



Keuzeonderwerp 6

NEWTON OF KEPLER

COMPUTERSIMULATIES

De zes computersimulaties in Coach7 die je in dit keuzeonderwerp gaat gebruiken staan op de handboekwebsite.

Johannes Kepler (1571-1630) en Isaac Newton (1643-1726) gaven elk in hun eigen tijd verschillende verklaringen voor de beweging van de planeten in ellipsbanen rond de zon. Zij waren het met elkaar eens dat de beweging van een voorwerp wordt veroorzaakt door de *invloed* van andere voorwerpen, en tegenwoordig noemen we die invloed een *kracht*.

Ze waren het ook met elkaar eens dat een verklaring voor de beweging van een voorwerp dan bestaat uit het geven van antwoord op de volgende vier vragen:

- Hoe zou het voorwerp bewegen als er helemaal geen invloeden op zouden werken? Ofwel: wat is de *invloedloze beweging* van het voorwerp?
- Welke voorwerpen beïnvloeden de beweging van dit voorwerp?
- Welke *invloed* heeft elk van die voorwerpen?
- Wat is het effect van die invloeden op de beweging van het voorwerp?

Kepler en Newton waren het met elkaar eens over het antwoord op de tweede vraag. De beweging van bijvoorbeeld de planeet Mars werd volgens hen beïnvloed door de zon. Maar over de antwoorden op de andere vragen dachten Kepler en Newton duidelijk verschillend.

Kernvraag

Hoe verklaarden Kepler en Newton de beweging van de planeten, en waardoor kreeg de theorie van Newton uiteindelijk de voorkeur?

De theorie van Kepler

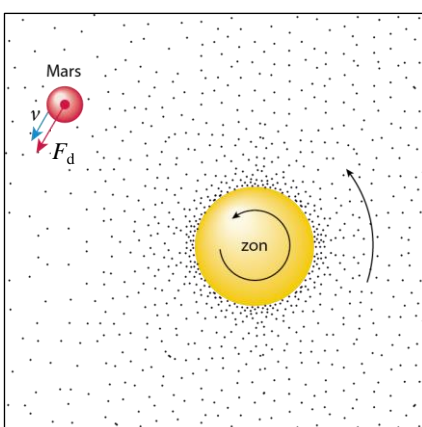
Volgens Kepler zou de planeet Mars, als de zon er niet was, niet bewegen. De invloedloze beweging is bij Kepler dus *stilstand*. En de beweging van Mars ontstaat doordat de zon twee soorten invloed op de planeet heeft: een 'draaikolk' invloed en een 'magnetische' invloed.

De 'draaikolk' invloed – Alle planeten draaien in dezelfde richting rond de zon. Kepler dacht: misschien draait de zon in dezelfde richting. (Dat klopt, maar dat was in de tijd van Kepler nog niet waar te nemen.) Misschien sleept de ronddraaiende zon de planeten mee, zoals een draaikolk de dingen op het water meesleept.

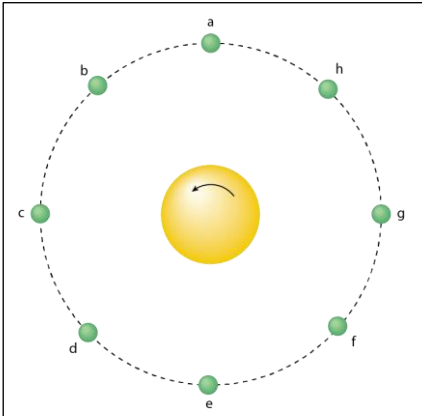
Tussen de zon en de planeten zit natuurlijk geen water. Kepler bedacht dat de zon behalve licht en warmte nog iets uitzendt, dat hij species noemde. Wat het species was, heeft hij nooit goed uitgelegd. Maar hij dacht dat het species met de zon meedraaide, en zo de planeten meesleepte. De invloed van de zon is dus de *sleeppkracht* van het species op Mars (zie figuur 1). Deze sleeppkracht veroorzaakt een snelheid in de richting van de kracht. En als de sleeppkracht van richting en grootte verandert, dan verandert ook de richting en de grootte van de snelheid.

De sleeppkracht van het species op de planeet zou afhangen van de draaisnelheid van de zon: hoe sneller de zon ronddraait, des te groter is de sleeppkracht. Het species zou steeds dunner worden als je verder van de zon komt. De sleeppkracht van het species op een planeet zou sterker zijn waar meer species is.

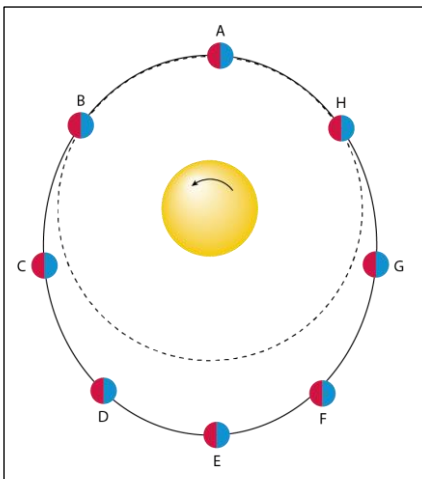
De 'magnetische' invloed – De 'draaikolk' invloed levert voor iedere planeet



Figuur 1 – Het species draait volgens Kepler met de zon mee en sleept de planeten voort. Hoe dunner het species is, des te kleiner is de sleeppkracht F_d .



Figuur 2 – De beweging van Mars met alleen de ‘draaikolk’ invloed van Kepler.



Figuur 3 – De beweging van Mars met de ‘draaikolk’ en de ‘magnetische’ invloed van Kepler.

OMLOOPTIJD

De omlooptijd T van de planeet in de simulatie is af te lezen op de tijdmeter (in het venster ‘variabele: t ’) door na één volledige omloop de simulatie te stoppen met de ‘stopknop’. De schaalwaarden voor de verschillende variabelen zijn in de simulatie zo ingesteld dat de tijdmeter de tijd weergeeft in dagen.

Voor een volgende run is de simulatie te resetten met de knop ‘reset animatie’ onder ‘gereedschap’ in het simulatievenster.

een cirkelbeweging op met een constante snelheid, en met de zon in het midden (zie figuur 2). Kepler moest dus nog een invloed bedenken die de baan de goede vorm zou geven. Stel dat Mars in punt a is en door het species naar punt b in figuur 2 zou worden gesleept. De extra invloed zorgt voor afstoting: in plaats van in punt b en daarna c komt Mars in punt B en daarna C in figuur 3 terecht. De afstoting blijft werken op het hele stuk ABCDE. Maar daarna wordt de kracht op het deel EFGHA een aantrekkende. De baan eindigt weer in punt a: de punten a en A in figuur 2 en 3 vallen samen. Zo ontstaat de gewenste baanvorm. In figuur 3 is duidelijk te zien dat de baan niet cirkelvormig is, maar ‘afgeplat’. (Dat het wiskundig gezien inderdaad een ellips is gaan we nu niet na.)

Er is dus afwisselend afstoting en aantrekkende nodig. Dit deed Kepler aan magnetisme denken. Hij nam aan dat er ‘magnetische draden’ in de planeet zitten, met een afstotende en een aantrekkende kant. Is de afstotende kant dichterbij de zon dan de aantrekkende, dan wordt de planeet als geheel afgestoten. Ligt de aantrekkende kant dichterbij de zon dan de afstotende, dan wordt de planeet aangetrokken. De magnetische kracht zou afhangen van het aantal ‘magnetische draden’ in de planeet: hoe groter het aantal ‘magnetische draden’ is, des te groter is de magnetische kracht.

- 1 In figuur 3 zijn de tegengestelde ‘polen’ van de ‘magnetische draden’ in de theorie van Kepler als de kleuren blauw en rood weergegeven.
 - a Stelt rood de aantrekkende of de afstotende kant voor? Leg uit.
 - b Kepler wist dat een planeet in zijn perihelium (het punt van de baan waar de planeet het dichtst bij de zon staat: punt A in figuur 3) sneller beweegt dan in zijn aphelium (het punt van de baan waar de planeet het verst van de zon af staat: punt E in figuur 3). Dat kon hij nu met de vorm van de baan en zijn aannames over het species verklaren. Leg uit hoe.

De aannames van Kepler passen dus bij de baan van Mars. Maar voor een precieze verklaring is meer nodig. Daarvoor moet je de baan berekenen, vergelijken met de waarnemingen en nagaan of beide overeenstemmen. Dat kun je tegenwoordig snel doen met een computersimulatie.

- 2 De verklaring van Kepler voor de beweging van Mars is te testen met de computersimulatie [Kepler-Mars](#). Deze simulatie berekent de baan van Mars (het rode bolletje op het scherm) volgens de ideeën van Kepler. De simulatie laat ook (op schaal) de echte, waargenomen beweging van Mars zien.

In de simulatie is de rotatiesnelheid R van de zon en het aantal ‘magnetische draden’ N van de planeet in te stellen. De simulatie loopt vrij langzaam, doordat voor een nauwkeurige berekening van de baan een kleine tijdstap nodig is.

- a Voorspel hoe de baan van Mars eruit ziet bij een beweging onder invloed van alleen de sleepkracht F_d . Voorspel ook hoe de omlooptijd T_M van Mars afhangt van de rotatiesnelheid R van de zon.
- b Controleer je voorspellingen met de simulatie. Zet het aantal ‘magnetische draden’ van Mars in de simulatie op $N_M = 0$. Zet de rotatiesnelheid van de zon achtereenvolgens op $R = 15$, $R = 30$ en $R = 60$. Ga in elk van deze drie gevallen na dat de berekende baan een cirkelbaan is (en dus afwijkt van de in de simulatie weergegeven werkelijke baan van Mars). Ga ook na welk



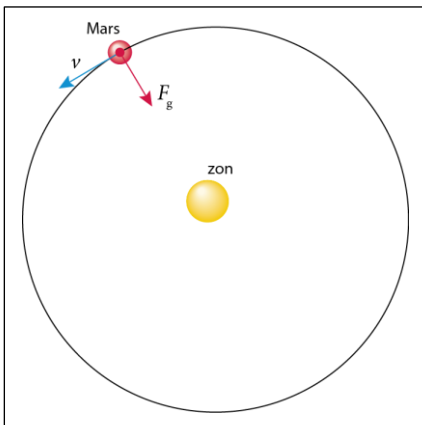
verband er is tussen de rotatiesnelheid R van de zon en de omlooptijd T_M van Mars in de simulatie (zie het kader hiernaast voor het meten van de omlooptijd in de simulatie).

- c Test de aannames van Kepler met de simulatie. Dus: ga door systematisch uitproberen na of je de berekende en waargenomen baan van Mars kunt laten samenvallen, waarbij bovendien de omlooptijd van Mars (ruwweg) de juiste waarde heeft: 687 dagen. Bedenk als start van dat systematisch uitproberen wat een handige beginwaarde van R zou kunnen zijn. Gebruik daarvoor je waarnemingen bij vraag b. Zoek daarna een bijpassende waarde van N_M , en pas de waarden van R en N_M aan tot de omlooptijd T_M (ongeveer) de juiste waarde heeft. Noteer de rotatiesnelheid R van de zon en het aantal 'magnetische draden' N_M van Mars waarbij de berekende en de waargenomen baan van Mars samenvallen, en de in de simulatie gemeten omlooptijd T_M .
- d Volgt hier nu uit dat we met de aannames van Kepler de bewegingen van de planeten kunnen verklaren, of is daar meer voor nodig? Leg uit.

De theorie van Newton

Volgens Newton zou de planeet Mars, als de zon er niet was, verder bewegen in een rechte lijn, met een constante snelheid. De invloedloze beweging is bij Newton dus een *eenparige rechtlijnige beweging*. En de invloed van de zon is de *gravitatiekracht* van de zon op Mars (zie figuur 4). Deze gravitatiekracht veroorzaakt een versnelling: een verandering van de richting (en bij een ellipsbaan ook de grootte) van de snelheid.

De aannames van Newton gaan dus uit van één kracht op de planeet (in plaats van de twee krachten bij de aannames van Kepler). Deze gravitatiekracht van de zon op de planeet hangt af van de massa van de zon en van de afstand tussen de zon en de planeet.



Figuur 4 – De baan van Mars rond de zon onder invloed van de gravitatiekracht F_g .

- 3 De verklaring van Newton voor de beweging van Mars is te testen met de computersimulatie **Newton-Mars**. Deze simulatie berekent de baan van Mars (het rode bolletje op het scherm) volgens de ideeën van Newton. De simulatie laat ook (op schaal) de echte, waargenomen beweging van Mars zien. In de simulatie is de massa M van de zon in te stellen. Ook deze simulatie loopt vrij langzaam.
 - a Voorspel hoe de baan van Mars eruit ziet bij een beweging onder invloed van alleen de gravitatiekracht F_g bij verschillende waarden van de massa M van de zon.
 - b Controleer je voorspellingen met de simulatie. Zet de massa van de zon achtereenvolgens op $M = 0$, $M = 1000$ en $M = 4000$. Ga in elk van deze drie gevallen hoe de berekende baan afwijkt van de in de simulatie weergegeven werkelijke baan van Mars.
 - c Test de aannames van Newton met de simulatie. Dus: ga door systematisch uitproberen na of je de berekende en waargenomen baan van Mars kunt laten samenvallen, waarbij bovendien de omlooptijd van Mars de juiste waarde heeft: 687 dagen. Noteer de massa M van de zon waarvoor dat lukt, en de in de simulatie gemeten omlooptijd T_M .
 - d Volgt hier nu uit dat we met de aannames van Newton de bewegingen van de planeten kunnen verklaren, of is daar meer voor nodig? Leg uit.



Bewegingsverklaringen vergelijken

Kepler en Newton gaven verschillende antwoorden op de vier vragen voor het verklaren van een beweging.

- 4 Hieronder staan (nogmaals) de vier vragen voor het verklaren van een beweging. Welke antwoorden gaf Kepler op deze vier vragen bij het verklaren van de beweging van de planeet Mars? En welke antwoorden gaf Newton?

Bewegingsverklaring

- Hoe zou het voorwerp bewegen als er helemaal geen invloeden op zouden werken? Ofwel: wat is de *invloedloze beweging* van het voorwerp?
- Welke voorwerpen beïnvloeden de beweging van dit voorwerp?
- Welke *invloed* heeft elk van die voorwerpen?
- Wat is het effect van die invloeden op de beweging van het voorwerp?

Met hun ideeën over het verklaren van bewegingen berekenden zowel Kepler als Newton een baan van Mars die goed bij de waargenomen baan past. Maar de verklaringen kunnen niet allebei gelden, dus welke verklaring is de beste? Dat onderzoek je door beide verklaringen toe te passen op de banen van andere planeten, om te beginnen met die van de aarde. Je gaat na of beide verklaringen dan nog steeds goed werken.

- 5 In de computersimulatie **Kepler-Aarde** zie je de waargenomen baan van de aarde (het blauwe bolletje op het scherm) en de baan die met de aannames van Kepler berekend wordt. Kun je de berekende en de waargenomen baan opnieuw laten samenvallen?
- a** Welke grootte of grootheden mag je aanpassen om de krachten de juiste grootte te geven? Weet je al iets over de waarden? Leg uit.
- b** Onderzoek of voor de aarde de berekende en de waargenomen baan kunnen samenvallen, terwijl de omlooptijd de juiste waarde heeft: 365 dagen. Geef de waarden van R en N_A waarbij dat lukt. En als dat niet lukt, leg dan uit hoe de waargenomen baan verschilt van de berekende.
- c** Als het bij vraag **b** niet lukt om de berekende en de waargenomen baan te laten samenvallen bij een omlooptijd van (ruwweg) 365 dagen, probeer het dan nog eens door aanpassen van de rotatiesnelheid R van de zon.
- 6 In de computersimulatie **Newton-Aarde** zie je de waargenomen baan van de aarde (het blauwe bolletje op het scherm) en de baan die met de aannames van Newton berekend wordt. Kun je de berekende en de waargenomen baan opnieuw laten samenvallen?
- a** Welke grootte of grootheden mag je aanpassen om de krachten de juiste grootte te geven? Weet je al iets over de waarden? Leg uit.
- b** Onderzoek of voor de aarde de berekende en de waargenomen baan kunnen samenvallen, terwijl de omlooptijd de juiste waarde heeft: 365 dagen. Geef de waarden waarbij dat lukt. En als dat niet lukt, leg dan uit hoe de waargenomen baan verschilt van de berekende.
- 7 Op basis van de resultaten van je onderzoek moet je nu kunnen inzien



welke verklaring het best bij de waargenomen bewegingen past.

- Leg uit welke verklaring dat is en waardoor: die van Kepler of die van Newton.
- Test de 'winnende' verklaring voor vier planeten tegelijk (namelijk: Mercurius, Venus, Aarde en Mars) met de computersimulatie **Newton-Zonnestelsel**. Ga na of de vier planeten met de juiste omlooptijden in de juiste banen bewegen.
- Zijn we dan nu eindelijk zeker van de juiste verklaring, of moeten we deze verklaring nog verder testen? Leg uit.

De verklaring van Newton past het best bij de waargenomen bewegingen van de planeten. Maar lukt het dan ook om met alleen de gravitatiekracht van Newton de waargenomen beweging van andere hemellichamen, zoals kometen, te verklaren?



Figuur 5 – De komeet Kirch zoals die in 1680 in Rotterdam werd waargenomen.

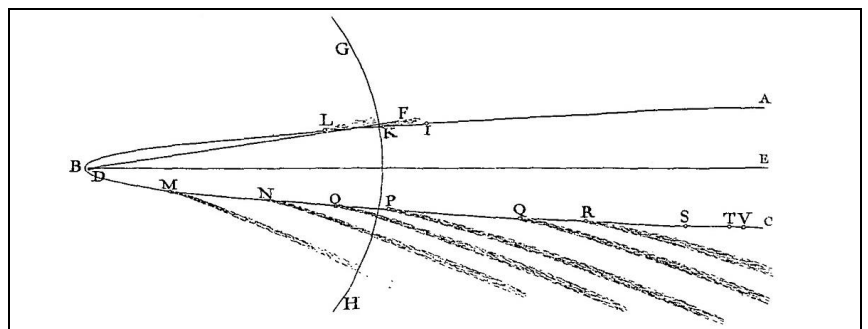
- In de computersimulatie **Newton-komeet** zie je een baan als die van de komeet Kirch zoals waargenomen in de laatste maanden van 1680 en de eerste maanden van 1681 (zie figuur 5) en de baan die met de aannames van Newton berekend wordt. De waargenomen baan is weergegeven in figuur 6.

Als de beweging van hemellichamen verklaard kan worden met alleen de gravitatiekracht van Newton, dan zullen de waargenomen en de berekende baan moeten samenvallen. Dat spreekt niet vanzelf, want de banen van een planeet en een komeet zien er behoorlijk verschillend uit.

- Zet de tijdstap in de simulatie op 0,2. Laat de simulatie lopen en beschrijf wat er gebeurt in de buurt van de zon. Is de theorie van Newton dan toch fout?

Kometen die heel dicht langs de zon bewegen noemen we 'sungrazers'. De komeet Kirch is daarvan een voorbeeld. Bij een te grote tijdstap is de berekening van de baan in de buurt van de zon te onnauwkeurig, en geeft de simulatie daar duidelijk niet de waargenomen baan van de komeet. Bij een kleinere tijdstap worden de berekeningen in de simulatie nauwkeuriger, maar dan is er meer rekentijd nodig (en loopt de simulatie langzamer).

- Verklein de tijdstap in de simulatie met een factor 2, 5 of 10. Geeft dat een beter resultaat? Vind je het resultaat goed genoeg?
- Wat is op grond van het resultaat van deze simulatie je conclusie over de geldigheid van de aannames van Newton?



Figuur 6 – Weergave van de beweging van de komeet Kirch in de *Principia Mathematica* van Newton uit 1687. De zon staat in punt D. De baan van de aarde is de boog GH. Newton heeft ook de 'staart' of 'coma' van de komeet ingetekend.



Wetenschappelijke theorie

Kepler en Newton gaven beide een wetenschappelijke theorie voor het verklaren van de beweging van hemellichamen.

- 9** Op grond van welke criteria kun je een keuze maken voor één van deze theorieën? Of, met andere woorden: aan welke eisen moet volgens jou een wetenschappelijke theorie voor het verklaren van bewegingen voldoen?
- 10** De Engelse filosoof William of Ockham bedacht rond 1300 het filosofisch principe dat bekend staat als 'Ockham's Razor': "Als er twee verschillende verklaringen zijn voor hetzelfde verschijnsel, accepteer dan de eenvoudigste." Geldt dat principe altijd?
- a** Newton gebruikt één kracht in zijn verklaring voor de beweging van Mars. Kepler heeft twee krachten nodig. Kun je dan al zeggen dat de verklaring van Newton beter is dan die van Kepler? Leg uit.

Kepler merkte dat hij de bewegingen van de planeten niet kon verklaren met alleen de 'draaikolk' en 'magnetische' invloeden. Hij bedacht allerlei extra aannames om zijn verklaring 'kloppend' te krijgen. Newton kon zonder extra aannames de beweging van alle planeten verklaren.

- b** Is de verklaring van Newton dan beter dan die van Kepler? Leg uit.
Volgens Newton zal Mars eenparig rechtlijnig bewegen als er geen enkele invloed op werkt. Alle wetenschappers in die tijd dachten, net als Kepler, dat Mars dan stil zou blijven staan.
- c** Als je Newton was, hoe zou je dan je hypothese over de invloedloze beweging verdedigen?

Christiaan Huygens was Nederlands grootste natuurkundige van die tijd. Hij vond de ideeën van Newton over 'gravitatie' onacceptabel. Die kracht zou, door de lege ruimte heen, voorwerpen elkaar laten aantrekken. Dat is geen natuurkunde, dat is magie! Volgens Huygens moeten voorwerpen die krachten op elkaar uitoefenen op één of andere manier in verbinding met elkaar staan. Het species van Kepler voldeed aan die voorwaarde.

De reactie van Newton is beroemd geworden. Hij zei (in het Latijn): "Hypotheses non fingo." Letterlijk: "Ik verzin geen aannames." Newton bedoelde: als hij moest uitleggen hoe de zwaartekracht werkte, zou hij iets moeten verzinnen. Dat weigerde hij. Het moest voldoende zijn dat de bewegingen van de planeten precies zo waren als zijn theorie aangaf.

- d** Vind je de reactie van Newton overtuigend? Leg uit.



Figuur 7 – Christiaan Huygens (1629-1695).

Als wetenschappelijke aannames (of: hypotheses) bij het verder testen steeds weer passen bij de nieuwe waarnemingen en algemener toepasbaar blijken te zijn, neemt het vertrouwen daarin toe. Het helpt als de hypotheses eenvoudiger zijn dan alternatieve verklaringen. Meestal worden wetenschappers het dan steeds meer eens over de waarde van die hypotheses. Uiteindelijk noemen we het dan geen hypotheses meer, maar wetenschappelijke kennis.

Van wetenschappelijke kennis weet je nooit zeker of die helemaal juist is. In principe kun je die kennis altijd blijven testen. Zo is het bezwaar van Huygens nooit afdoende beantwoord door Newton en zijn aanhangers. Het bleef mogelijk dat er op een dag een nog betere verklaring zou worden gevonden. En dat is ook gebeurd, toen Einstein ongeveer een eeuw geleden de relativiteitstheorie



bedacht. Maar toen had de aanpak van Newton zijn bruikbaarheid al een paar honderd jaar steeds weer opnieuw bewezen, en dat doet het nog iedere dag.