

DE DIDACTIEK VAN GOLFMACHINES

Al ruim tweehonderd jaar wordt in het natuurkundeonderwijs gebruikgemaakt van verschillende soorten 'machines' om golfverschijnselen zichtbaar te maken. In dit artikel onderscheidt Roger Rikken twee verschillende soorten golfmachines en behandelt hij van beide soorten een aantal voorbeelden.

Voor veel middelbare scholieren en studenten in het tertiair onderwijs zijn golven behoorlijk abstract en lastig voor te stellen. Gedurende de laatste tweehonderd jaar zijn er daarom vele modellen ontwikkeld die het begrip van golven en golfverschijnselen moeten vergemakkelijken. Veel docenten maken tegenwoordig gebruik van de vele simulaties en animaties die op het internet te vinden zijn. Dat was tot zo'n dertig jaar geleden nog niet zo vanzelfsprekend. Golfmachines waren dan vaak de aangewezen methode. De eerste golfmachines deden hun intrede aan het begin van de negentiende eeuw. De meeste machines uit deze tijd zijn de zogenoemde kinetische golfmachines [1]. Deze bevatten meestal een draaimechaniek waarmee één bepaalde golfbeweging gevisualiseerd kan worden. Vanaf het begin van de twintigste eeuw werd ook steeds meer gebruikgemaakt van dynamische golfmachines [2,3]. Kenmerkend voor de dynamische golfmachine is dat deze altijd een elastisch medium bevat dat in trilling kan worden gebracht. Hierdoor vertoont de dynamische golfmachine natuurlijk golfgedrag, in tegenstelling tot de kinetische golfmachines.

Kinetische golfmachines

De meeste kinetische golfmachines bestaan uit draaiende assen, tandwielen, staafjes et cetera. De onderdelen zijn nagenoeg altijd rigide, waardoor je ze

prima met een 3D-printer kunt maken. Van de voorbeelden die hieronder worden besproken heb ik daarom steeds een nieuw driedimensionaal ontwerp gemaakt of een bestaand ontwerp aangepast.

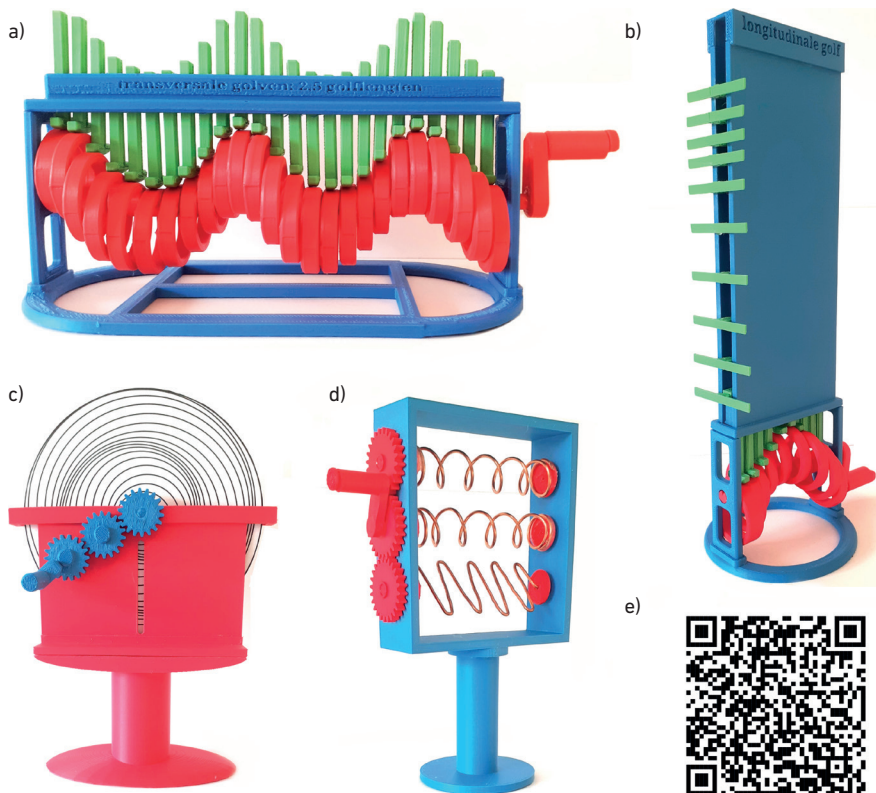
De bekendste kinetische golfmachine werd in 1841 door Baden Powell geïntroduceerd [4]. Deze golfmachine bestaat uit een ronddraaiende as waar cilindervormige schijfjes excentrisch aan zijn bevestigd (figuur 1a). Boven op elk schijfje rust een staafje. Doordat de cilinder niet concentrisch is met de as zal het daarop rustende staafje een harmonische oscillatie ondergaan wanneer de as aan het draaien wordt gebracht. De schijfjes aan de as vormen samen een helix, waardoor elk staafje een iets andere hoogte heeft en alle staafjes samen een periodieke lopende golf (sinus) laten zien. Het exemplaar in figuur 1a is gebaseerd op een bestaand ontwerp [5] dat ik heb uitgebreid zodat meer golf lengtes zichtbaar zijn.

Hetzelfde aandrijfmechanisme kan ook worden gebruikt om een lopende longitudinale golf weer te geven (figuur 1b). Hiervoor heb ik een aangepast bovenstuk gemaakt waarbij de verticale beweging van de staafjes worden omgezet in een longitudinale weergave.

Naast Powells golfmachine zijn er in de negentiende eeuw tal van andere machines ontwikkeld. Een daarvan is Crova's disc [6,7]. De Franse hoogleraar André Crova ontwikkelde in 1867 een

opstelling waarmee een longitudinale golf gevisualiseerd kan worden (zie figuur 1c). Op een ronde schijf, die aan het draaien kan worden gebracht, worden een aantal cirkels aangebracht. Elke cirkel stelt één enkel deeltje voor. De plaat wordt grotendeels afgedekt met een plaat waarin een spleet is aangebracht. Door deze spleet zien we een klein lijnstukje van elke cirkel. Een cirkel die concentrisch aan de draaias is aangebracht zal, door de spleet bekeken, niet van positie veranderen als de schijf aan het draaien wordt gebracht. Echter, als het middelpunt van de cirkel iets wordt verschoven ten opzichte van het draaipunt van de schijf dan zien we dat het lijnstukje van de cirkel periodiek op en neer beweegt. Door elke cirkel op de schijf op een bepaalde manier te verschuiven kan op deze manier een lopende of een staande longitudinale golf worden getoond.

Een geheel andere golfmachine beschreef William Jesse Lovett in 1877 [8]. Deze golfmachine bestaat uit een helix die aan het draaien kan worden gebracht. De helix wordt loodrecht beschenen door een lichtbron. De schaduw van de helix is in dit geval gelijk aan een harmonische golf (sinus). Door de helix te roteren zal de schaduw een lopende golf vertonen (figuur 1d). Dit model bevat twee identieke helices, gemaakt van koperdraad, die in tegenstelde richting draaien. Hierdoor zien we een naar links en naar rechts lopende golf met gelijke



Figuur 1. De verschillende golfmachines gemaakt met een 3D-printer. a) Powell's golfmachine voor transversale golven. b) Powell's golfmachine voor longitudinale golven. c) Crova's disc. d) Lovett's golfmachine. e) Link naar de ontwerpen van de hier getoonde golfmachines.

golfenlengte en amplitude. De som van deze twee golven is een staande golf. Dat wordt in dit model gevisualiseerd door een stuk koperdraad dat in één vlak is gebogen tot een sinus met dezelfde golfenlengte als beide helices, maar met een twee keer zo grote amplitude als die van een enkele helix. Ook deze golf draait in het apparaat rond zodat de schaduw hiervan maximaal is als beide helices in fase zijn en nul is als beide helices in tegenfase zijn.

Eigenschappen en toepasbaarheid

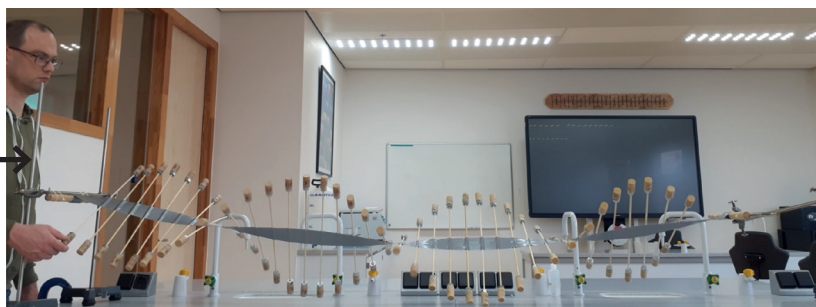
Wat de bovenstaande golfmachines met elkaar gemeen hebben is het feit dat de golfenlengte steeds onveranderbaar is. Door aan de hendel te draaien brengen we het mechanisme in beweging. Hoe sneller we draaien hoe sneller de individuele deeltjes oscilleren en hoe sneller de golf zich als geheel verplaatst. Zowel de frequentie als de golfsnelheid zijn dus recht evenredig met de draaisnelheid. Het voordeel hiervan is dat we de golf eenvoudig kunnen vertragen om het verband tussen de

trilling van de individuele deeltjes en de beweging van de gehele golf duidelijk te laten zien. We kunnen de golf indien gewenst ook pauzeren of een stukje terug laten lopen door het mechanisme terug te draaien.

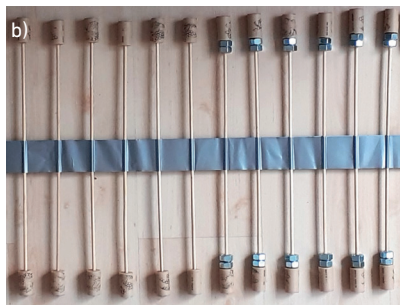
De beperkingen van zulke golfmachines verraden zich al door het feit dat de golfenlengte onveranderbaar is. De golfbeweging is een voorgeprogrammeerde beweging. Alle deeltjes worden tegelijk via dezelfde as in beweging gebracht. De golven in deze golfmachines voldoen weliswaar aan de relatie $v = \lambda \cdot f$ maar er is geen sprake van natuurlijk opgewekte golven waarbij een lokale verstoring wordt doorgegeven in een elastisch medium. Bij een dergelijke natuurlijke golf zal de golfsnelheid v vastliggen en is de frequentie f te variëren. De golfenlengte λ wordt vervolgens bepaald door zowel f als v . In het geval van de kinetische golfmachines is het juist de golfenlengte die vastligt en passen v en f zich in gelijke mate aan de draaisnelheid van het apparaat aan. We zien dus dat de kinetische golfmachines

Roger Rikken studeerde natuurwetenschappen aan de RU en promoveerde daar vervolgens op het gebied van de supra-moleculaire fysica. Hij is momenteel werkzaam als lerarenopleider natuurkunde bij de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen (HAN).
Roger.Rikken@han.nl

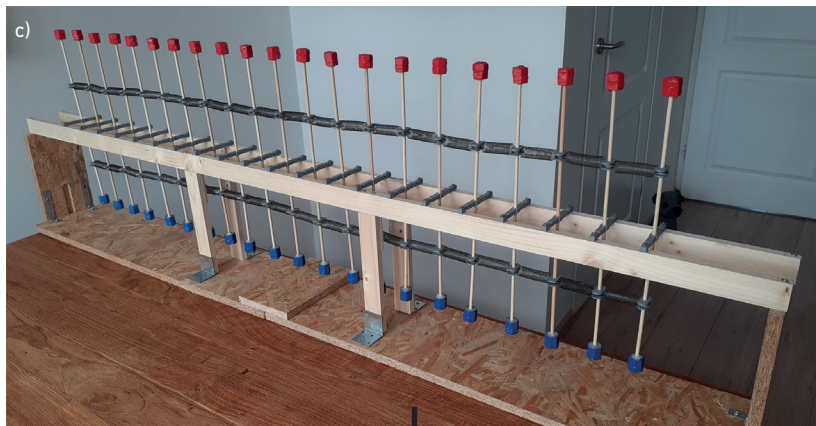
Shive's golfmachine, versie 1



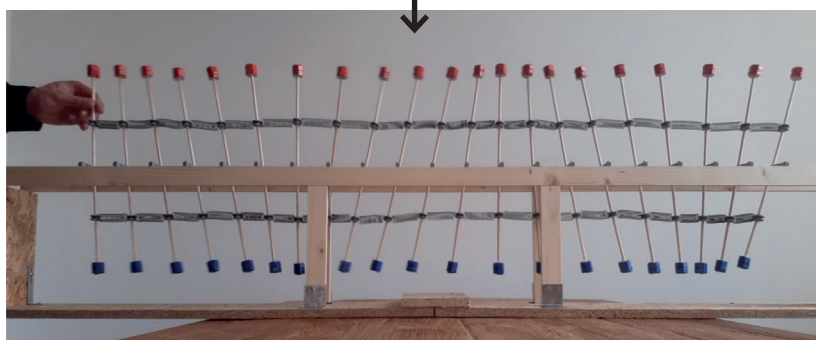
Shive's golfmachine, versie 2



Hayakawa's golfmachine



Figuur 2. a) De eerste versie van Shive's golfmachine bestaat uit een band van ducttape waarop om de vijf centimeter een stokje bevestigd. Elk stokje bevat aan elk uiteinde een massa (moer). De torsieconstante van ducttape is laag en het traagheidsmoment is door het gebruik van zware moeren relatief hoog waardoor de golfsnelheid laag is. b) De tweede versie van Shive's golfmachine bestaat uit twee delen met elk een ander traagheidsmoment. Hierdoor is de golfsnelheid in de eerste helft hoger dan in de tweede helft. c) Hayakawa's golfmachine. De stokjes zijn boven en onder de draaias met elkaar verbonden via identieke veren. Elk stokje bevat aan ieder uiteinde twee met tape bedekte moeren waardoor de golfsnelheid aanzienlijk wordt verlaagd.



slechts een visualisatiemiddel zijn, maar geen inzicht geven in de gehele fysica achter de golfverschijnselen. Voor dit laatste zullen we een aantal voorbeelden van dynamische golfmachines bekijken.

Dynamische golfmachines

Om de natuurkunde achter een golfbeweging te kunnen begrijpen is het van belang dat we een medium of machine gebruiken dat van nature golfgedrag vertoont. Denk hierbij aan een gespannen touw, een slinky (trapveer) of een golfbak gevuld met water. In al deze voorbeelden is er sprake van een elas-

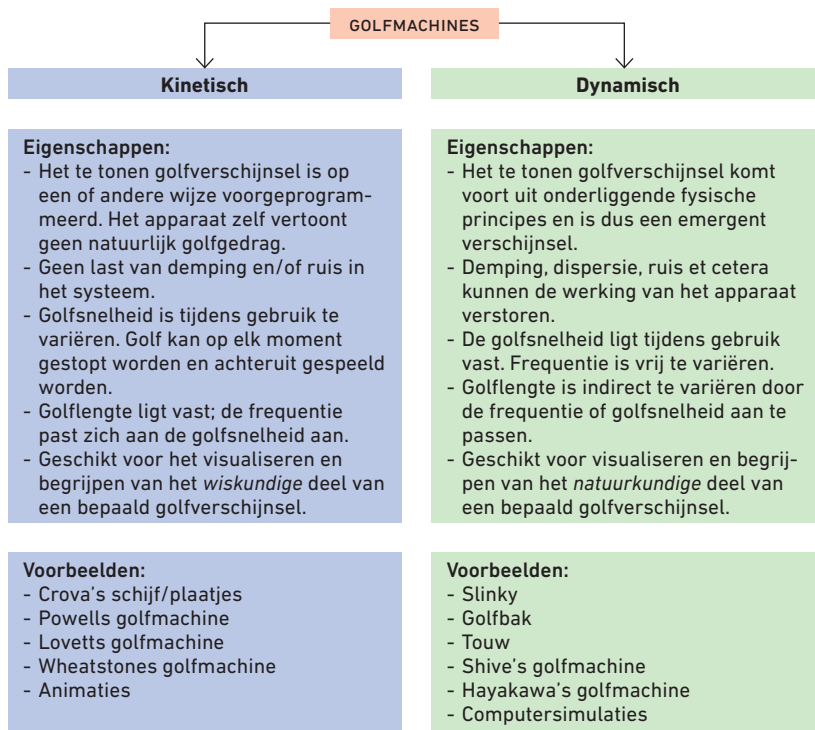
tisch medium waarin een trilling wordt doorgegeven. Hierdoor is de golf niet voorgeprogrammeerd maar een echt emergent verschijnsel.

Een ander bekend voorbeeld van een dynamische golfmachine is Shive's golfmachine [9]. Deze bestaat uit een lange horizontale as die kan torderen. Hierop zijn op vaste afstanden stokjes bevestigd. Aan beide uiteinden van elk stokje bevinden zich identieke gewichtjes (zie figuur 2a). Door het eerste stokje in harmonische trilling te brengen wordt, via de as, de draaibeweging van het stokje doorgegeven aan het volgende stokje. Op deze manier

ontstaat een transversale golf waarbij de golfsnelheid gegeven wordt door:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa}{i}} \quad (1)$$

met κ de torsieconstante keer meter golfmachine en i het traagheidsmoment per meter golfmachine. De golfsnelheid is eenvoudig aan te passen door de grootte van de massa's te veranderen of door de massa's op een andere positie op het stokje te plaatsen. In figuur 2b is een torderende golfmachine te zien waarin de tweede helft van de golfmachine een twee keer zo grote massa bevat als de eerste



Figuur 3. Schematisch overzicht van de twee soorten golfmachines.

helft. Hierdoor is de golfsnelheid in de tweede helft kleiner dan in de eerste helft, wat op het grenspunt leidt tot reflectie en transmissie van golven. Een golfmachine die hier enigszins op lijkt is die van K. Hayakawa [3] (zie figuur 2c). Hij omschreef in 1909 een opstelling waarmee longitudinale golven zichtbaar gemaakt konden worden. Qua opbouw lijkt deze machine op die van John Shive, echter wordt er hier gebruikgemaakt van stalen veren in plaats van een torderende as. Hierdoor slaan de stokjes uit in de voortplantingsrichting van de golf. De golfsnelheid wordt gegeven door:

$$v = \frac{rx_0}{R} \sqrt{\frac{k}{M}}, \quad (2)$$

met r de afstand vanaf de draaias tot de positie van de veer, R de afstand van de draaias tot de massa's, x_0 de afstand tussen twee opeenvolgende stokjes, k de veerconstante van een enkele veer en M de totale massa aan het uiteinde van een stokje. Door het traagheidsmoment te vergroten of de veren dichter bij de as te plaatsen kan de golfsnelheid behoorlijk gereduceerd worden. Hier-

door zijn ook longitudinale golfverschijnselen goed zichtbaar te maken.

Didactische overwegingen

In figuur 3 zijn de eigenschappen van kinetische en dynamische golfmachines schematisch samengevat. Deze eigenschappen bepalen in grote mate de toepasbaarheid bij het behandelen van bepaalde golfverschijnselen. Een demonstratie met een kinetische golfmachine blijkt een geschikte methode om de vorm en beweging van één bepaald type golf bij leerlingen te introduceren. Ze zijn dus met name geschikt om het wiskundige aspect van een golf te verduidelijken. Dynamische golfmachines zijn in principe veelzijdiger. Met één machine kunnen meestal meerdere verschillende golfverschijnselen worden getoond. Maar doordat het een echt elastisch systeem betreft zijn die machines ook gevoeliger voor verstoringen en demping en kan door dispersie de golf enigszins vervormen. Bij de introductie van een bepaalde golfbeweging kunnen dit allemaal complicerende factoren zijn. Maar als de visualisatie bij de leerling

reeds bekend is dan biedt een dynamische golfmachine meer mogelijkheden. Zo kunnen we met een dynamische golfmachine duidelijk demonstreren dat de golf lengte afneemt als we de frequentie verhogen. Een kinetische golfmachine is daar niet voor geschikt. Het onderscheid tussen kinetische en dynamische varianten is overigens ook van toepassing op digitale modellen waarin golfverschijnselen worden gevisualiseerd. Zo vertonen animaties van golven (zoals filmpjes) dezelfde eigenschappen als de kinetische golfmachines. Computersimulaties, waarin een elastisch medium wordt gesimuleerd, hebben juist dezelfde eigenschappen als dynamische golfmachines. De hier besproken didactiek is daarom ook bruikbaar bij de inzet van digitale modellen van golfverschijnselen.

Tot slot

Ondanks de voordelen van animaties en computersimulaties verdienen ook de hier behandelde golfmachines nog steeds een plek in het hedendaags onderwijs. Dynamische golfmachines tonen namelijk als enige natuurlijk opgewekte golfverschijnselen in de praktijk. En als we de verschillende kinetische golfmachines bekijken dan kunnen we toch alleen maar onder de indruk zijn van de creativiteit en het technisch inzicht van de uitvinders? Hoe mooi zou het zijn als we ook dit aspect met onze leerlingen en studenten kunnen delen!

REFERENTIES

- 1 T.B. Greenslade Jr., Apparatus for natural philosophy; 19th century wave machines, *Phys. Teach.* **18**, 510 (1980).
- 2 A.P. Carman, A wave machine, *Phys. Rev. (Series I)* **19**, 171 (1904).
- 3 K. Hayakawa, A new model for illustrating wave motions, *Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc.* **5**, 96 (1909).
- 4 Whipple Museum of the History of Science, University of Cambridge, Wave Machines, www.whipplemuseum.cam.ac.uk/explore-whipple-collections/models/wave-machines.
- 5 UtiMaker Thingiverse, www.thingiverse.com/thing:1641728 en www.thingiverse.com/thing:2705480.
- 6 R.B. Hastings, Crova's Disc a way to make sound waves "visible", *Sci. Act.* **18**(1), 14-16 (1981).
- 7 R. Rikken, Klassieke visualisaties van longitudinale golfverschijnselen, *NVOX* **49**(6), 10-12 (2024).
- 8 W.J. Lovett, A simple wave-motion apparatus, *Nature* **16**, 83 (1877).
- 9 AT&T Tech Channel, AT&T Archives: Similarities of Wave Behavior (Bonus Edition), www.youtube.com/watch?v=DovunOxY1k&t=931s&ab_channel=AT%26T%20TechChannel.