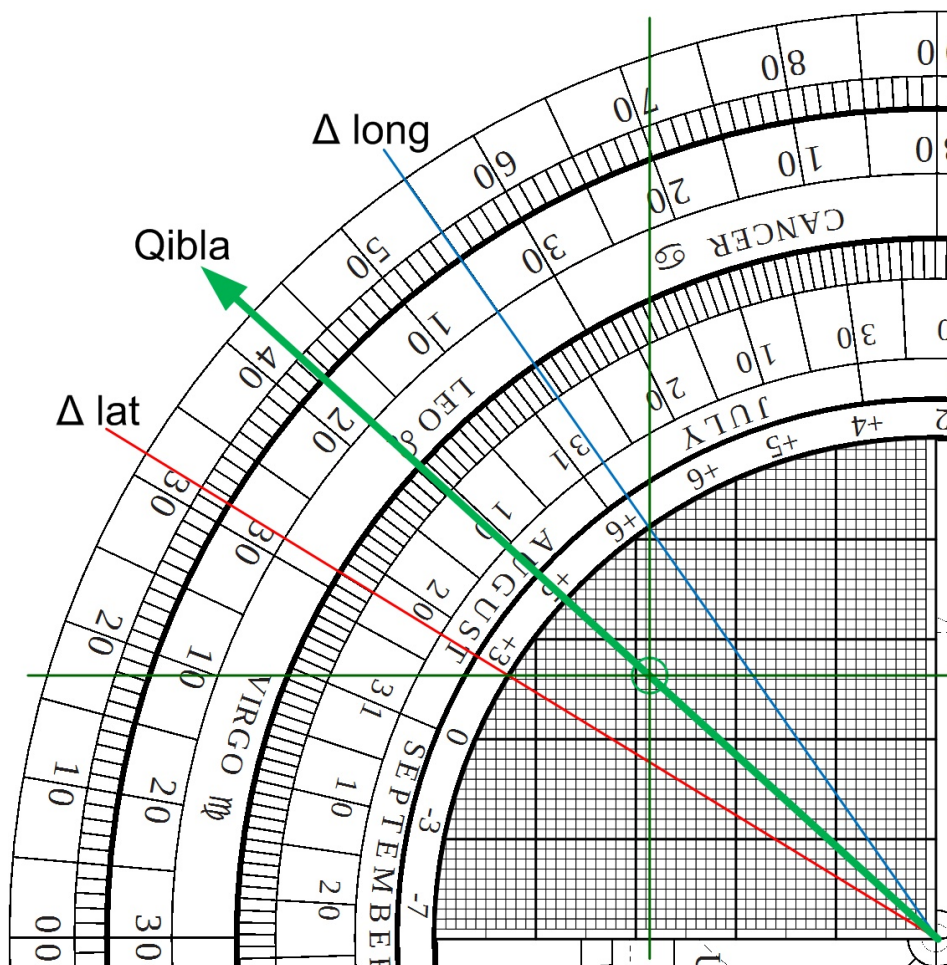
Δlat	$\Delta long$	Kwadrant t.o.v. waarnemer	Correctie
positief	positief	NO	Aftrekken van 90°
positief	negatief	NW	Optellen bij 270°
negatief	positief	ZO	Optellen bij 90°
negatief	negatief	ZW	Aftrekken van 270°

In dit geval 90° optellen (kwadrant = ZO), dus de qibla is $90^{\circ} + 42^{\circ}30' = 132^{\circ}30'$.

Dit is niet exact; de ware peiling is 126° . Naarmate de afstand groter wordt, neemt de fout toe.

In formule is deze bewerking¹²: $Qibla = \tan^{-1}(\sin(\Delta lat) / \sin(\Delta lon))$ voor de hoek vanaf de lokale parallel.

In dit voorbeeld: $Qibla = 90^{\circ} + \tan^{-1}(\sin(31^{\circ}30') / \sin(35^{\circ})) = 90^{\circ} + \tan^{-1}(0.523 / 0.574) = 132^{\circ}19'$.



Figuur 20: Qibla op het sinus-cosinuskwadrant

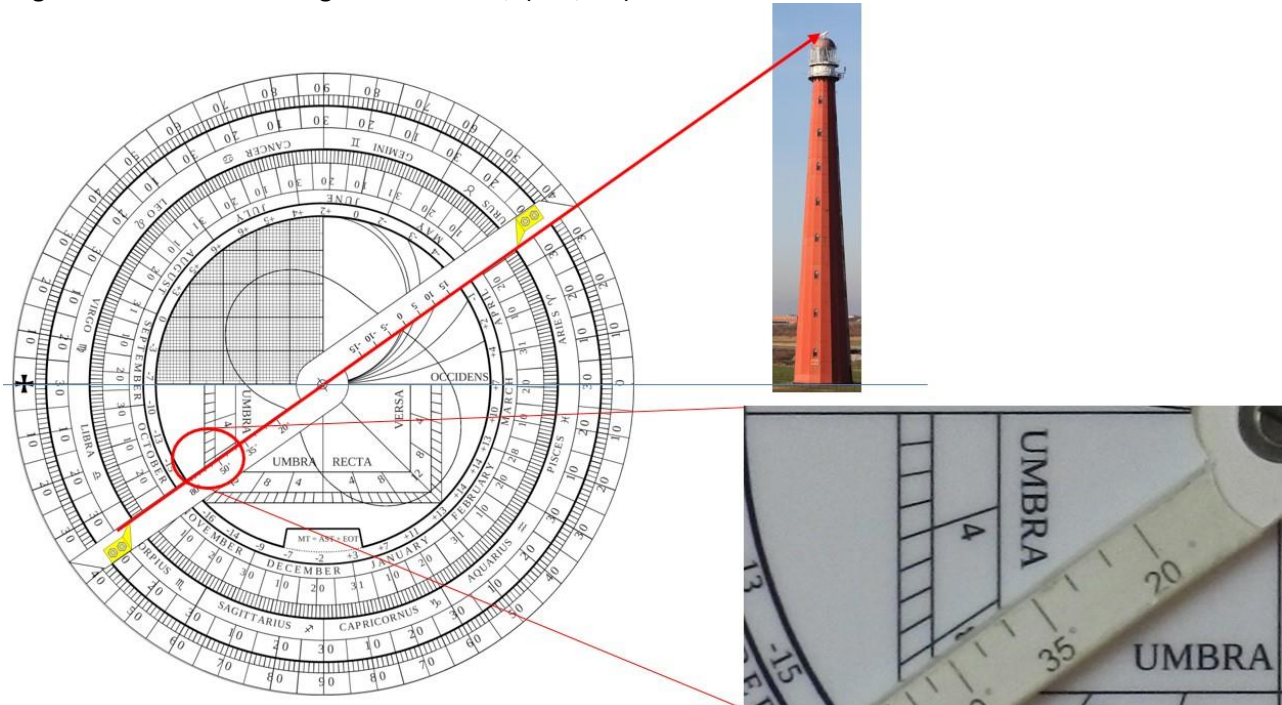
¹¹ Het kwadrant werkt alleen met positieve waarden. Zelf dus het teken bepalen uit de algemene goniometrische regels.

¹² Dit geeft een singulariteit voor $\Delta lon = 0$. In dat geval is de uitkomst $\pm 180^{\circ} / \pm 90^{\circ}$, dus de qibla $\pm 90^{\circ}$.

8.5 Het schaduwvierkant

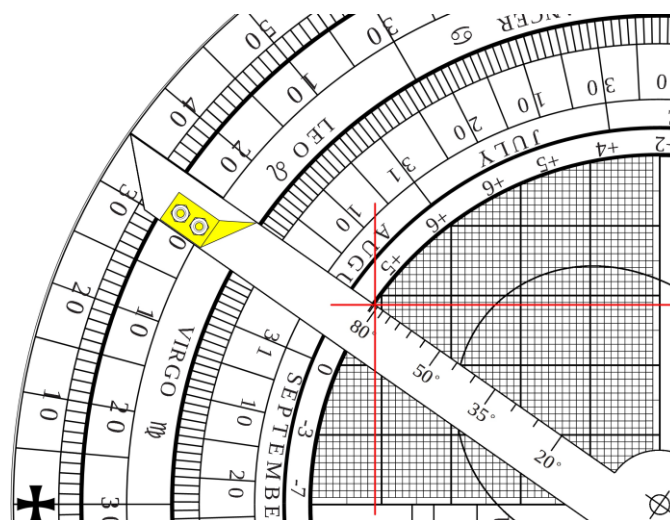
Het schaduwvierkant wordt gebruikt voor hoogte- of afstandmetingen ([4] pp. 114-116). Dit gebeurt door de hoogte van bijvoorbeeld een toren te meten met de alidade. Als de hoogte bekend is, kan de afstand worden bepaald en omgekeerd: als de afstand bekend is, kan de hoogte worden berekend. Dit gebeurt met de schaalverdeling op het schaduwvierkant, die de hoogte/afstand verhouding aangeeft. In dit voorbeeld in twaalfden, maar andere schaalverdelingen zijn ook aangetroffen.

In Figuur 21: Afstand = <hoogte vuurtoren> / (8.5 / 12) .



Figuur 21: Gebruik van het schaduwvierkant

Wellicht interessant is het gegeven dat het sinus-cosinuskwadrant ook voor dit doel kan worden gebruikt. Door de alidade bij de hoogtemeting hier overheen te positioneren, kunnen sinus en cosinus worden afgelezen. Door de cosinus te delen op de sinus wordt de tangens verkregen, en dit is dezelfde verhouding (maar dan in eenheden van 1/50 in plaats van 1/12) als uit het bovenstaande voorbeeld. Zie Figuur 22.



Figuur 22: Afstandsmeting met het sin/cos kwadrant

De sinus $\approx 28.7/50$, de cosinus $\approx 41/50$, de tangens dus $28.7/41 = 0.700$.

Met het schaduwvierkant is de tangens $8.5/12 \approx 0.708$.

Het verschil is hier in de orde van 1%, waarbij het sin/cos-kwadrant dichter bij de waarheid zit (0.7002 op de rekenmachine).

8.6 Plaatsbepaling

Het is met het planisferisch astrolabium zelfs mogelijk om de geografische positie van de waarnemer te bepalen. Hierbij maken we gebruik van het feit dat we een nieuwe onbekende introduceren (geografische lengte) en een andere onbekende elimineren (standaardtijd). Daarvoor moet de waarnemer dus toegang hebben tot een klok die standaardtijd aangeeft. Nauwkeurig is deze methode niet – denk aan een onnauwkeurigheid in de orde van ± 100 kilometer¹³ – maar in principe is het mogelijk.

- Bepaal de geografische breedte door de hoogte van de zon te meten rond het middaguur. Doe een aantal waarnemingen tot de zon weer begint te zakken, het maximum is de juiste waarde.
- Monteer de tympaan die hoort bij de gevonden breedte.
- Doe een tijdwaarneming zoals beschreven in paragraaf 7, met inachtnaam van het feit dat tijdwaarnemingen rond het middaguur onnauwkeurig zijn. Wacht dus tot de zon ongeveer tot de helft van het maximum boven de horizon is gezakt.
- Lees op uw horloge de tijd af. Herleid, als zomertijd van kracht is, de afgelezen tijd naar standaardtijd. Voor Nederland betekent dat: 1 uur aftrekken van de kloktijd.
- Het verschil tussen de tijdwaarneming en de naar standaardtijd herleide kloktijd is een maat voor het geografische lengteverschil, met 1 uur = 15 graden. Reken het lengteverschil vanaf de meridiaan die geldt voor de standaardtijd. Voor Nederland is dat 15° oost.
- Daarmee zijn lengte en breedte, en daarmee de positie, bekend.

Het is een omslachtige methode, maar het werkt.

8.7 Andere toepassingen

Er zijn nog vele andere toepassingen voor het astrolabium [16] [32]. De ruimte ontbreekt hier echter om daarop in te gaan. Een korte opsomming (voor sommige bewerkingen is een ephemeris nodig):

- Plotten van de Maan en de planeten¹⁴
- Aflezen van astronomische coördinaten in rechte klimming en declinatie
- Berekening van astrologische aspecten
- Aflezen van ascendant, midhemel (M.C.) en descendant (voor de "hemelhuizen" (systeem Regiomontanus) is een daarvoor geschikte tympaan nodig. The Astrolabe Generator kan hier een afbeelding van maken)
- Aflezen van de maanfase en de elongatie van de Maan¹⁴
- Aflezen van het moment dat een hemellichaam een bepaalde hoogte of azimut bereikt
- Het aflezen van de hoekafstand tussen twee hemellichamen
- Het plotten van een grootcirkel door twee hemellichamen of geografische posities (het universeel astrolabium is hiervoor beter geschikt)
- Aflezen van de circumpolaire breedte van een hemellichaam
- Aflezen van het seizoen dat het 's nachts niet helemaal donker wordt (hiervoor moet de tympaan zijn voorzien van de begrenzing van de astronomische schemering op hoogte = -18°)
- Aflezen van de coördinaten van een nieuw hemellichaam (bijvoorbeeld een supernova)
- Aflezen van de datum van de nieuwe maansikkel¹⁴

Bij het oefenen met een astrolabium kan een planetariumprogramma (bijvoorbeeld Stellarium, www.stellarium.org) goede diensten bewijzen om uw uitkomsten te controleren. Dat is in dit document ook gedaan met de voorbeelden.

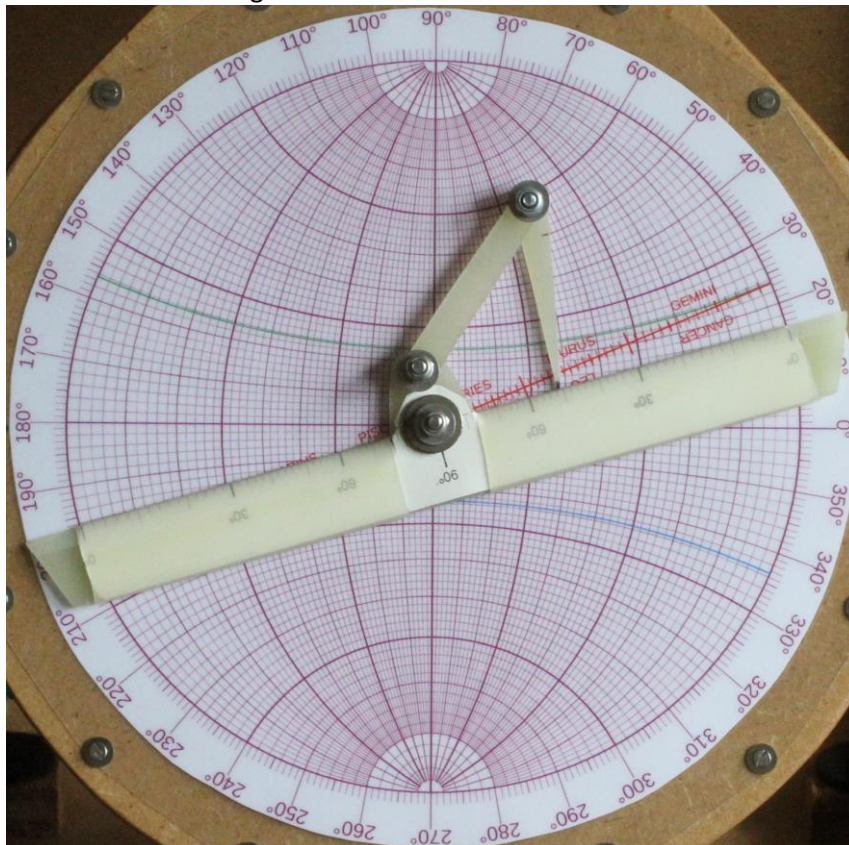
¹³ Vanwege de afleesnauwkeurigheid, die is ongeveer 1° . Dat komt overeen met ongeveer 111 kilometer langs een grootcirkel.

¹⁴ Voor deze bewerking is een ephemeris nodig.

9 Het universeel astrolabium

9.1 Anatomie van het universeel astrolabium

Het planisferisch astrolabium heeft een beperking: de tympaan moet geschikt zijn voor de geografische breedte van de waarnemer. Bij toenemende afwijkingen daarin worden fouten in de tijdbepaling navenant groter ([4] pp. 165-166). Arzachel vond een manier om hierin te voorzien door de stereografische projectie vanuit één van de equinoxen uit te voeren. Het projectievlak is de jaargetijnsnede van de zonnewendes. De voorkant komt er dan uit te zien als in Figuur 27:



Figuur 23: Astrolabium Catholicum (zelfbouw)

Lezers die zich bezighouden met mineralogie e.d. herkennen hier onmiddellijk het zogenaamde Wulffse net [33].

De regula heeft hier een gradenverdeling conform de snijpunten van de meridianen met de evenaar. Het "aanhangel" aan de bovenkant van de regula is de brachiolus (armpje), door Metius "wyserken" (wijzertje) genoemd [20]. De brachiolus draait mee met de regula.

Op de achterkant is in dit model hetzelfde aangebracht als op het planisferisch astrolabium.

9.2 Het gebruik van het astrolabium catholicum

9.2.1 Coördinaattransformaties

Het astrolabium catholicum is een slimme oplossing voor coördinaattransformaties op boloppervlakken [20] [34]. Het Wulffse net kunnen we zien als een voorstelling van equatoriale coördinaten, van het horizontale (Alt-Az) coördinatenstelsel, van het ecliptische coördinatenstelsel (astronomische lengte λ en breedte β) of elke andere oriëntatie. Welke oriëntatie wordt gebruikt hangt af van de stand van de regula en de brachiolus.

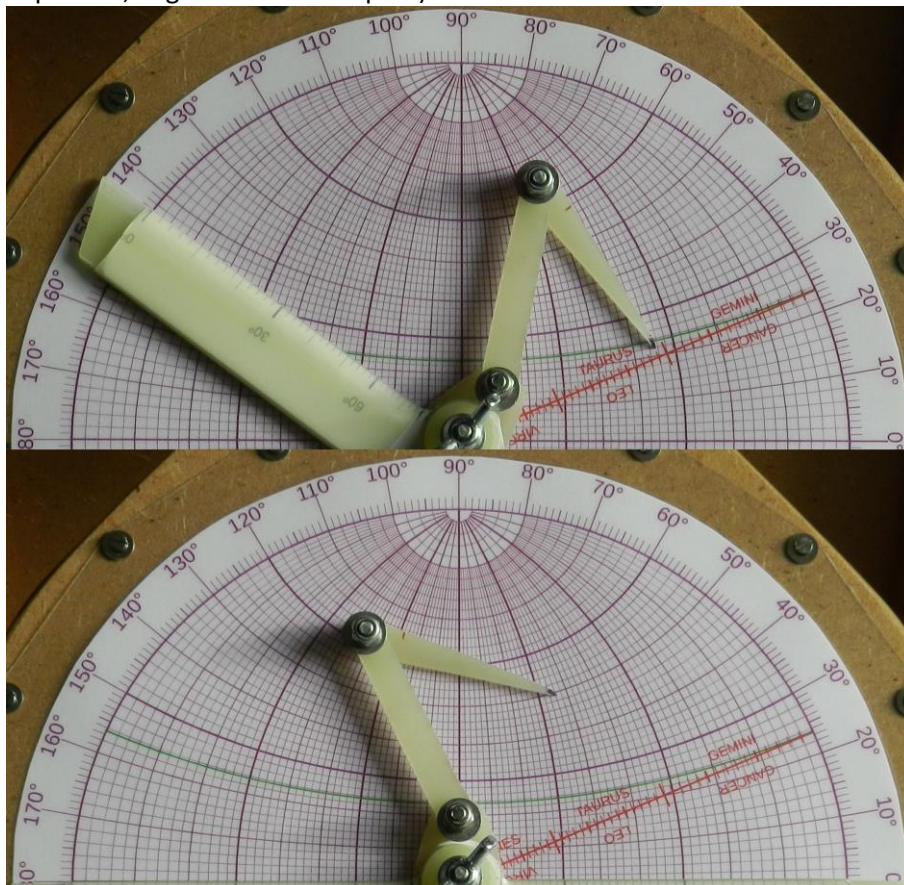
9.2.1.1 Ecliptica naar equatoriaal (en omgekeerd)

Het omzetten van ecliptica-coördinaten naar equatoriale coördinaten is simpel. Als de regula wordt opgelijnd met de evenaar en met de brachiolus de ecliptica-coördinaten worden aangewezen, kunnen de equatoriale coördinaten worden gevonden als de regula naar de ecliptica wordt gedraaid. De punt van de brachiolus wijst dan de equatoriale coördinaten aan. Dit werkt ook andersom.

9.2.1.2 Peiling en afstand naar een andere plaats op de Aarde

Dit werkt op het universeel astrolabium veel beter dan met het sinus-cosinuskwadrant. De uitkomst is – in tegenstelling tot de sin/cos-methode – wel exact (binnen de meetnauwkeurigheid) en we krijgen er gratis ook nog de afstand bij [22]. Dit gaat als volgt:

1. Uitgangspunt is de qibla vanuit Den Helder (52°58'N 4°48'E).
2. Draai de regula rechtsom vanaf de evenaar over de hoekafstand pool-zenit ($90^\circ - 52^\circ 58' \approx 37^\circ$), zie Figuur 24 (boven).
3. Wijs met de punt van de brachiolus de breedte van Mekka (21°25'N) en het lengteverschil ($\approx 35^\circ$, gerekend vanaf rechts) aan op het Wulffse net, zonder de regula te draaien.
4. Draai de regula linksom naar de evenaar, zie Figuur 24 (onder).
5. Lees nu bij de punt van de brachiolus de grootcirkelpeiling (gerekend vanaf de linkerkant van de equator) en -afstand (de parallel, in graden vanaf de pool) naar Mekka af.



Figuur 24: Qibla vanaf Den Helder met het Astrolabium Catholicum.

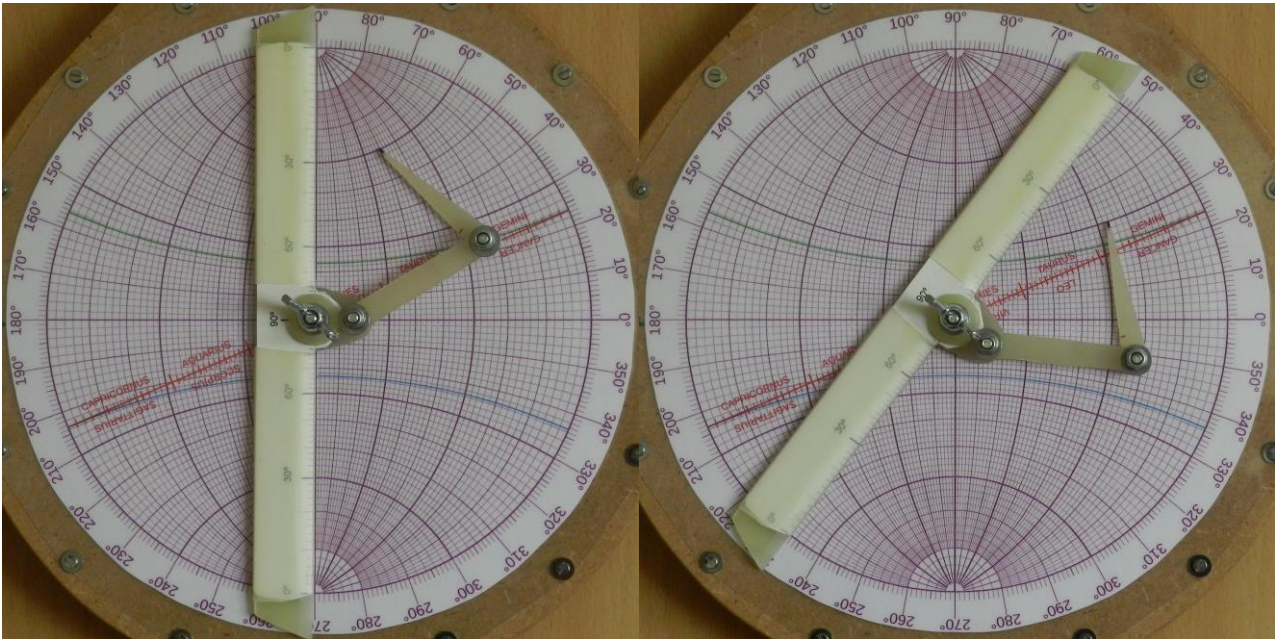
We vinden 126° als peiling en $41^\circ = 41 \cdot (40.000 / 360) \approx 41 \cdot 111 = 4555$ km voor de afstand. Geen calculator nodig, kan gewoon uit het hoofd... (wel die omrekeningsfactor van "111" onthouden). Dit werkt omdat bij het draaien van de regula wordt overgeschakeld van het Aardse coördinatenstelsel (lengte en breedte) naar het plaatsgebonden coördinatenstelsel van de waarnemer (peiling en afstand).

9.2.1.3 Plaatsbepaling.

Ook met het astrolabium catholicum is plaatsbepaling mogelijk¹⁵, met dezelfde kanttekening als bij plaatsbepaling op het planisferisch astrolabium (paragraaf 8.6). Bij het astrolabium catholicum is wel een boekwerk nodig waarin sterposities zijn te vinden, eventueel aangevuld met een ephemeris voor de planeetposities. Een "Nautical Almanac" kan goede diensten bewijzen.

1. Zet de regula verticaal, zie Figuur 25 (links).
2. Wijs met punt van de brachiolus de gemeten hoogte en het azimut van de sterpositie aan.
3. Draai de regula rechtsom (voor sterposities oostelijk van de lokale meridiaan) tot de punt van de brachiolus de declinatieparallel (δ) van de ster aanwijst (Figuur 25 (rechts)).
4. De regula wijst nu de geografische breedte aan. De uurhoek waar de punt van de brachiolus naar wijst kan worden herleid tot geografische lengte, als:
 - a. De gegevens van de ster bekend zijn ($\star \alpha$ en $\star \delta$);
 - b. De tijd van waarneming bekend is (in GMT);
 - c. De tijdvereffening bekend is.

¹⁵ Deze methode is analoog aan die met de Meßkarte, zie hoofdstuk 10.



Figuur 25: Plaatsbepaling met het astrolabium catholicum

In formule:

$$\lambda = \text{GMT} - 12\text{h} - \text{EoT} - \left\{ \begin{array}{l} \odot t_w \\ (360^\circ - \odot t_o) \end{array} \right.$$

of

$$\lambda = \text{GMT} - 12\text{h} + m \cdot \odot \alpha - \star \alpha - \left\{ \begin{array}{l} t_w \\ (360^\circ - t_o) \end{array} \right.$$

De gevonden hoek eerst normaliseren voor het interval $-180^\circ \dots 180^\circ$.

Dan: positieve waarden voor λ betekenen westerlengte, negatieve λ oosterlengte.

In het voorbeeld van Figuur 25 geldt:

- Hoogte: 60°
- Azimut: 130° rechtwijzend
- Declinatie: 30°

We vinden:

- Breedte: 53°
- Uurhoek $t_o = 26^\circ$

Als we verder aannemen:

- $m \cdot \odot \alpha = 14:00$ uur (2°M_L)
- GMT = 01:00
- $\star \alpha = 02:00$ uur ($=30^\circ$)

Dan is de geografische lengte:

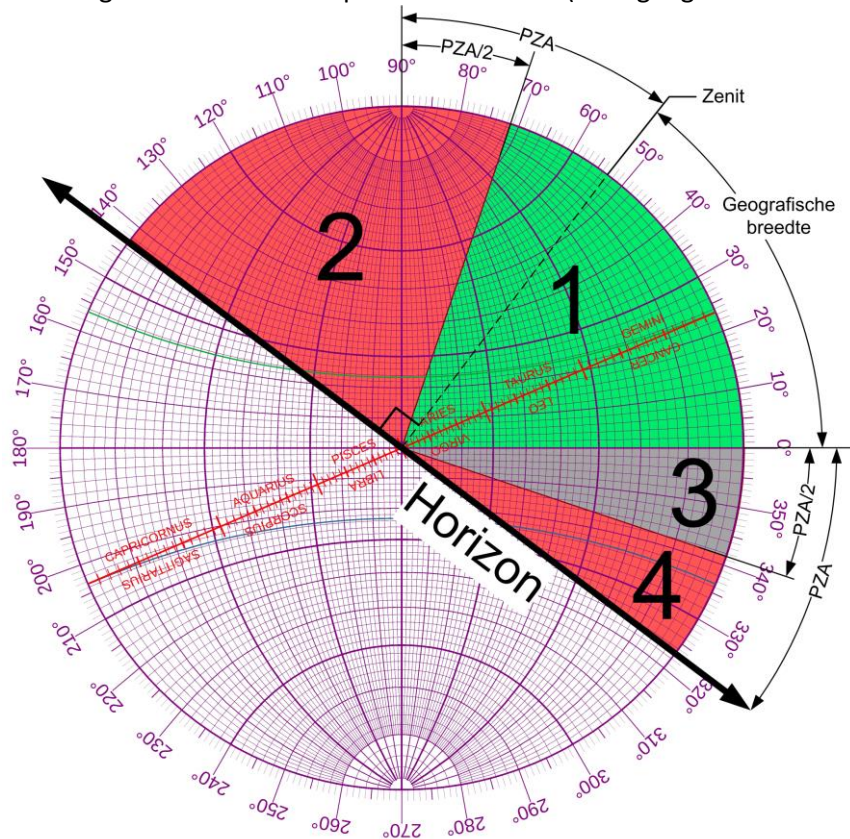
$$\begin{aligned} \lambda &= \text{GMT} - 12\text{h} + m \cdot \odot \alpha - \star \alpha - (360 - t_o) = \\ &= 01:00 - 12:00 + 14:00 - 02:00 - \frac{360 - 26}{15} = -21:16 = -319^\circ = 41^\circ \end{aligned}$$

We vinden QTH = 53°N , 41°W .

9.2.2 Tijdbepaling

Het bepalen van de tijd met het astrolabium catholicum is aanmerkelijk lastiger dan op het planisferisch astrolabium, omdat er geen “rechttoe-rechtaan” procedure is die meteen de uitkomst geeft [4]. Metius [20], Vooght [35] en Morrison ([4] pp. 183-184) geven een “trial and error” methode.

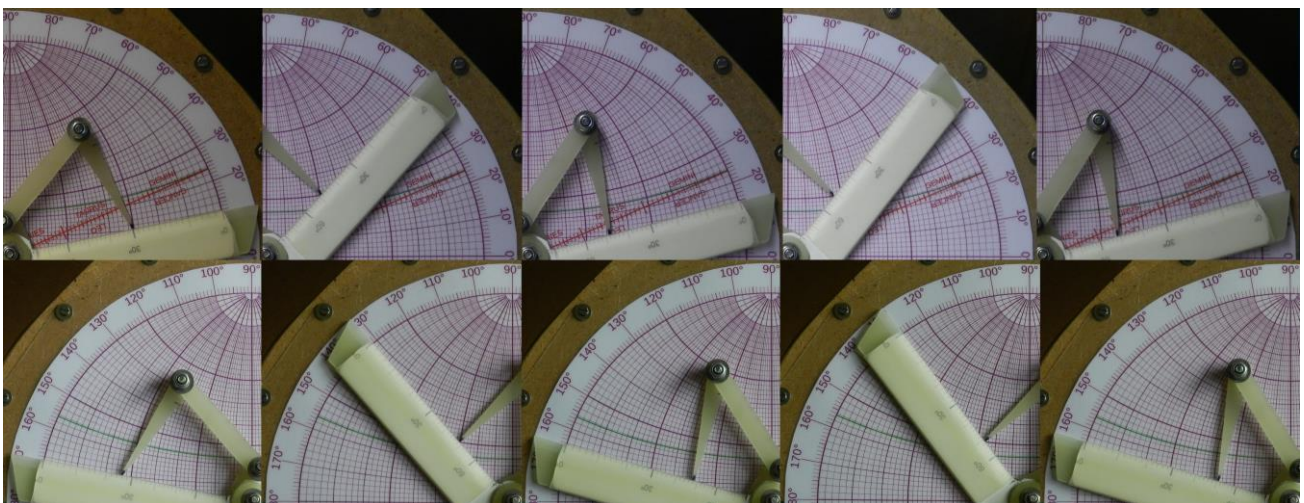
Een deterministisch iteratie-algoritme heb ik nergens kunnen vinden, maar zou als volgt kunnen werken. Begin met vast te stellen of de gemeten hoogte groter of kleiner is dan de absolute waarde van de declinatie van het waargenomen object. Zie Figuur 26. “PZA” is de pool-zenit afstand (90° - geografische breedte).



Figuur 26: Hoogte vs. Declinatie

In Figuur 26 is zone 3 bewust in grijs aangegeven: als het waargenomen object zich daar bevindt hangt het af van de gemeten hoogte of procedure 1 dan wel 2 moet worden gevolgd.

De procedures (zie Figuur 27):



Figuur 27: Astrolabium Catholicum:

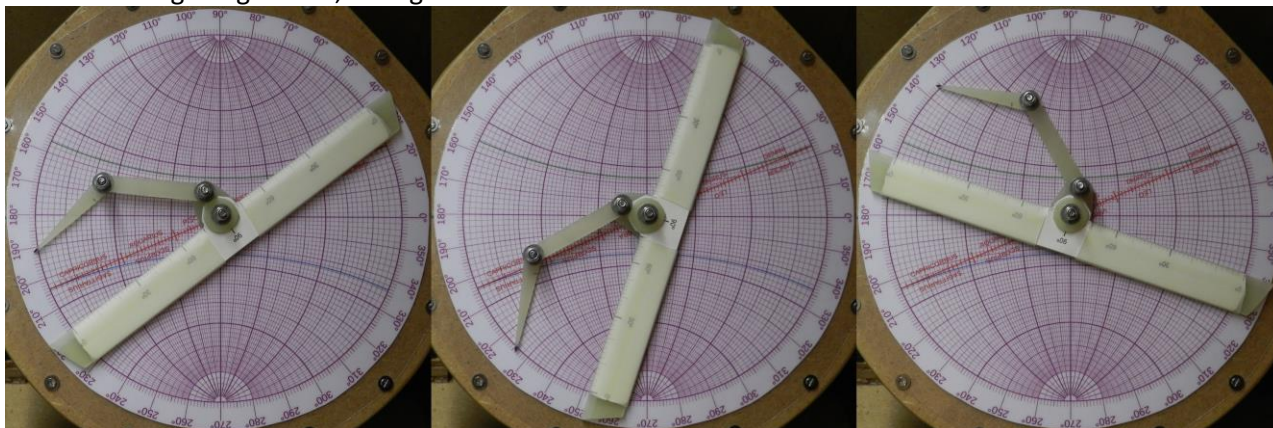
Iteratieve tijdbepaling bij hoogte (30°) > declinatie (10°) (boven) en bij hoogte (10°) < declinatie (30°) (onder).

1. Als hoogte > declinatie. Dit geldt als de zon in het eerste kwadrant staat (zomer, Figuur 26 zone 1) OF als hoogte > |declinatie|, zon in het vierde kwadrant (winter, Figuur 26 zone 3).
 - a. Wijs een schatting van de *tijd* aan met de punt van de brachiolus tegen de regula, op de declinatie-parallel. Zie Figuur 27 (linksboven).
 - b. Draai de regula over de PZA *linksom*.
 - c. Breng de punt van de brachiolus naar de *hoogte*parallel, tegen de regula aan, zonder de regula te draaien.
 - d. Draai de regula *rechtsom*, tot de punt van de brachiolus de *declinatie*parallel aanwijst.
 - e. Herhaal vanaf 1.b totdat in 1.c geen correctie meer nodig is.
 - f. In 1.c wijst de punt van de brachiolus nu het azimut aan.
 - g. In 1.d wijst de punt van de brachiolus nu de uurhoek aan.
2. Als hoogte < declinatie. Dit geldt als de zon in het tweede kwadrant staat (zomer, Figuur 26 zone 2) OF met de zon in het eerste kwadrant tot de halve PZA (zie Figuur 26 zone 2), OF als hoogte < |declinatie|, zon in het vierde kwadrant (winter, Figuur 26 zones 3 en 4).
 - a. Wijs een schatting van het *azimut* aan met de punt van de brachiolus tegen de regula, op de hoogteweerparallel, Figuur 27 (linksonder).
 - b. Draai de regula over de PZA *rechtsom*.
 - c. Breng de punt van de brachiolus naar de *declinatie*parallel, tegen de regula aan, zonder de regula te draaien.
 - d. Draai de regula *linksom*, tot de punt van de brachiolus de *hoogte*parallel aanwijst.
 - e. Herhaal vanaf 2.b totdat in 2.c geen correctie meer nodig is.
 - f. In 2.c wijst de punt van de brachiolus nu de uurhoek aan.
 - g. In 2.d wijst de punt van de brachiolus nu het azimut aan.

Zowel de uurhoek (1 uur = 15°) als het azimut worden gerekend vanaf de linkerkant.

Gebruik een realistische initiële schatting. Zo niet, dan zal de procedure waarschijnlijk niet convergeren naar een oplossing. En: hoe beter de initiële schatting, hoe sneller de procedure convergeert.

Er is een aantal grensgevallen, zie Figuur 28.



Figuur 28: Grensgevallen voor poolhoogte = 53°

Als de declinatie nul is, d.w.z. het object bevindt zich in het evenaarvlak, dan werkt iteratie niet maar er is wel een oplossing. Zet de regula op de PZA vanaf de evenaar (links). Op de gradenverdeling van de regula kan nu bij de gemeten hoogte de uurhoek van het object worden afgelezen. Als de declinatie gelijk is aan de gemeten hoogte dan is er een vergelijkbaar probleem. Draai in dat geval de regula naar de *halve* PZA rechtsom vanaf de pool (midden). Op de mater kan nu, langs de regula, bij de gemeten hoogte de uurhoek worden afgelezen. Iets dergelijks geldt als de declinatie gelijk is aan de negatieve hoogte. Dan liggen de oplossingen op een lijn die de halve PZA rechtsom t.o.v. de evenaar ligt (rechts).

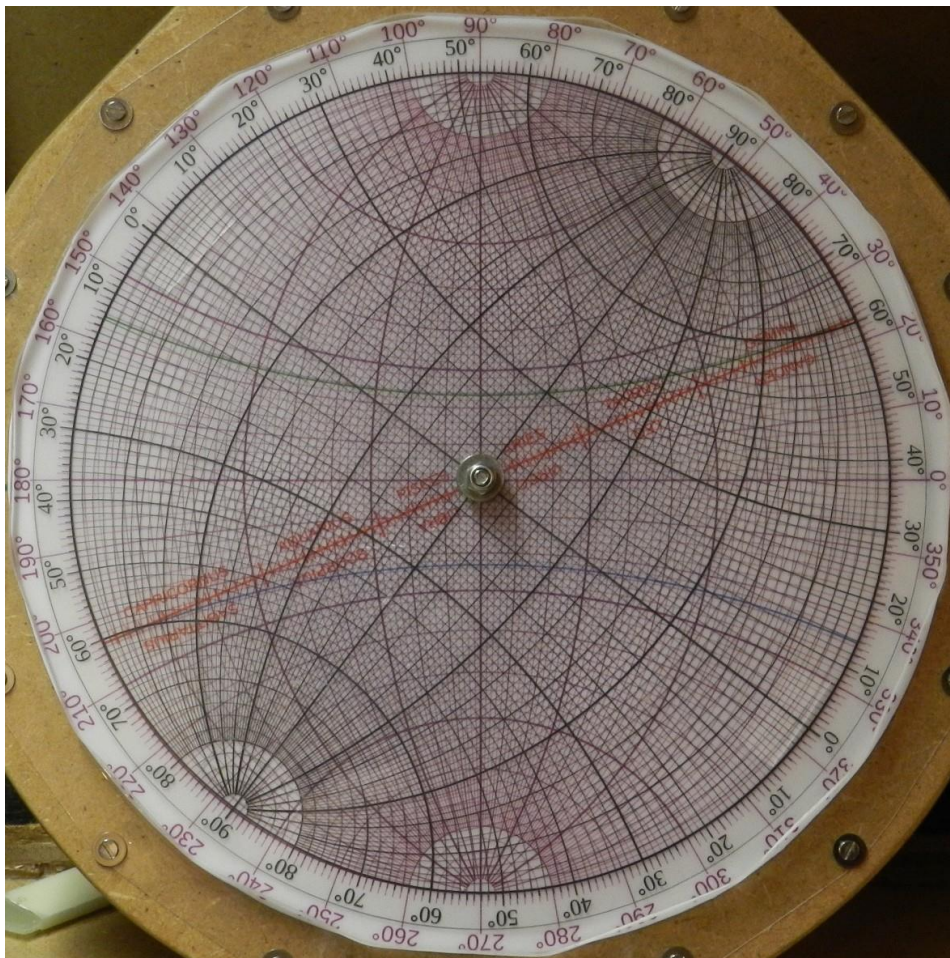
Ook hier geldt weer dat dit werkt omdat steeds wordt overgeschakeld van het equatoriale coördinatenstelsel naar het alt/azimut coördinatenstelsel en vice-versa, net zo lang totdat de waarneming in *beide* stelsels klopt met de uitgelezen waarden.

10 De “Meßkarte zur Auflösung sphärischer Dreiecke”

In hoofdstuk 3 is al even de “Meßkarte zur Auflösung sphärischer Dreiecke” [21] genoemd. Door de wijziging die Kohlschütter aanbracht, het vervangen van regula en brachiolus door een “spin” met een tweede Wulffs net erop afgedrukt (mogelijk gemaakt door de uitvinding van transparante kunststoffen [36]), zijn de twee coördinatenstelsels waarin gewerkt moet worden tegelijkertijd zichtbaar. Door ervoor te zorgen dat de onderlinge oriëntatie tussen de twee stelsels klopt wordt een aantal bewerkingen op het universeel astrolabium een stuk makkelijker gemaakt. Het gaat hier dan vooral om tijdbepaling.

Tijdbepaling op de Meßkarte gaat als volgt (zie ook [4] pp. 185-188): Draai het 90° punt van de spin naar de poolhoogte, zie Figuur 29. Dit punt stelt nu het zenit van de waarnemer voor en het net op de mater is het equatoriale stelsel. Het Wulffse net op de spin is bij deze toepassing in feite het alt-azimut coördinatenstelsel, van opzij gezien¹⁶. Daardoor zijn het plaatsgebonden coördinatenstelsel van de waarnemer en het equatoriale stelsel tegelijkertijd zichtbaar in de juiste oriëntatie ten opzichte van elkaar. Lees vervolgens op het snijpunt van de gemeten hoogte (op de spin) en de declinatie (op de mater) direct de uurhoek van de zon (meridianen tellen op de mater vanaf links) en het azimut af (meridianen tellen op de spin vanaf links). Het bepalen van de tijd wordt zo vereenvoudigd tot het zoeken van het snijpunt van een bekende coördinaat in het ene stelsel en een bekende coördinaat in het andere stelsel.

De coördinaattransformaties die genoemd zijn bij het astrolabium catholicum (ecliptica-equatoriaal en groot-cirkelpeiling/afstand) kunnen ook op de Meßkarte worden uitgevoerd. Daarbij wordt gebruik gemaakt van dezelfde principes.



Figuur 29: Meßkarte met de spin op poolhoogte (53°N)

¹⁶ Op de tympan van het planisferisch astrolabium zien we precies hetzelfde, maar dan in bovenaanzicht.

10.1 Originele beschrijving

De beschrijving van de Meßkarte die hier volgt is een vertaling van de tekst achterop het originele instrument [23]. Redactionele opmerkingen staan tussen [vierkante haken].

N.B.: het rode en het zwarte net zijn in het model (Figuur 29) verwisseld t.o.v. het origineel. Zie paragraaf 11.7.2 over zelfbouw van de Meßkarte. De onderstaande beschrijving gaat over het origineel.

Meetkaart voor het oplossen van bolmeetkundige vraagstukken

Door Dr. E. Kohlschütter

Derde druk

Uitgave: Dietrich Reimer (Andrews & Steiner) te Berlijn.

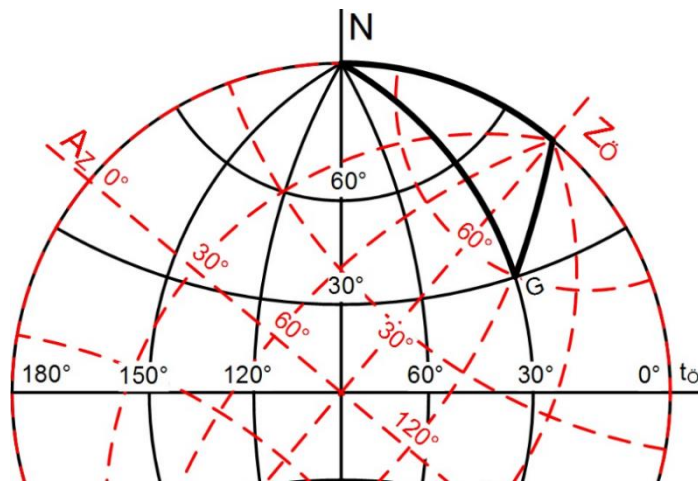
Uitleg.

Deze meetkaart kan in de eerste plaats op zee worden gebruikt voor het bepalen van het azimut en de naam van een onbekend hemellichaam. Verder is hij eenvoudig te gebruiken voor het uitzetten van een grootcirkelkoers en voor alle problemen uit de nautische astronomie en bolmeetkunde, waarbij geen al te hoge nauwkeurigheid (ca. $\frac{1}{4}^\circ$) wordt gevraagd. Bijvoorbeeld: berekening van de tijd en de hoogte van doorgang door de eerste verticaal of de grootste digressie, plaatsbepaling in een luchtvaartuig en dergelijke. De meetkaart maakt azimuttabellen, andere speciale tabellen en kleine hemelglobes (starfinder) onnodig.

De meetkaart bestaat uit twee dezelfde concentrische [Wulffse] stereonetten die om hun gemeenschappelijk middelpunt en opzichte van elkaar kunnen worden gedraaid.

Het onderste zwarte net stelt het coördinatensysteem van equator, uurcirkels en declinatieparallelten voor. Het bovenste rode net is een voorstelling van het stelsel van horizon, hoogtelijnen en verticaalcirkels. Als het rode net zo wordt gedraaid dat de hoek tussen het zenit (Z) en de zwarte equator gelijk is aan de geografische breedte (φ), dan liggen de beide netten op precies dezelfde manier als aan het hemelgewelf over elkaar. Het is alsof men naar het oostelijk of westelijk halfrond aan de hemel kijkt. De buitenste cirkel is de lokale meridiaan. Het middelpunt is het oostpunt als het zenit aan de rechterkant (de lokale meridiaan voor oostelijke uurhoeken) ligt en het westpunt als het zenit aan de linkerkant (de lokale meridiaan voor westelijke uurhoeken) ligt. Opdat de getalswaarden voor het azimut juist zijn, gebruikt men voor het oostelijk halfrond het zenit voor oostelijke uurhoeken (Z_δ), voor het westelijk halfrond het zenit voor westelijke uurhoeken (Z_w). Ten gevolge van de juiste onderlinge oriëntatie van de beide netten kan men voor elke positie van een hemellichaam (die door twee willekeurige coördinaten bepaald is), de andere coördinaten direct aflezen.

In de onderstaande figuur stellen de streeplijnen het rode net voor. De getrokken lijnen horen bij het zwarte net.



De instelling van het rode net is zodanig, dat het zenit (Z_δ) op de geografische breedte van de plaats van de waarnemer is ingesteld, in dit voorbeeld op 50° . Als een hemellichaam zich nu op een uurhoek van 30° oost en op een declinatie van $30^\circ N$ bevindt (G in de figuur), dan ziet men de bijbehorende parallactische driehoek direct voor zich (vetgedrukte getrokken cirkelbogen) en kan de hoogte van het hemellichaam worden afgelezen als 60° bij een azimut van 120° . Zou men omgekeerd een onbekende ster op 60° hoogte bij een rechtwijzende peiling van 120° waargenomen hebben, dan kan men op de volgens de figuur ingestelde meetkaart de declinatie van de ster als $\delta=30^\circ$ en de uurhoek als $t_\delta = 30^\circ$ aflezen.

De hoek bij het hemellichaam [$\angle NGZ_\delta$] kan men bij deze instelling van het rode net niet vinden. Daarvoor moet men aannemen dat het hemellichaam in Z staat en dat het zenit zich in G bevindt. Z wordt nu op de declinatie van het hemellichaam ingesteld en het zenit op het snijpunt van de breedteparallel [50° in het zwarte net] en de uurcirkel aangenomen. De hoek bij het hemellichaam kan dan op de azimutschaal worden afgelezen. De rode hoogtelijn stelt in dit geval de hoogteparallel voor. Men kan de breedte en het lengteverschil van willekeurige punten op die hoogtelijn in het zwarte net aflezen.

10.2 Gebruiksaanwijzing voor zeevarenden.

I. Tijd-azimut.

1. Bereken de uurhoek t van het hemellichaam als volgt:
$$\odot t = \text{GMT} - 12\text{h} - \text{EoT} \mp \lambda$$
$$\star t = \text{GMT} - 12\text{h} + m \cdot \odot \alpha \mp \lambda - \star \alpha,$$
waar bij λ het minteken voor westerlengte en het plusteken voor oosterlengte geldt. Als de uurhoek t ¹⁷ negatief wordt, dan is de uurhoek oostelijk.
2. Draai het rode net zodanig, dat Z op de geografische breedte in het zwarte net staat (bij oostelijke uurhoeken Z_{\odot} op de rechterhelft van de buitenste cirkel instellen, bij westelijke uurhoeken Z_{\odot} op de linkerhelft).
3. Zoek de plaats van het hemellichaam in het zwarte net als snijpunt van zijn uurcirkel en declinatieparallel en markeer dat punt door het opzetten van een stift (potlood of iets dergelijks).
4. Volg in het rode net de door dit punt lopende verticaalcirkel tot de horizon en lees daar het azimut af (van 0° tot 360° van noord via oost, zuid enz. geteld). Door het volgen van de hoogtelijn tot de rand kan men ook de hoogte aflezen.

II. Hoogte-azimut.

1. Draai het rode net zoals in I, 2.
2. Zoek het snijpunt van de declinatieparallel van het hemellichaam in het zwarte net en de waargenomen hoogte in het rode net en markeer dit punt door het opzetten van een stift.
3. Lees het azimut van de rode verticaalcirkel af zoals in I, 4. [Geeft desgewenst ook de uurhoek in het zwarte net.]

III. Naam [positie] van een onbekende ster.

1. Draai het rode net zoals in I, 2.
2. Zoek de positie van het hemellichaam in het rode net als snijpunt van de verticaalcirkel die overeenkomt met de rechtwijzende peiling van het hemellichaam en de hoogtelijn van het hemellichaam en markeer dit punt door het opzetten van een stift.
3. Volg de door dit punt gaande zwarte declinatieparallel tot de rand en lees de declinatie ($\star \delta$) af.
4. Volg de door dit punt gaande zwarte uurcirkel tot de equator en lees de uurhoek (t_{\odot} of t_w) af.
5. Bereken de rechte klimming van het hemellichaam uit:
$$\star \alpha = \text{GMT} - 12\text{h} + m \cdot \odot \alpha \mp \lambda \begin{cases} -t_w \\ +t_{\odot} \end{cases},$$
waar bij λ het minteken voor westerlengte en het plusteken voor oosterlengte geldt.

IV. Uitzetten van een grootcirkeltraject.

1. Stel Z in op de geografische breedte van de plaats van afvaart: aan de linkerkant als de plaats van bestemming oostelijk van het vertrekpunt ligt, aan de rechterkant als de plaats van bestemming westelijk van het vertrekpunt ligt.
 2. Zoek in het zwarte net de plaats van bestemming als snijpunt van zijn geografische breedteparallel en de met het lengteverschil overeenkomende uurcirkel. Markeer dit punt door het opzetten van een stift.
 3. De door dit punt gaande rode verticaalcirkel is de grootcirkel. Het azimut ervan geeft de koers van afvaart aan.
 4. Lees in het zwarte net de breedte en het lengteverschil van een willekeurig aantal punten van de grootcirkel af.
 5. De afstand van de door de plaats van bestemming gaande rode hoogtelijn vanaf Z ($= 90^\circ \mp h$) is de in graden uitgedrukte kortste verbinding (1 graad = 60 zeemijl [≈ 111 km]).
- Na deze voorbeelden spreekt de toepassing van de meetkaart voor het oplossen van andere problemen in de astronomische navigatie en de bolmeetkunde zonder meer voor zich.

¹⁷ De gevonden hoekwaarde eerst normaliseren voor het interval -180° ... 180°.

10.3 Plaatsbepaling in de luchtvaart.

Voor de luchtvaart¹⁸ maakt de meetkaart een zeer snelle en in de meeste gevallen voldoende nauwkeurige plaatsbepaling mogelijk zonder de hulp van tabellen, als de hoogte van de zon of een ander hemellichaam gemeten is en het azimut ervan door peilen met een peilkompass of een boussole is vastgesteld.

Als het azimut niet waargenomen is, dan geeft de meetkaart de met de gemeten hoogte van het hemellichaam overeenkomende positielijn aan.

V. Plaatsbepaling als azimut [en hoogte] gemeten is [zijn].

1. Corrigeer de kompaspeiling voor alle miswijzingen om zo het rechtwijzende azimut te verkrijgen.
2. Zoek de positie van het hemellichaam in het rode net als het snijpunt van de met het azimut overeenkomende verticaalcirkel en de met de gemeten hoogte overeenkomende hoogtelijn. Markeer dit punt door het opzetten van een stift (potlood of iets dergelijks).
3. Draai de bovenste schijf net zo lang tot de door de stift gemarkeerde positie op de met de declinatie van het hemellichaam overeenkomende declinatieparallel valt (draai naar rechts als het hemellichaam oostelijk van de meridiaan stond, naar links als het hemellichaam westelijk van de meridiaan stond).
4. Lees de stand van Z op de zwarte rand af. De aflezing is de gezochte geografische breedte (φ).
5. Volg de door de positie van het hemellichaam gaande uurcirkel tot de equator en lees de uurhoek (t_{\odot} of t_w) af.
6. Bereken de gevraagde geografische lengte (λ) uit:

$$\lambda = \text{GMT} - 12\text{h} - \text{EoT} - \begin{cases} \odot t_w \\ (360^\circ - \odot t_{\odot}) \end{cases}$$

of

$$\lambda = \text{GMT} - 12\text{h} + \text{m.} \odot \alpha - \star \alpha - \begin{cases} \star t_w \\ (360^\circ - \star t_{\odot}) \end{cases}$$

Positieve waarden voor λ ¹⁷ betekenen westerlengte, negatieve λ oosterlengte.

VI. Vaststellen van een positielijn¹⁹.

1. Stel Z in op de declinatie van het hemellichaam. Op de linker halve boog van de meridiaan als het hemellichaam oostelijk stond, op de linker als het hemellichaam westelijk stond.
2. De rode hoogtelijn overeenkomend met de gemeten hoogte is dan de positielijn van het luchtvaartuig.
3. Lees voor een willekeurig aantal punten van die positielijn in het zwarte net de geografische breedte (φ) en uurhoek (t_{\odot} of t_w) af.
4. Bereken de geografische lengte (λ) van deze punten uit de vergelijkingen onder V, 6.
5. Breng de op die manier berekende punten naar lengte en breedte over op een landkaart en verbind ze met een vloeiende lijn. Op deze lijn bevond het luchtvaartuig zich ten tijde van de waarneming.

De noodzakelijke gegevens zoals declinatie van de zon en de tijdvereffening op de desbetreffende dag, of voor nachtvluchten: middelbare rechte klimming van de zon en declinatie en rechte klimming van een aantal sterren kan men voor vertrek uit een nautische almanak overschrijven, zodat meenemen niet nodig is.

¹⁸ Anno 1905!

¹⁹ Door op deze manier positielijnen vast te stellen van meer dan een hemellichaam, kan een astronomisch bestek worden geconstrueerd. Zoals bij het planisferisch astrolabium moet men zich van de nauwkeurigheid niet al te veel voorstellen (zie paragraaf 8.6). Kohlschütter geeft dat ook al aan in zijn uitleg.

10.4 Glossarium, behorende bij de beschrijving van de Meßkarte.

0t	Uurhoek van de zon
★t	Uurhoek van het hemellichaam
★α	Rechte klimming van het hemellichaam
α	Rechte klimming
Boussole	Boussole (van ital. Bussola „bus“) is een speciale uitvoering van magneetnaald-instrumenten (kompassen). Ze hebben onder een vrij opgehangen magneetnaald in een capsule een horizontaal gelagerd cirkelvormig in 360 booggraden en in windrichtingen verdeelde wijzerplaat (windroos).
δ	Declinatie
EoT	Tijdvereffening (Equation of Time). De tijdvereffening (EoT) is het tijdsverschil tussen de ware zonnetijd (WZT) en de middelbare zonnetijd (MZT): $EoT = WZT - MZT$.
φ	Geografische breedte
GMT	Middelbare tijd te Greenwich
Grootste digressie	Digressie (sterrenkunde), bij sterren, die ten N. van het zenit culmineren (waarvan de declinatie derhalve groter is dan de breedte der plaats van waarneming), het supplement [aanvulling tot 180°] van het azimut. De d. is altijd kleiner dan 90°. Eigenlijk alleen gebruikelijk in de term „grootste d.“ (Oosthoek, 1916.)
Hoogteparallel	Cirkel van gelijke waarneemhoogte (van een hemellichaam)
λ	Geografische lengte
m.0α	Middelbare rechte klimming van de zon
Peilkompas	Kompas, uitgerust met een peiltoestel. In tegenstelling tot de boussole is bij een peilkompas de magneetnaald geïntegreerd met de – vrij opgehangen – windroos. Dit vergemakkelijkt het aflezen van de peiling.
t _ö	Oostelijke uurhoek
t _w	Westelijke uurhoek
Uurcirkel ²⁰	Halve grootcirkel tussen de beide polen (= declinatiecirkel)
Verticaalcirkel	Grootcirkel door het zenit en het nadir

²⁰ Gekozen voor deze term omdat die het dichtst bij de originele Duitse tekst ligt.

11 Zelfbouw

Veel bouwbeschrijvingen op het Internet suggereren dat het voldoende is om alle onderdelen te printen op dik papier, uitknippen, splitpen door het middelpunt en klaar is Kees. Dit levert echter een onhandelbaar instrument op omdat alles alle kanten op zwabbert, met frustratie als gevolg. Een astrolabium verdient beter. Bij het bouwen van mijn eigen astrolabia ben ik door een aantal prototypefasen heen gegaan. De huidige versie zou “Mk. IV” kunnen worden genoemd. Zo kwam ik er achter dat triplex als basismateriaal ongeschikt is vanwege splinteren. Verder is het geen goed idee om lijm te gebruiken. Want: is het niet goed, dan kan de boel de klike in. Gebruik dus montage technieken die je ook weer uit elkaar kunt nemen.

Belangrijk: niet alle bouwbeschrijvingen op het Internet bevatten correct geconstrueerde schaalverdelingen, met als gevolg foute resultaten. Het vervelende is dat de fouten niet onmiddellijk opvallen. Mijn schaalverdelingen zijn een samenraapsel van gemodificeerde figuren uit de bouwbeschrijving van in-the-sky.org (hiervan de spin niet gebruiken – de projectie van de ecliptica klopt niet), The Astrolabe Generator en eigen toevoegingen.

Allemaal voortschrijdend inzicht ... Om te voorkomen dat u dezelfde valkuilen van binnen gaat bekijken als ik, volgen hier een stappenplan en nog een aantal tips.

11.1 Benodigdheden

Voor het bouwen van een astrolabium zijn een aantal zaken nodig. Belangrijk daarbij is “geduld”. Een aantal zaken vereist precisie en dat verhoudt zich slecht tot haast. En: lees eerst het *hele* verhaal.

Deze beschrijving gaat over mijn eigen versie. Neem dus de vrijheid om te improviseren!

Mijn boodschappenlijst:

- Astrolabe Generator (software) van The Astrolabe Project [31] (vereist de Java runtime engine (JRE));
- MDF-plaat, 6 mm;
- Parketlak;
- Overhead folie voor de spin (o.a. bij Conrad);
- 2 mm acrylglas;
- Glasvezel-epoxy plaat, 2 mm (Conrad);
- M3 x 25 schroef en borgmoer;
- Glij-, veer- en sluitringen M3;
- M2 schroefjes, sluitringen, veerringen en moertjes;
- Transparant krimpous van 10 mm en 15 mm (Conrad);
- Transparant dubbelzijdig plakband.

Voor de meeste bewerkingen heb ik gewoon klusgereedschap gebruikt. Een kolomboormachine maakt een aantal bewerkingen makkelijker. Een laserprinter geeft de mooiste afdrukken.

11.2 Mater, tympaan en achterkant

De opdruk maken we met de Astrolabe Generator. De Astrolabe Generator is geschreven in Java en vereist de JRE om te functioneren. Geen zorgen, alles draait lokaal en u gaat niet met Java het Internet op. Stel de juiste geografische breedte in en kies welke zaken moeten worden weergegeven. Print het resultaat vervolgens scherm voor scherm (“Print Current View”), omdat de spin (“Rete”) op overhead folie moet worden afgedrukt. Oppassen met de spin: dit scherm geeft twee afdrukken, eerst de “Rules” en dan de “Rete”. Leg hiervoor dus een velletje papier op de overhead folie in de papierbak.

Noot: in het schermvoorbeeld van de voorkant komt de ingestelde waarde voor de geografische breedte niet tevoorschijn! Wel in de afdruk.

Knip de figuren strak langs de buitenrand uit. Het verdient aanbeveling om de uitgeknipte papieren figuren vervolgens te (laten) plastificeren, voor de duurzaamheid. Gebruik hoesjes van 2x125 micron, dat geeft stevigheid. Knip de plastic randen af tot ca. 1 centimeter vanaf de buitenrand van de schaalverdelingen. Boor 3.2 mm gaten door de middelpuntmarkeringen.

11.3 De basisplaat

Nu de schaalverdelingen klaar zijn is ook de diameter van de basisplaat bekend: iets meer dan de buitenrand van de schaalverdelingen, plus de 2 centimeter van de plastic rand. De plaat wordt gemaakt van MDF. Zaag de plaat uit met een decoupeerzaag en laat er een hoek materiaal aan zitten om later een ophangring (harpsluiting of karabijnhaak) te bevestigen.

Trek op zowel de voorkant als de achterkant twee hulplijnen: tussen de middelpunten van de twee gaten en de andere loodrecht daarop, door het middelpunt van het centrale gat. Dit is een secuur werkje: de nauwkeurigheid van het astrolabium hangt ervan af.

Zet er drie lagen parketlak op. De lak goed laten drogen en tussen de lagen schuren.

Boor het gat voor de ophanging (6 mm) en het centrale gat (3 mm).

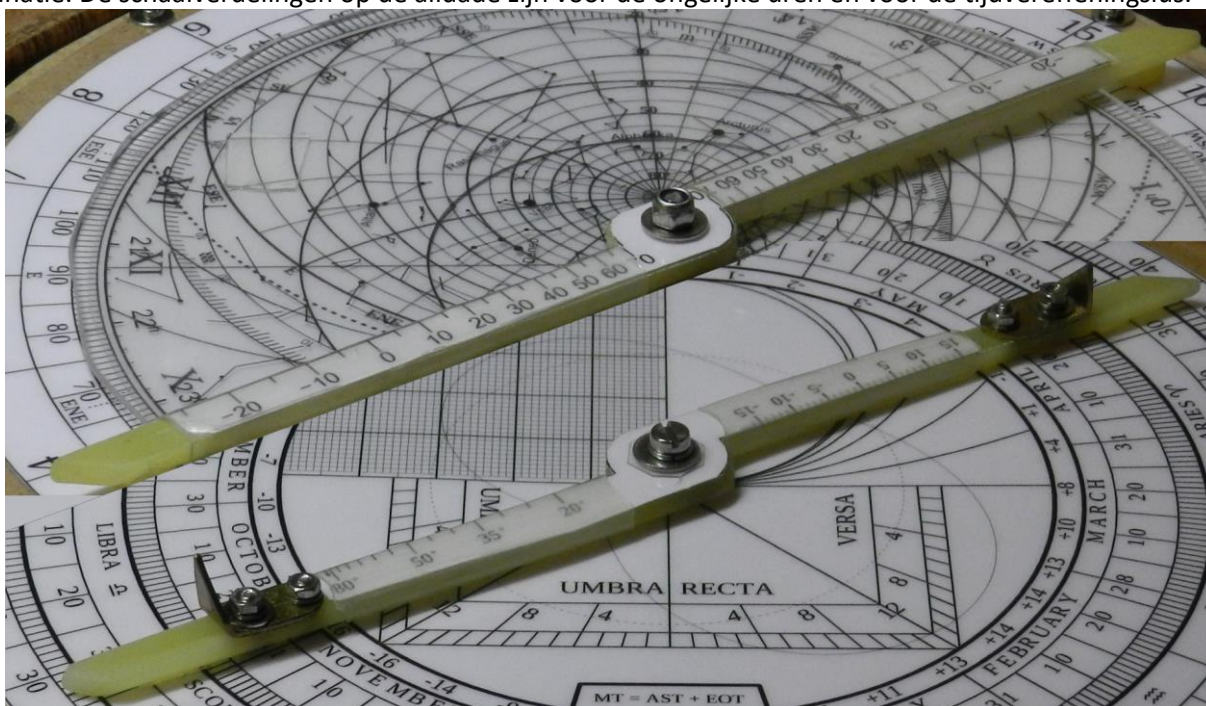
11.4 De spin

Zaag of snij een schijf van acrylglas met iets grotere diameter dan de overhead-folie. Plak vervolgens de folie met de bedrukte kant tegen het acrylglas met kleine stukjes transparant dubbelzijdig plakband. Dit is een secuur werkje, de folie moet precies midden op het acrylglas komen.

Boor een 3 mm gat door de middelpuntmarkering.

11.5 Regula en alidade

De regula en de alidade komen ook uit de Astrolabe Generator, maar het is ook mogelijk om ze naar eigen inzicht zelf te tekenen in bijvoorbeeld LibreOffice Draw. De schaalverdeling op de regula is in graden, voor de declinatie. De schaalverdelingen op de alidade zijn voor de ongelijke uren en voor de tijdvereffeningslus.



Figuur 30: Regula (boven) en alidade (onder).

Zaag het basismateriaal voor de regula en de alidade uit epoxyplaat. Dit kan goed met een metaalzaag. Neem de maten iets aan de ruime kant: na het zagen worden de randen waarlangs de waarden worden afgelezen precies in model gevijld of geschuurd. Deze randen liggen in elkaars verlengde en vallen samen met de middelpuntmarkering. Het is verstandig om deze randen schuin af te vijlen. Daardoor wordt de parallax bij het aflezen kleiner.

Onder de uiteinden van de regula kunnen eventueel steuntjes worden bevestigd (buiten de radius van de spin) die iets dikker zijn dan de spin met drager, zodat de regula niet wiebelt.

Bevestig de schaalverdelingen op het epoxy met transparant krimpkouws.

Het vizier bestaat uit in model gebogen en gevijlde stripjes messing, met schroefjes (M2, met verzonken kop) en moertjes bevestigd op de alidade.

Boor een 3 mm gat door de middelpuntmarkeringen.

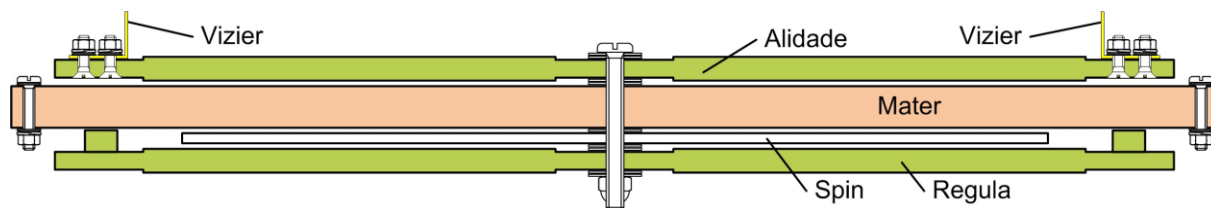
11.6 Eindmontage

Bevestig de schaalverdelingen op de basisplaat met M2 schroefjes en moertjes. Besteed daarbij veel aandacht aan twee aspecten:

- De voorkant en de achterkant moeten precies concentrisch worden bevestigd. Gebruik daarvoor de hulplijnen.
- De noord-zuidlijn op de achterkant moet verticaal komen als er hoogtemetingen worden gedaan met de alidade. Dit moet binnen een graad kloppen. Gebruik ook daarvoor de hulplijnen.

Het resultaat hiervan is de mater.

Monteer het hele pakket, zie Figuur 31.



Figuur 31: Opbouw

Volgorde:

1. Schroef;
2. Sluistring;
3. Glijring;
4. Alidade;
5. Glijring;
6. Sluistring;
7. Mater, met de achterkant tegen de alidade;
8. Glijring;
9. Spin, met de folie tegen de mater;
10. Glijring;
11. Sluistring;
12. Regula;
13. Glijring;
14. Sluistring;
15. Borgmoer. Niet te vast aandraaien: de regula, spin en alidade moeten met weinig frictie kunnen draaien. Leg er eventueel een veerring onder, dan is de hoeveelheid frictie makkelijker te doseren.

Bekijk vooral goed de voorbeelden in dit document.

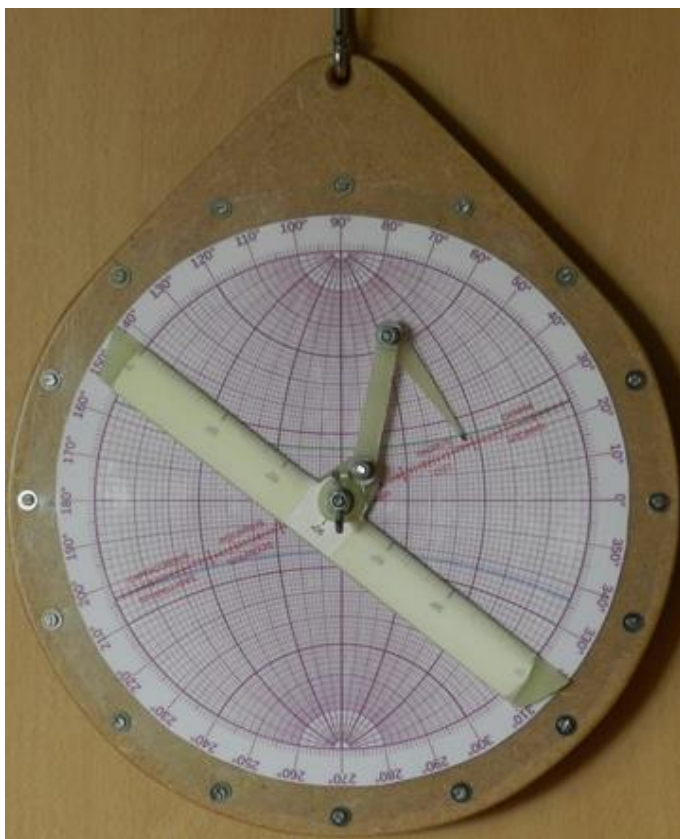
Wellicht vraagt u zich nog af: "Waar is de tympan?" Die is geïntegreerd met de limbus. Er is hier niet van uit gegaan dat u met het astrolabium verre reizen gaat ondernemen.

11.7 Het universeel astrolabium

Bij een universeel astrolabium wordt alles op de voorkant vervangen door een Wulffs net en een regula met brachiolus. De boodschappenlijst wordt nu uitgebreid met een bestand met het Wulffse net (bijvoorbeeld van xrayhandbook.narod.ru/wulffnet.jpg). Tot op de dag van vandaag is er belangstelling voor de constructie van het universeel astrolabium, zie o.a. [37].

11.7.1 Het Astrolabium Catholicum (volgens Gemma Frisius)

Download het Wulffse net. De ecliptica²¹, de gradenverdeling en de keerkringen moeten er nog op worden ingetekend. Dit kan met bijvoorbeeld LibreOffice Draw. Behandel en monteer het vervolgens net zoals de voorkant van het planisferisch astrolabium.



Figuur 32: Astrolabium Catholicum (zelfbouw)

Voor de regula geldt: zelf tekenen, bijvoorbeeld in LibreOffice Draw. De gradenverdeling komt overeen met die van de snijpunten van de meridianen met de evenaar. Denk bij het epoxy basismateriaal voor de regula aan het bevestigingsgat voor de brachiolus. Het epoxy wordt zodanig in model gevijld dat de “afleesrand” precies samenvalt met het middelpunt van het bevestigingsgat. Ook hier geldt weer: schuin vijlen, ter bestrijding van parallax.

De brachiolus wordt ook uit epoxyplaat gezaagd. De brachiolus in het voorbeeld bestaat uit twee segmenten. Drie is ook mogelijk, maar dat kan problemen geven bij het plat op de mater krijgen van de punt. De lengte van de segmenten wordt zodanig gekozen dat elk punt van het Wulffse net kan worden bereikt. Dat betekent dat de punt iets korter moet zijn dan het andere segment. Bevestig de segmenten aan elkaar en aan de regula met verzonken M3 schroeven en borgmoeren. Leg er veerringetjes onder en draai de borgmoeren losjes aan, dat geeft een gelijkmatige aandrukkraft.

11.7.2 De Meßkarte (volgens Kohlschütter)

Om van het Astrolabium Catholicum een Meßkarte te maken gaat u als volgt te werk: De regula met brachiolus wordt vervangen door een “spin” met daarop een Wulffs net (ditmaal zonder ecliptica). Deze “spin” wordt op dezelfde manier gemaakt als de spin van het planisferisch astrolabium. Zie paragraaf 11.4.

Veel overhead folies zijn alleen geschikt voor zwarte toner. Druk de mater dus af in een andere kleur, zodat beide stelsels in doorzicht uit elkaar zijn te houden.

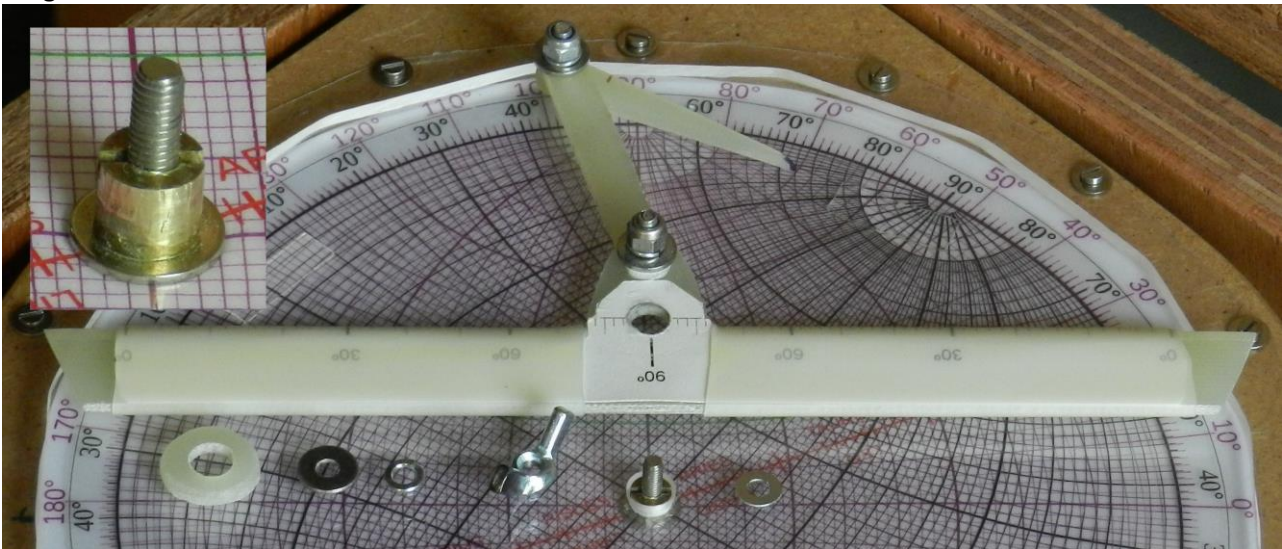
²¹ Pas op: er is op het Internet een afbeelding in omloop uit ShadowsPro. Hiervan kloppen de benamingen bij de ecliptica niet!

11.8 Verbeteringen

De schroef door het midden die alles bij elkaar houdt, is geen optimale oplossing. Als de schroef meedraait, geeft dit slijtage van het MDF. Daardoor wordt het centrale gat steeds groter en het astrolabium steeds onnauwkeuriger. Ik zie hier twee oplossingen voor:

- Gebruik harder basismateriaal voor de mater, bijvoorbeeld HPL of glasvezel-epoxy.
- Laat de alidade, de spin en de regula draaien om lagerbusjes (te maken van afstandsbusjes met 3mm gat of M3 inwendig schroefdraad, zie ook de inzet in Figuur 33). De schroef kan dan strak aangedraaid worden en draait niet meer mee. Wilt u het heel mooi maken: in modelbouw-winkels zijn miniatuur kogellagers verkrijgbaar.

Voor het astrolabium catholicum is er nog een modificatie die wellicht interessant is als u het instrument met een paar handelingen wilt kunnen ombouwen tot Meßkarte. Gebruik in dat geval een lagerbusje met inwendig M3 schroefdraad aan de kant van het Wulffse net. De alidade en alles wat daarbij hoort zit dan permanent vast, maar de regula of de spin kan met een ringetje en een vleugelmoer worden vastgezet. Als de spin dezelfde dikte heeft als de regula, zijn ze onderling te verwisselen door alleen de vleugelmoer los te draaien. Zie Figuur 33.



Figuur 33: Regula en spin met vleugelmoer. Inzet: M3 lagerbusje

Een laatste tip: er zijn bedrijven die acrylglas kunnen laser-graveren. Wellicht is dit een mooiere oplossing voor de spin.

12 Terminologie

Alidade, Alhidade	Beweegbare vizierliniaal (voor hoogtemetingen)
Almucantar	Hoogtelijn, hoogteparallel, azimutcirkel
Altitude	Hoogte (boven de horizon) (= elevatie)
Azimut	Hoek t.o.v. het noorden (rechtwijzend)
Azimutaal	Azimutboog op de tympaan
Colure, Coluur	Jaargetijsnede
Declinatie	Hemelcoördinaat (vgl. breedte)
Dierenriem	Reeks sterrenbeelden langs de ecliptica
Ecliptica	Baanvlak van de Aarde
Ephemeris	Tabellenboek met de posities van Zon, Maan en planeten, zie www.astro.com .
Equatoriaal (stelsel)	Assenstelsel van equatorvlak en aardas, zie rechte klimming en declinatie
Equinox	Dag-nacht evening
GHA	Greenwich Hour Angle
Limbus	Rand met schaalverdeling op de mater
LHA	Lokale uurhoek
Mater	Basisplaat (Lat.: "moeder")
Nadir	Punt diametraal tegenover het zenit (= voetpunt)
Noordpunt	Snijpunt van de horizon met de lokale meridiaan dat het dichtst bij de Noordpool ligt
Ostensor	Indexwijzer (regula)
Precessie	Tolbeweging van de aardas, periode ≈ 26.000 jaar
Prime Vertical (eerste verticaal)	Grootcirkel door het zenit van de waarnemer, loodrecht op het plaatselijke meridiaanvlak.
PZA	Pool-Zenit Afstand
QTH	Geografische positie
Rechte klimming (RA)	Hemelcoördinaat (vgl. geografische lengte). Wordt gerekend in <i>uren</i> (i.p.v. graden) vanaf het lentepunt. Richtingszin: oost = positief.
Regula	Indexwijzer
SHA	Siderische uurhoek (SHA = - RA, uitgedrukt in graden i.p.v. uren)
Solstitium	Zonnewende
Sterrentijd	Equatoriale hoekafstand van het lentepunt tot de lokale meridiaan
Tympaan	Stereografische projectie van het altitude-azimut stelsel van de waarnemer
Uurhoek	Equatoriale hoekafstand van een hemelobject tot de lokale meridiaan
Zenit	Punt aan de hemel recht boven de waarnemer (= toppunt)
Zodiac	Zie: Dierenriem

13 Tekens van de dierenriem

Nederlandse naam	Latijnse naam	Genitief	Symbool	Betekenis 0° van dit teken
Ram	Aries	Arietis	♈	$\lambda = 0^\circ$, Lentepunt
Stier	Taurus	Tauri	♉	$\lambda = 30^\circ$
Tweelingen	Gemini	Geminorum	♊	$\lambda = 60^\circ$
Kreeft	Cancer	Cancri	♋	$\lambda = 90^\circ$, Zonnewende (zomer)
Leeuw	Leo	Leonis	♌	$\lambda = 120^\circ$
Maagd	Virgo	Virginis	♍	$\lambda = 150^\circ$
Weegschaal	Libra	Librae	♎	$\lambda = 180^\circ$, Herfstpunt
Schorpioen	Scorpius (Scorpio)	Scorpii	♏	$\lambda = 210^\circ$
Boogschutter	Sagittarius	Sagittarii	♐	$\lambda = 240^\circ$
Steenbok	Capricornus	Capricorni	♑	$\lambda = 270^\circ$, Zonnewende (winter)
Waterman	Aquarius	Aquarii	♒	$\lambda = 300^\circ$
Vissen	Pisces	Piscium	♓	$\lambda = 330^\circ$

N.B. deze tekens komen door de precessie van de equinoxen niet (meer) overeen met de gelijknamige sterrenbeelden. Ze dienen nog slechts als hemelcoördinaat (ecliptische lengte, symbool λ^{22}).

²² Pas op hiermee: voor de geografische lengte wordt hetzelfde symbool gebruikt!

14 Bibliografie

- [1] F. Maes, „Zonnewijzers vroeger en nu,” *Zenit*, pp. 12-24, juni 2018.
- [2] J. E. Barnett, *Time's Pendulum*, Harcourt Brace, 2018.
- [3] A. Mosley, „The Armillary Sphere,” 1999. [Online]. Available: <http://www.sites.hps.cam.ac.uk/starry/armillary.html>.
- [4] J. Morrison, *The Astrolabe*, Rehoboth Beach: Janus, 2007.
- [5] D. A. King, „The origin of the astrolabe according to the medieval Islamic sources,” *Journal for the History of Arabic Science*, vol. 5, nr. 1 & 2, pp. 43-83, 1981.
- [6] B. Casselman, „Stereographic Projection,” American Mathematical Society, 2019. [Online]. Available: <http://ams.org/publicoutreach/feature-column/fc-2014-02>.
- [7] C. Ptolemaeus, *Planisphaerium* (Arabic text and translation), Vancouver: SciAm, 2007.
- [8] O. Neugebauer, „Early History of the Astrolabe,” *Isis*, vol. 40, nr. 3, pp. 240-256, 1949.
- [9] R. H. van Gent, *De hemel in de hand*, Leiden: Museum Boerhaave, 1994.
- [10] J. Ashmand, *Ptolemy's Tetrabiblos*, London: Foulsham & Co., 1822.
- [11] O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, New York: Springer, 2011.
- [12] O. Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, Berlin: Springer, 1975.
- [13] Khan Academy, „The golden age of Islam,” Khan Academy, 2019. [Online]. Available: <https://www.khanacademy.org/humanities/world-history/medieval-times/cross-cultural-diffusion-of-knowledge/a/the-golden-age-of-islam>.
- [14] W. d. Graaf, „The Astrolabe,” Universiteit Utrecht, Utrecht, 2011.
- [15] G. Chaucer, *A treatise on the Astrolabe*, 1391.
- [16] T. Mitchell, „The Astrolabe in Theory and Practice,” 2011. [Online]. Available: <https://astrolabeproject.com/downloads>.
- [17] FSTC, „Abū_Ishāq_Ibrāhīm_al-Zarqālī,” Muslim Heritage, 2018. [Online]. Available: <http://muslimheritage.com/article/abu-ishaq-ibrahim-ibn-yahya-al-zarqali>.
- [18] G. Frisius, *De astrolabo catholico ...*, Antwerpen: Ioannes Steelsius, 1556.
- [19] E. Crone, „Het gebruik van het Astrolabium Catholicum,” *De Zee*, pp. 180-193, maart 1916.
- [20] A. Metius, „Astrolabium Catholicum,” in *Astronomische ende Geographische Onderwysinghe ...*, Franeker, Hendrick Lauwerenz, Amsterdam, 1632, pp. 75-103.
- [21] E. Kohlschütter, *Meßkarte zur Auflösung sphärischer Dreiecke*, Berlin: D. Reimer, 1929.
- [22] C. Koeman, „The Astrolabium Catholicum,” *Revista do Universidade de Coimbra*, vol. XXVIII, pp. 65-76, 1980.
- [23] E. Kohlschütter, „Lehrbücher, Tafeln und Diagramme,” [Online]. Available: <https://www.kartengruppe.it/index.php/lehrbuecher>.
- [24] J. Stoeffler, *Elucidatio fabricae ususque astrolabii ...*, Oppenheim, 1513.
- [25] J. North, „The Astrolabe,” *Scientific American*, pp. 96-107, January 1974.
- [26] „What is a mariner's astrolabe?,” Royal Museums Greenwich, 2019. [Online]. Available: <https://www.rmg.co.uk/discover/explore/what-mariners-astrolabe>.
- [27] G. Beekman, „Claude en Driencourt bedachten het prisma-astrolabium,” *Zenit*, p. 24, mei 2019.
- [28] D. Waters, *The Planispheric Astrolabe*, Greenwich: National Maritime Museum, 1979.
- [29] S. Gibbs en G. Saliba, *Planispheric Astrolabes from the National Museum of American History*, Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press, 1984.
- [30] K. H. S. Guan, „The mathematics of astrology: does house division make sense?,” National University of Singapore, Singapore, 2001.
- [31] R. Wymarc, „Astrolabe Project,” 24 march 2014. [Online]. Available: <https://www.astrolabeproject.com>.
- [32] J. Pazmino, „Operation of the Astrolabe,” 27 october 2015. [Online]. Available: <http://www.nyskies.org>.

- [33] J. C. Haff, „Use of the Wulff net in mineral determination with the universal stage,” *American Mineralogist*, vol. 25, nr. 10, p. 689, 1940.
- [34] A. Metius, *Fundamentale onderwijsinghe Aengaende de Fabrica en het veelvoudigh gebruyck van het Astrolabium, soo Catholicum, als particulier*, Amsterdam: Ulderick Balck, 1627.
- [35] C. Vooght, *Astrolabium Catholicum*, Amsterdam: Jacobus Robyn, 1680.
- [36] „History of Plastics,” 2019. [Online]. Available: <http://www.historyofplastic.com/plastic-history/history-of-plastics/>.
- [37] A. Bir, S. Bütün, M. Kaçar en Â. Akin, „The production guide for the Zarqaliyya (Universal Astrolabe) in the work of Abu al-Hasan al-Marrakushi,” *Nazariyat*, vol. 6, nr. 1, pp. 40-88, 2020.
- [38] D. A. King, *In Synchrony with the Heavens*, Boston: Brill, 2005.
- [39] D. A. King, „What an astrolabe is not,” in *What is an astrolabe, what is an astrolabe not*, Frankfurt, davidaking.academia.edu, 2018, p. 54.

© 2021, ing. Harold R. Plooijer M TM.

© Copyright afbeeldingen: 2019, ing. Harold R. Plooijer M TM (tenzij anders aangegeven).

Alle rechten voorbehouden. Overname van de inhoud, geheel of gedeeltelijk, in welke vorm dan ook, is alleen toegestaan na schriftelijke toestemming van de auteur en met bronvermelding.