

Bepaling van de rotatiesnelheid van de Zon

examenonderzoek VWO natuurkunde

Marc van der Sluys
Sterrenwacht Sonnenborgh, Utrecht

Oktober 2000

Inhoudsopgave

1	Theorie	1
1.1	Het Dopplereffect bij geluid	1
1.2	Het Dopplereffect bij licht	2
1.3	Het zonnenspectrum	3
1.4	Het Dopplereffect bij de zon	3
2	De zonne-opstelling op Sonnenborgh	5
2.1	Stap voor stap handleiding bij de zonne-opstelling	5

1 Theorie

1.1 Het Dopplereffect bij geluid

Om de rotatiesnelheid van de zon te meten, maken we gebruik van het zogenaamde *Dopplereffect*. Het Dopplereffect is bekend uit het dagelijks leven en uit zich bijvoorbeeld wanneer een ambulance met loeiende sirenes een waarnemer passeert. De waarnemer hoort de toon lager worden op het moment dat de ambulance passeert, dus op het moment dat de nadering van de ambulance overgaat in een verwijdering.

Fysisch kan dit worden verklaard door te bedenken dat geluid bestaat uit golven. Deze golven kunnen worden gekarakteriseerd door hun golflengte (λ), of frequentie (f). De twee hangen samen volgens $v_s = f \cdot \lambda$, waar v_s de geluidssnelheid voorstelt. Bij een hoge frequentie hoort een hoge toon, bij een lage frequentie een lage toon.

De frequentie zegt iets over het aantal golftoppen dat per seconde langskomt. Het is gemakkelijk in te zien dat een radieel bewegende bron een andere frequentie laat horen dan dezelfde bron, wanneer deze stilstaat. Immers, in de tijd die nodig is om één complete golf uit te zenden is de bron dichterbij gekomen. Iedere volgende golftop hoeft dus iets minder afstand af te leggen om bij de waarnemer te komen en zal de waarnemer dus eerder bereiken dan wanneer de bron stilstaat. Het gevolg is dat de waarnemer meer golftoppen per seconde ziet langskomen en dus een hogere frequentie meet. De formule die hoort bij het Dopplereffect *voor geluid* staat in Binas en luidt

$$f_w = f_b \frac{v_s + v_w}{v_s - v_b}, \quad (1)$$

waarin de subscripten w en b staan voor respectievelijk *waarnemer* en *bron*, en waar voor nadering een positieve en voor verwijdering een negatieve snelheid moet worden ingevuld.

1.2 Het Dopplereffect bij licht

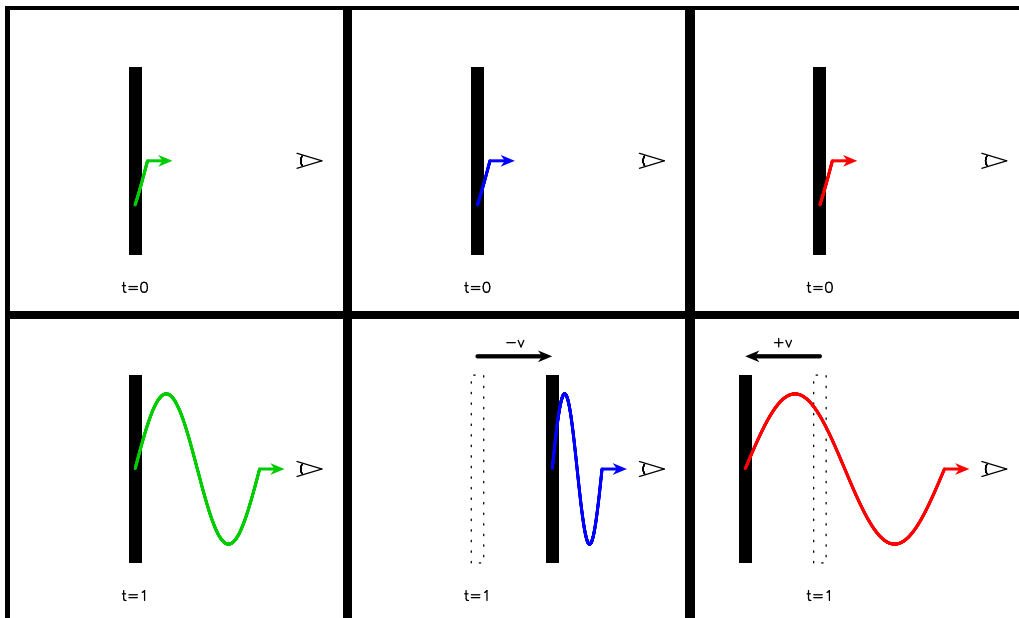
Licht is ook een golfverschijnsel en kan dus eveneens worden beschreven door een golflengte of een frequentie, waarbij de relatie

$$c = f \cdot \lambda \quad (2)$$

geldt, met c de lichtsnelheid. Bij licht uit het verschil in frequentie zich in een verschil in kleur: bij hogere frequentie hoort een blauwere kleur, bij een lagere frequentie een rodere kleur. Wanneer een bron zich naar een waarnemer toe beweegt, is er dus weer sprake van een toename van de frequentie. Dit wordt *blauwverschuiving* genoemd. Bij een verwijderende bron worden de golven juist uitgerekt. Men spreekt dan van *roodverschuiving*. Het grote verschil tussen geluidsgolven en lichtgolven is dat de laatste geen medium nodig hebben om zich in voort te planten. Dit betekent dat alleen het *snelheidsverschil*, ook te bestempelen als de *relatieve snelheid* v , tussen bron en waarnemer van belang is. Vergelijking 1 wordt dan

$$f_w = f_b \frac{c}{c + v}, \quad (3)$$

voor snelheden die veel kleiner zijn dan de lichtsnelheid ($v \ll c$).



Figuur 1: Illustratie van het Dopplereffect. De bovenste drie panels tonen steeds het begin ($t = 0$) van het uitzenden van een lichtgolf, de onderste drie panels het einde, na één volledige golflengte ($t = 1$). In de linker panels staat de bron (de verticale balk) stil ($v = 0$) t.o.v. de waarnemer (het oog rechts) en behoudt de golf zijn golflengte en kleur. In de middelste panels beweegt de bron naar de waarnemer toe ($v < 0$) tijdens het uitzenden, waardoor de golf wordt ingedrukt en blauwverschoven. In de rechter panels is $v > 0$ en vindt uitrekking en roodverschuiving plaats.

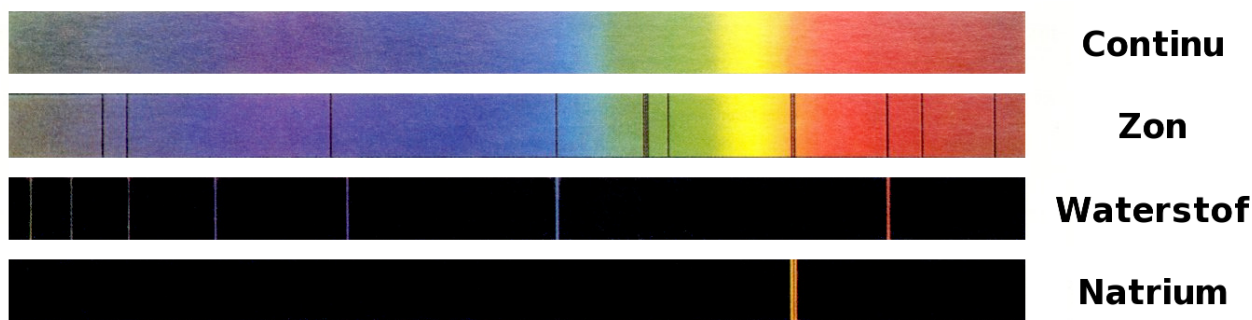
Vullen we Vergelijking 2 in, dan vinden we een uitdrukking voor de golflengte:

$$\lambda_w = \lambda_b \frac{c + v}{c} = \lambda_b \left(1 + \frac{v}{c}\right), \quad (4)$$

wat uiteindelijk kan worden geschreven als

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \equiv \frac{\lambda_w - \lambda_b}{\lambda_b} = \frac{v}{c}. \quad (5)$$

Zodra we nu een verschuiving van de golflengte $\Delta\lambda$ hebben gemeten, kunnen we dus de bijbehorende snelheid v uitrekenen.



Figuur 2: Versimpelde weergaven van een continu spectrum (geen lijnen), een zonnenspectrum (met absorptielijnen), en de emissiespectra van waterstof en natrium. Merk op dat de laatste twee stoffen voorkomen op de Zon, maar dat niet alle lijnen daar even duidelijk zijn.

1.3 Het zonnenspectrum

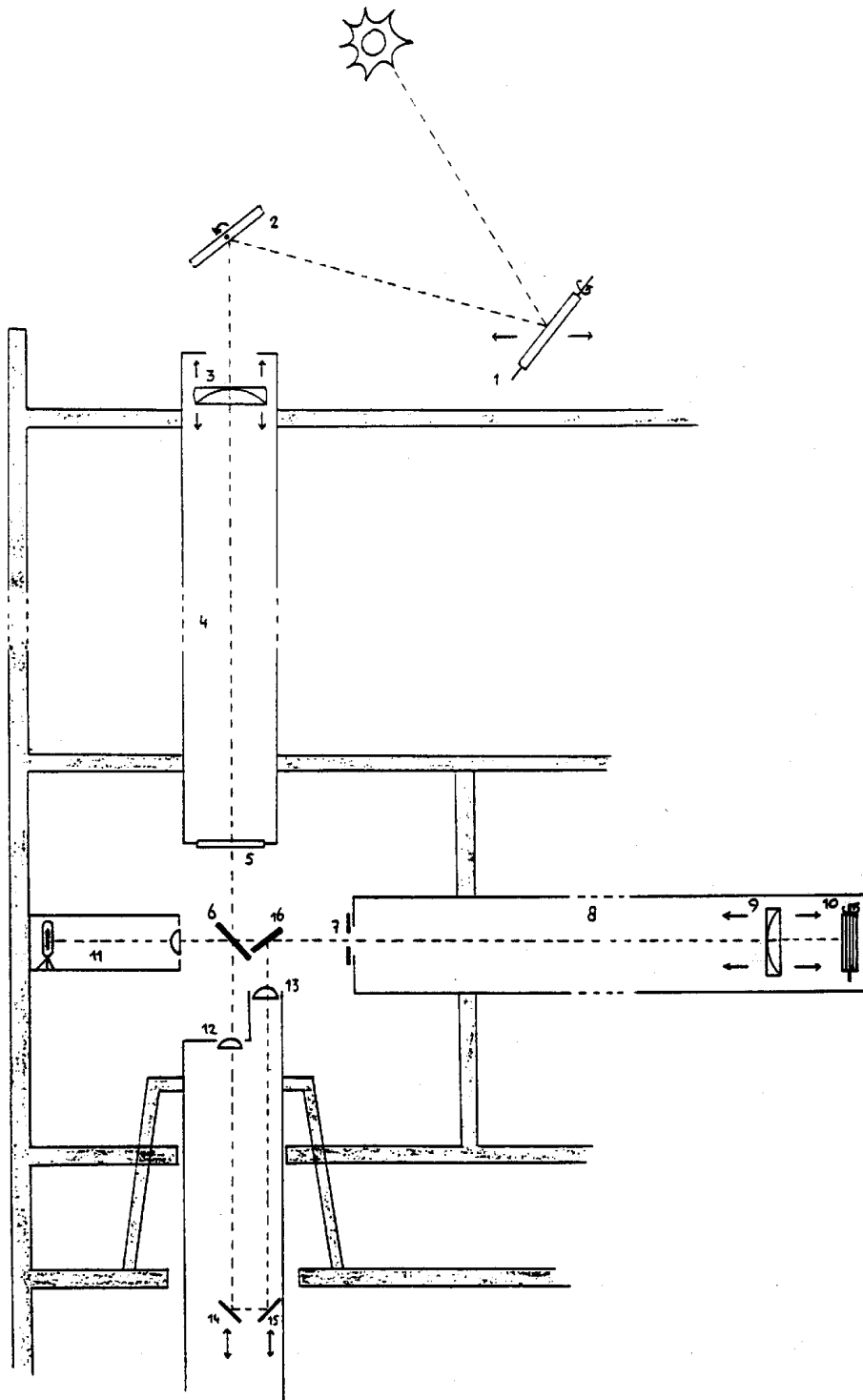
Om van de zon de verschuiving in golflengte $\Delta\lambda$ te kunnen meten maken we een *spectrum* van het zonlicht. Dit is niets anders dan dat we het geel-witte licht van de zon ontbinden in al z'n kleuren; een soort regenboog dus (zie Figuur 2). Hiervoor is op Sonnenborgh de speciale zonnetelescoop (*Coeliostaat*; nummers 1–5 in Figuur 3) beschikbaar om het zonlicht op te vangen en er een beeld van te maken, en een spectroscop (7–10) om een spectrum te maken van dit zonlicht. Hiertoe projecteren we een beeld van de zon op de *ingangsspleet* (7) van de spectroscop. Dat licht valt gedeeltelijk door de spleet naar achteren, waar het op een *tralie* (10) terecht komt. Een tralie werkt ongeveer hetzelfde als een prisma — het creëert een spectrum — en reflecteert bovendien het licht weer naar voren, waar we het spectrum kunnen bekijken of fotograferen.

Wanneer we dit doen, zien we geen mooie, continue regenboog ontstaan. In plaats daarvan blijkt het zonnenspectrum bij verschillende kleuren zwarte lijnen te vertonen. Blijkbaar zijn er in het zonlicht bepaalde kleuren aanwezig waarin minder straling wordt uitgezonden. Ze worden *Fraunhofer lijnen* genoemd en ontstaan in de buitenste lagen (fotosfeer) van de zon, door absorptie van die kleur licht door bepaalde stoffen. Heel bekend zijn bijvoorbeeld de *natrium-D-lijnen*, bij 589 nm, dus in het oranje deel van het spectrum (zie Figuur 2). Deze ontstaan doordat natriumatomen het licht van die specifieke golflengte absorberen en weer uitzenden (samen: *verstrooien*). Dit gebeurt zoals gezegd in de buitenste lagen van de zon, waar de temperatuur een stuk lager is dan dieper in de zon, waar de rest van het licht vandaan komt. Het gevolg is dat het licht bij 589 nm, uitgezonden door de relatief koele natriumatomen, zwakker is dan het overige licht. Doordat het spectrum met behulp van een *ingangsspleet* wordt gemaakt, uit zich dat tekort aan straling in zwarte lijnen, afbeeldingen van die *ingangsspleet*. In principe zijn die lijnen ‘oneindig smal’ (alleen fotonen met een golflengte van 589 nm ‘passen’ op het natriumatoom), maar door allerlei effecten en processen in de zon (o.a. thermische beweging van de atomen) worden die lijnen verbreed.

Deze lijnen zijn zeer geschikt voor het meten van onze $\Delta\lambda$. Immers, wanneer het zonnenspectrum perfect continu zou zijn, zou het hele spectrum bij nadering bijvoorbeeld een blauwverschuiving ondergaan. Het gevolg zou zijn dat het uiterste blauwe licht, dat nog net zichtbaar was, naar het ultraviolet zou verschuiven, maar straling uit het onzichtbare infrarood zou aan de andere kant van het spectrum weer net zichtbaar worden, en dus zou er netto niets veranderen. De discrete Fraunhofer lijnen schuiven echter mee, waardoor dit effect zichtbaar wordt.

1.4 Het Dopplereffect bij de zon

Wanneer we naar de zon kijken verwijderd deze zich niet (of nauwelijks) van ons. Daaruit ontstaat dus geen Dopplereffect. Maar de zon *roteert* wel. Dat betekent dat de ene rand van de zon zich van ons verwijderd, terwijl de tegenovergestelde rand juist naar ons toe beweegt. Het effect is het grootst aan de evenaar (equator) van de zon. Immers, iemand die op aarde op de evenaar woont legt in een etmaal 40.000 km af, terwijl iemand die vlakbij de noordpool woont slechts een fractie van die afstand af hoeft



Figuur 3: Schematische weergave van de zonne-opstelling op Sonnenborgh.

te leggen in dezelfde tijd, en dus veel langzamer beweegt. Bovendien meten we het Dopplereffect *twee keer*, namelijk een roodverschuiving aan de ene rand en een blauwverschuiving aan de andere rand. Dit is gunstig voor de meetnauwkeurigheid. Aan Vergelijking 5 moeten we dus een factor twee toevoegen, omdat we uit de gevonden Dopplerverschuivingen tweemaal de snelheid vinden:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2v}{c}. \quad (6)$$

Om het maximale effect te meten, willen we dus een spectrum maken van de *equator* van de zon.

Dit doen we door de zon zodanig op de ingangsspleet te projecteren dat de equator precies over de spleet valt. Hiervoor maken we gebruik van het zogenaamde *Dove-prisma*. Dat prisma wordt in de optische lichtweg gezet en zorgt ervoor dat het beeld over een in te stellen hoek geroteerd wordt. Om die hoek te bepalen laten we eerst de zon over de ingangsspleet ‘lopen’ (dus door de volgmotor uit te zetten of juist sneller te laten lopen). We weten dan de oost-westrichting van de hemel, zoals die op de ingangsspleet wordt geprojecteerd. Vervolgens zoeken we in de Sterrengids de hoek op die de equator maakt met de lijn oost-west. Voor de som van deze hoeken moet worden gecorrigeerd met behulp van het Dove-prisma.

Wanneer we een opname van het zonnespectrum maken verwachten we dat de Fraunhofer lijnen niet verticaal staan, zoals wanneer de zon in rust zou zijn. De lijnen zullen bijvoorbeeld aan de bovenkant naar links en aan de onderkant naar rechts zijn verschoven en komen dus schuin te staan. Het effect is heel klein, maar — als het goed is — meetbaar. We zullen het spectrum in eerste instantie fotograferen om de resultaten vervolgens op ons gemak uit te werken.

Het opmeten van die lijnen doen we dus later, aan de hand van de gemaakte opnames. Het probleem dat we nu tegenkomen is dan dat *alle* lijnen scheef staan. Hoe moeten we dan meten *hoe scheef* ze staan? Het antwoord ligt in de ‘vervuiling’ door de aardatmosfeer. Die bestaat ook uit gassen die licht absorberen en dus lijnen produceren (zie Tabel 1). En deze lijnen staan *wel* recht, zodat ze als referentie kunnen dienen. Let er bij het zoeken naar de juiste spectraallijnen op dat het *tweede-ordespectrum* een nauwkeuriger resultaat geeft dan het eerste-ordespectrum!

Lijn	Bron	Sterkte (mÅ)	Golflengte (lab) (nm)
Fe I	Zon	127	630.15012
O ₂	atmosfeer	21	630.2000
Fe I	Zon	83	630.24936
O ₂	atmosfeer	23	630.2764

Tabel 1: Nuttige spectraallijnen voor dit experiment.

Wat ons nu nog rest is het bepalen van de schaal van de opname: hoeveel pixels op de opname komen overeen met één nanometer in golflengte. Om dat te weten te komen ‘ijken’ we het spectrum door de afstand tussen twee bekende lijnen op te meten. De golflengtes van de belangrijkste lijnen staan nauwkeurig vermeld in de literatuur. Voor bijvoorbeeld de natrium-D-lijnen zijn de waarden 588,9950 en 589,5924 nm.

We hebben nu alle informatie die nodig is om de proef uit te voeren en vervolgens de waarnemingen te interpreteren en om te zetten in een bruikbaar antwoord.

2 De zonne-opstelling op Sonnenborgh

Een schematische weergave van de zonne-opstelling op Sonnenborgh is te vinden in Figuur 3. Tabel 2 geeft de belangrijkste specificaties van de opstelling.

2.1 Stap voor stap handleiding bij de zonne-opstelling

De getallen tussen haakjes verwijzen naar Figuur 3.

1. **In het zonnelab** de *synchroonmotor* aanzetten.
2. **Op het dak:** Huisje wegrijden, deksels van de spiegels afnemen en de spiegels (1, 2) zodanig richten dat de lichtstraal van de Zon door de telescoop (4) valt. Probeer eventueel de opstelling van de tweede spiegel (2) zodanig te draaien, dat de staanders (de komende tijd) zo min mogelijk in de weg zitten. Draai de spiegels weer goed vast.

coeliostaat	twee vlakke spiegels, diameter 30 cm
volgsysteem	synchroonmotoren, 4-sensor randvolger in hulpebeeld
objectief	doublet, diameter $d=14.15$ cm, brandpuntsafstand $f=734$ cm
zonsbeeld	diameter 69 mm
spectrograaf	horizontaal, Littrow autocollimatie, single-pass
ingangsspleet	verticaal, 20 mm lengte, breedte instelbaar
collimator	Steinheil doublet, brandpuntsafstand $f=1260$ cm
rooster	Bausch & Lomb, vlak, 206×154 mm ² , 1200 lijnen/mm
dispersie	$0.295 \text{ \AA}/\text{mm}$ in tweede orde bij $\lambda=3950 \text{ \AA}$
scheidend vermogen	$\lambda/\Delta\lambda \approx 100.000$

Tabel 2: Gegevens van de zonne-opstelling op Sonnenborgh.

- In het zonnelab:** Regel nu met behulp van de noord-zuid- en oost-westknoppen de spiegels af, zodanig dat de bundel mooi in de ingang van de *Oranjeconversie-opstelling* (12) valt. Zorg dat de dop die op de uitgang van de opstelling (13) zit **wordt verwijderd** en vervangen door de lens, die meestal aan de zijkant van de ingang van de opstelling zit.
- Met behulp van het kleine, vlakke spiegeltje (16) dat bij de telescoopbuis hangt kan nu de lichtbundel op de *ingangsspleet* (7) van de *spectroscop* (8) geprojecteerd worden. De arm van het spiegeltje wordt bovenin vastgezet door een schroef in het gaatje te steken.
- Op de optische bank voor de ingangsspleet kan nu het *Dove-prisma* worden opgesteld. Hiermee wordt het zonsbeeld zodanig geroteerd dat de equator van de Zon over de ingangsspleet van de spectroscop komt te liggen. Om deze hoek te berekenen moet eerst de hoek tussen de lijn oost-west en de ingangsspleet worden opgetekend door een vel papier over de spleet te leggen en de Zon oost-west te laten bewegen. Vervolgens moet de hoek tussen de equator van de Zon en de ecliptica worden opgezocht in de Sterrengids. **LET OP: Doordat er vijf spiegels worden gebruikt in de opstelling, is het geprojecteerde beeld in spiegelbeeld, en zal de in de Sterrengids gevonden hoek P moeten worden voorzien van een minteken!** Stel het prisma in en controleer nog even door de Zon oost-west te laten draaien. Het zonsbeeld moet nu, op een hoek P na, over de spleet bewegen.
- Het is nu zaak om een zo klein mogelijk, maar scherp zonsbeeld op de ingangsspleet te projecteren, door zowel de Oranjeconversie en het *telescoopobjectief* (3) af te regelen. Dit is een lastig werk. Het doel is het zonsbeeld zo klein te maken dat het door de verschillende diafragma's in de spectroscop valt en dus de gehele equator van de Zon zichtbaar wordt.
- Wat rest is een goed te onderscheiden spectrum te projecteren, door de grootte van de ingangsspleet en de *collimatorlens* (9) af te regelen. Probeer het geheel *scherp* op het matglasje af te beelden.
- Selecteer het gewenste gebied in het spectrum door met de knop *Rooster* het *tralie* (10) te draaien. **Let op: het tweede-ordespectrum is veel nauwkeuriger dan het eerste-ordespectrum!**
- We vervangen nu de cassette met oculair en matglasje door de cassette met de film. Zorg dat de cassette verticaal goed is afgeregeld (dus tussen oculair en matglas in), anders komt je spectrum naast de film terecht.
- Doe de *sluiter* dicht en controleer dit nog even voor je de cassette met de film definitief bevestigt. **LET OP: de sluiter is nogal gevoelig voor storingen zoals schokken en ook het lichtknopje van het lab.** Laat het licht dus gewoon aan.
- Trek de schuif aan de onderkant van de filmcassette weg en bedien de sluiter eenmaal om te openen en weer eenmaal om te sluiten. Voor 125 ASA film ligt de belichtingstijd ergens rond de 8 seconden.
- Doe de schuif zo snel mogelijk weer dicht. Eventueel de laatste twee stappen herhalen.