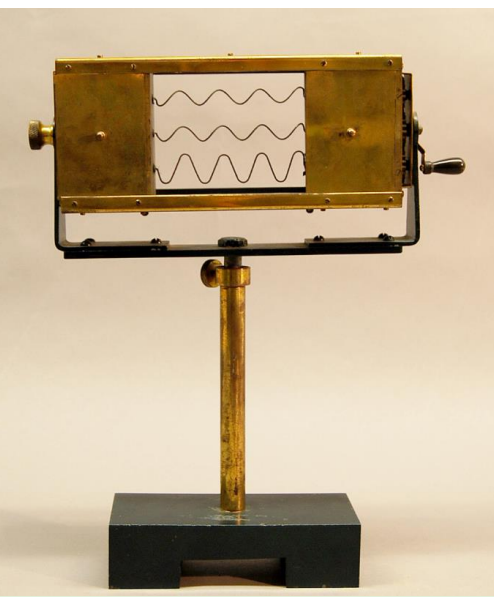
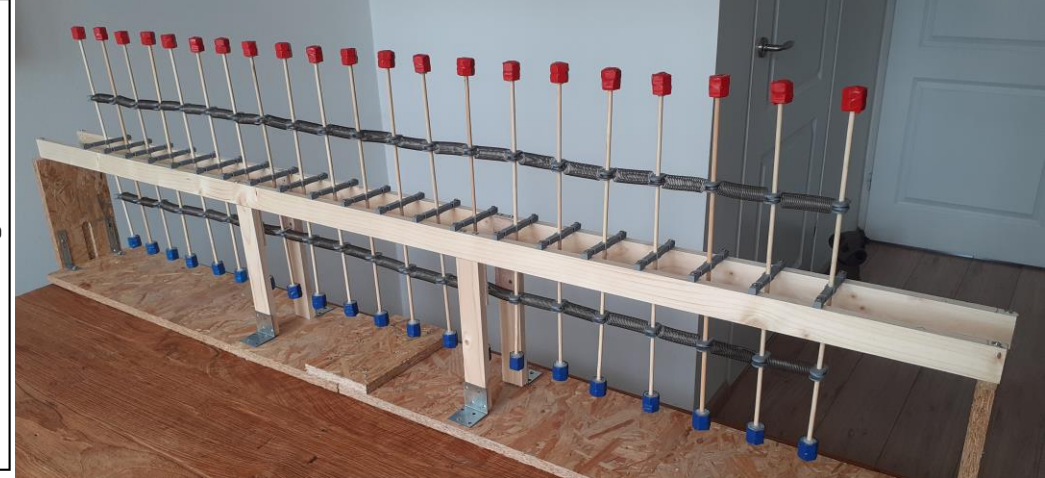
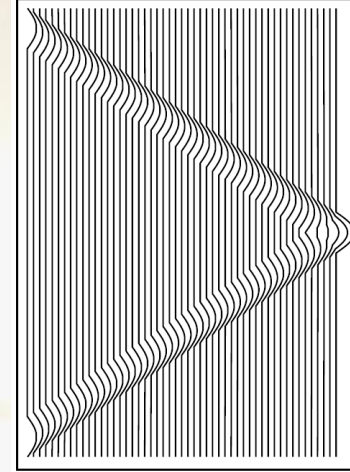
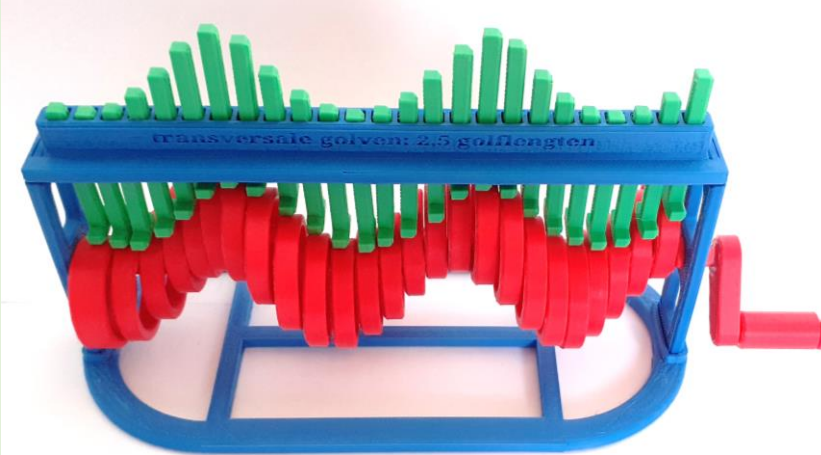


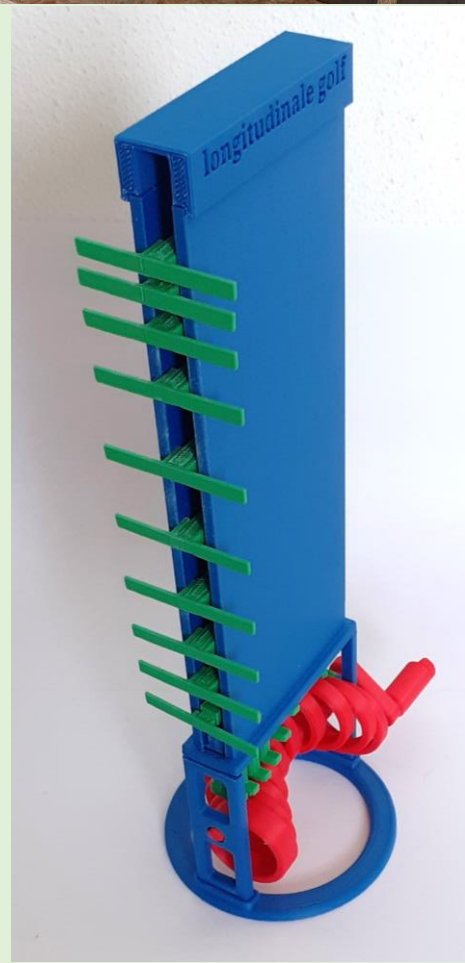


# De didactiek van golfmachines

WND

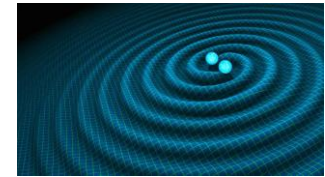
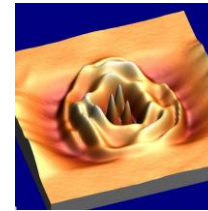
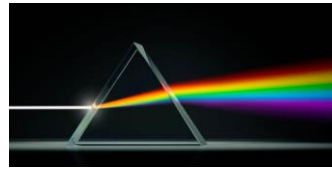
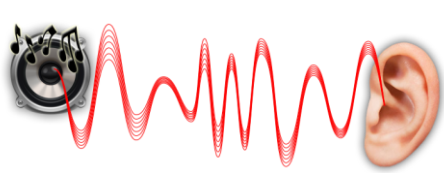
13 en 14 december 2024

Roger Rikken  
roger.rikken@han.nl



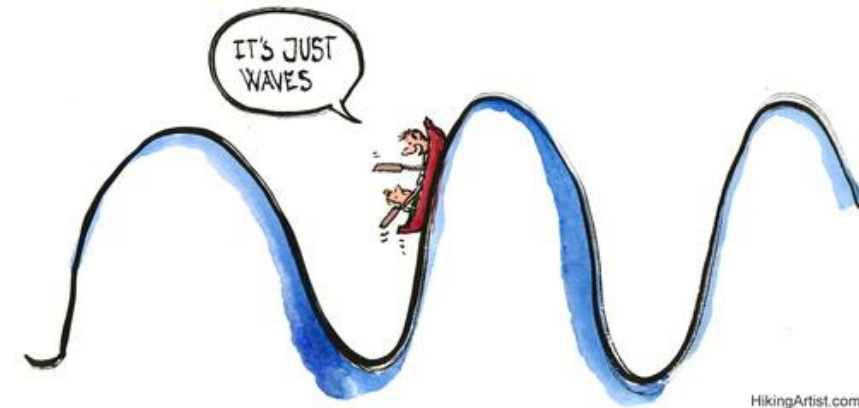
# Waarom een workshop over Golven?

Eerst de vraag stellen: *Waarom leren we onze leerlingen eigenlijk over golven?*



Veel verschijnselen laten zich verklaren door de golftheorie.  
Begrip van golven leidt tot begrip van deze verschijnselen.

*Leerlingen (en studenten!) vinden trillingen en golven vaak een lastig onderwerp. Veelgehoorde 'klachten' zijn dat het abstract is en wiskundig moeilijk is. Met name longitudinale golfverschijnselen zijn lastig te visualiseren*



*Wat kunnen we daaraan doen?*

# Vandaag

- Voorbeelden van verschillende manieren om golfverschijnselen zichtbaar te maken.
- Aandacht voor verschillende 'golfmachines' en de manier waarop je deze kunt inzetten

## **Doel:**

- Ideeën opdoen voor de eigen lespraktijk.
- Bewust worden van de (on)geschiktheid van verschillende methoden bij de uitleg van bepaalde golfverschijnselen.

# Welke golfverschijnselen kennen we?

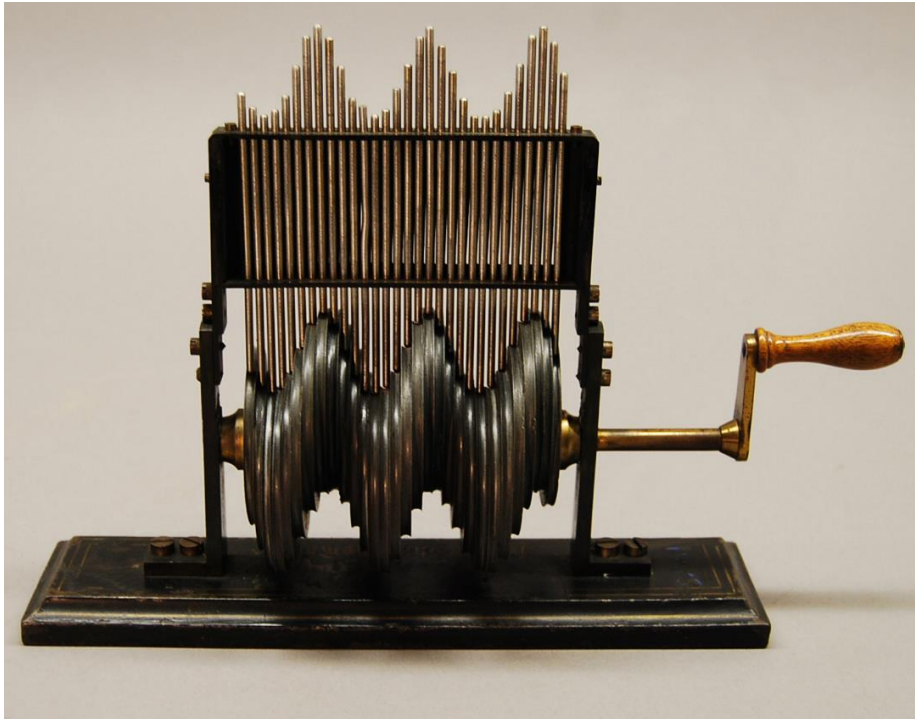
**Algemene verschijnselen:** Een niet-toevallige waarneembare gebeurtenis die zich in een bepaalde situatie voordoet.

Sommige daarvan *zijn* golfverschijnselen of zijn *te begrijpen via* golfverschijnselen.

**Golfverschijnselen:** alle verschijnselen die kenmerkend zijn voor systemen die golfgedrag vertonen:

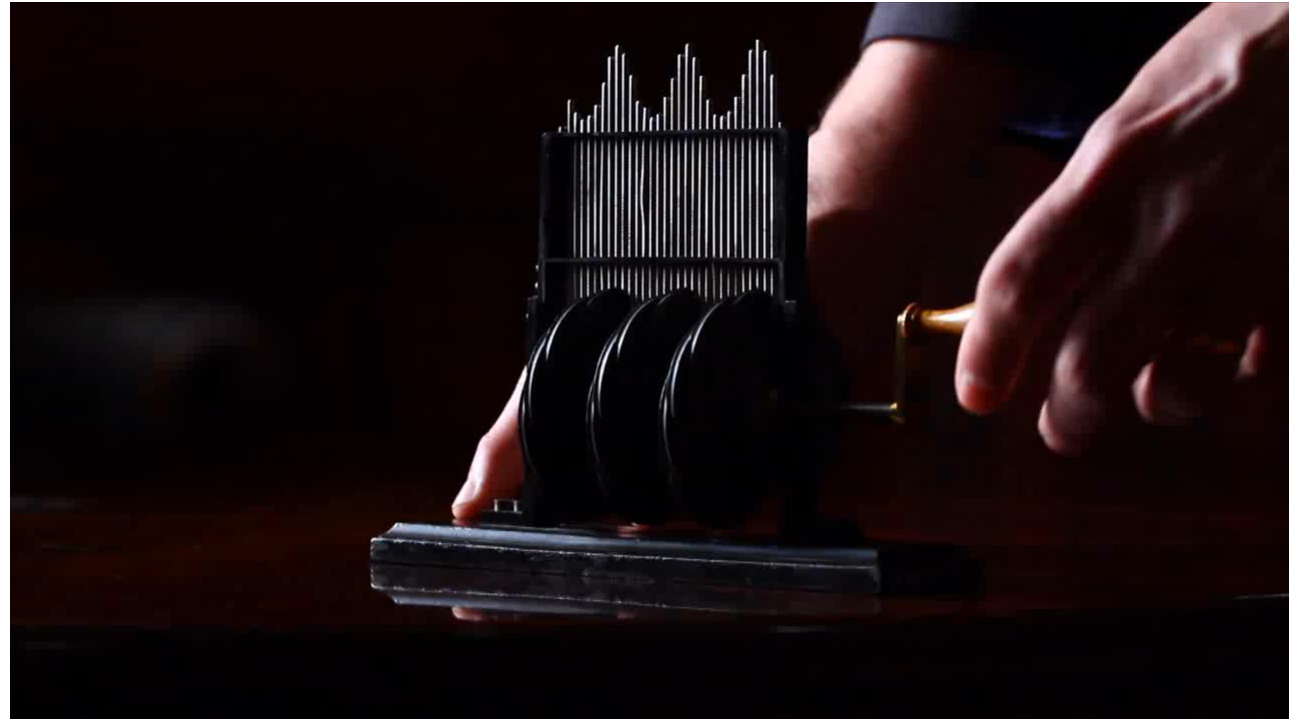
- *Reflectie*
- *Breking*
- *Superpositie*
- *Buiging*
- *Interferentie*
- *Polarisatie (transversale golven)*
- *Fase-omslag*

# Mechanische golfmachines



[Smithsonian - Wave Machines \(si.edu\)](http://si.edu)

Powell's wave machine

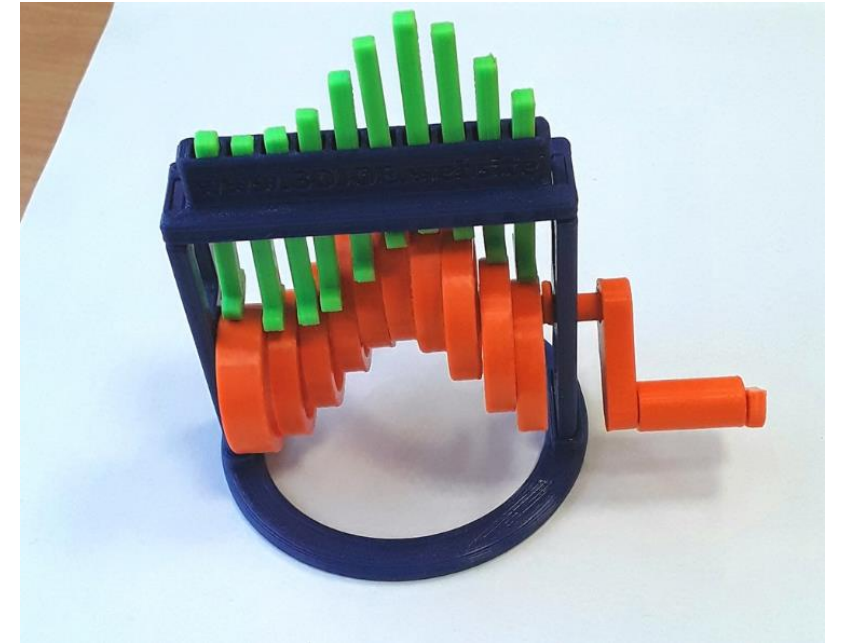
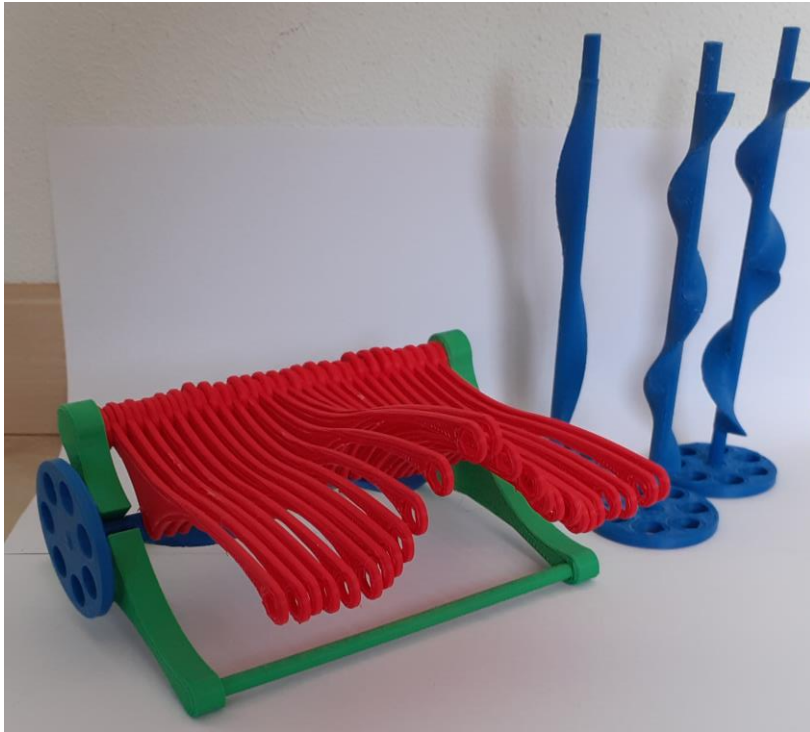


*Wat verandert er allemaal als je sneller gaat draaien?  
Is dat fysisch realistisch?*



# Mechanische golfmachine met 3D printer

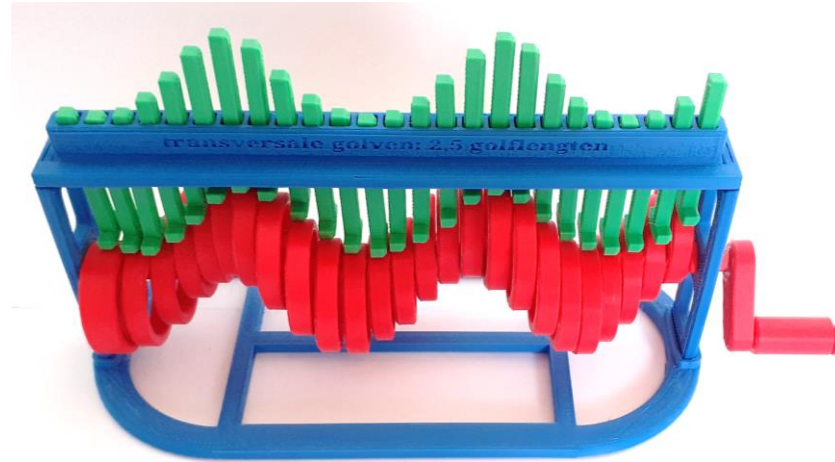
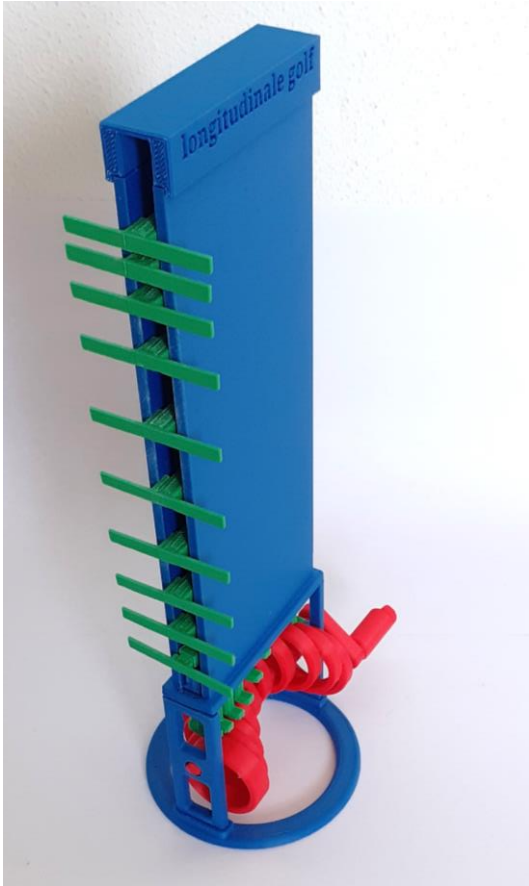
[Simple wave machine - cam based by calebkraft - Thingiverse](#)



[Sine Wave Toy 10-Pin - Less Jamming by Losik - Thingiverse](#)

Powell's wave machine

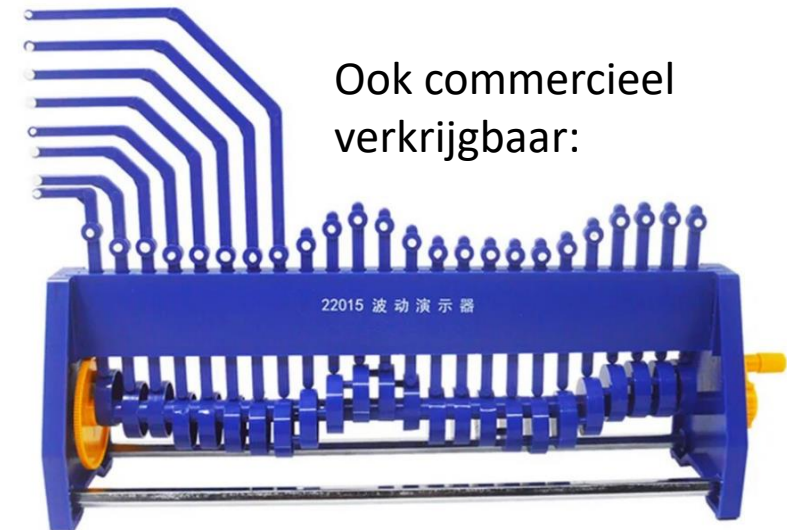
# Aangepaste 3D prints



Bestanden van de 3D prints kun je via de qr-code downloaden:

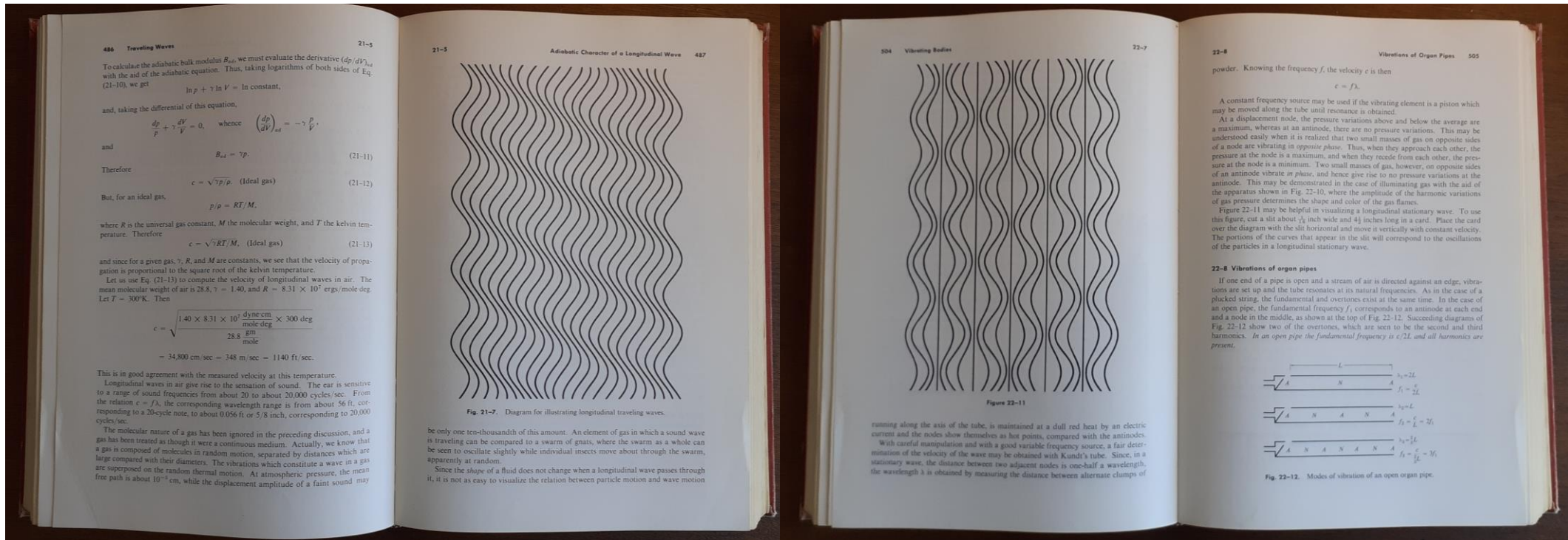


Geschikt bij introductie van golven. Wat is een golf?  
Onderscheid beweging individuele deeltjes en beweging golf.



Ook commercieel verkrijgbaar:

# Visualisaties van vóór het computertijdperk

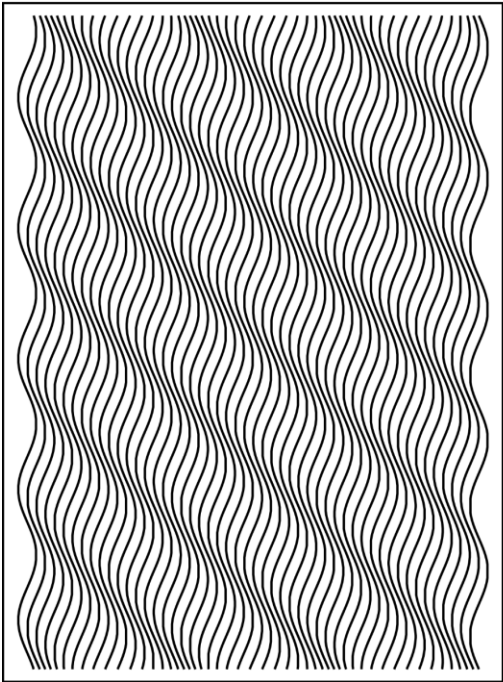


Visualisatie voor lopende golven en staande golven. Uit: Sears, F.W. & Zemansky, M.W. *University Physics, 3th Ed.* (1964)

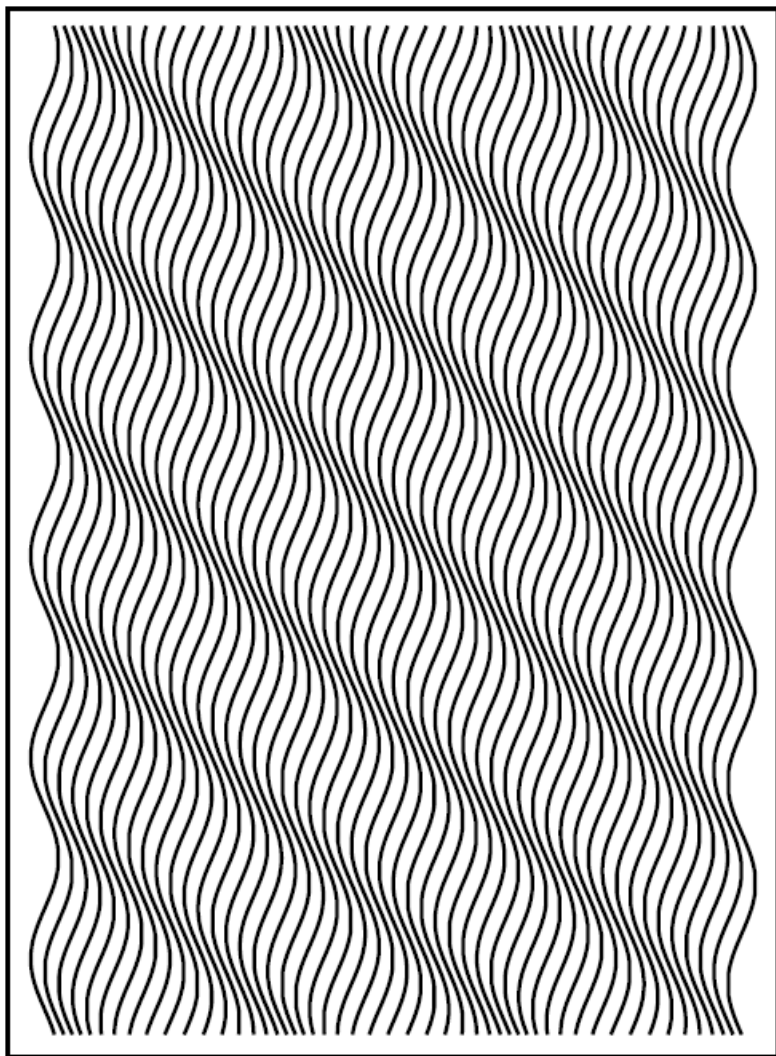


# Hoe bekijk je ze?

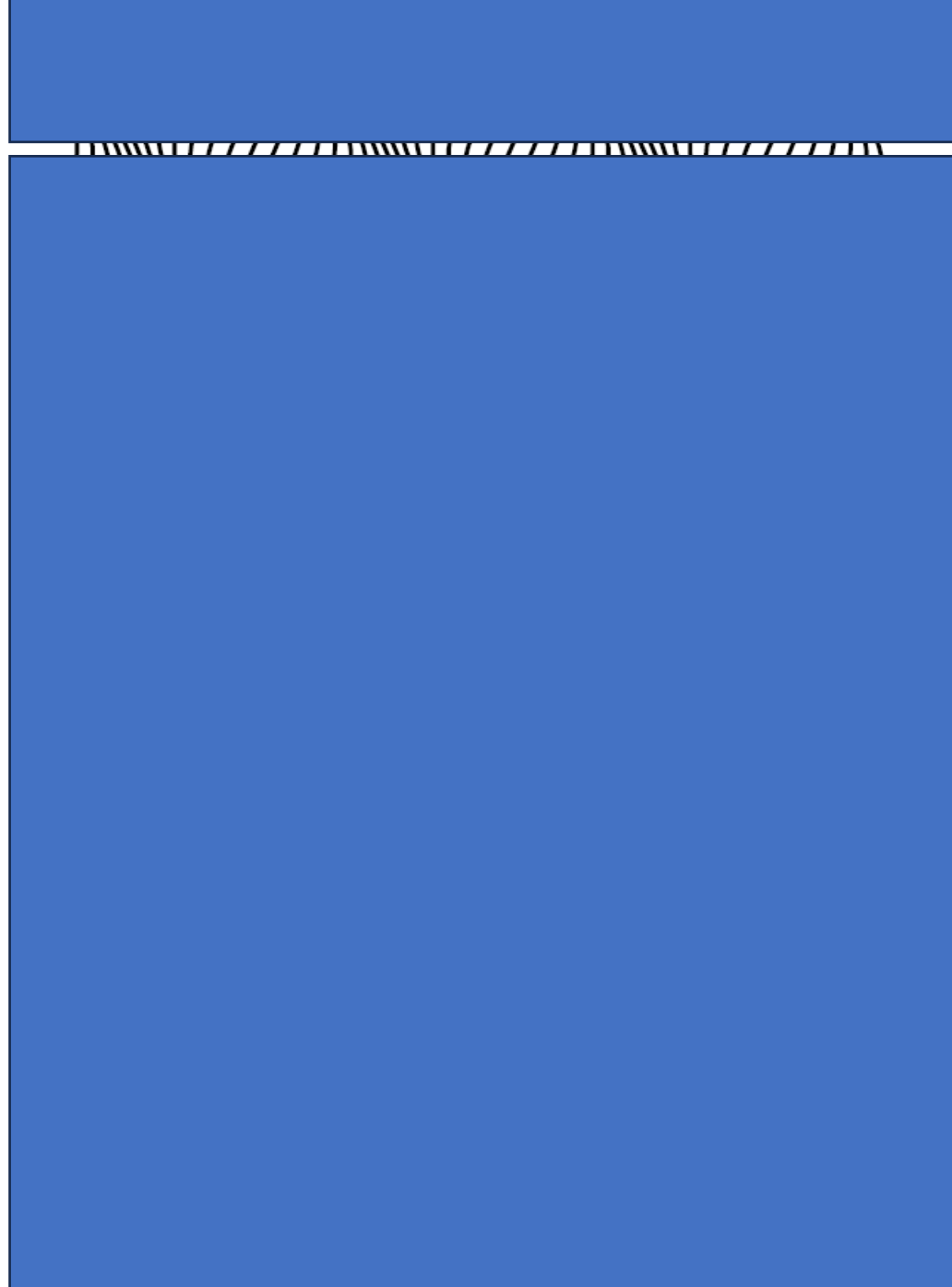
a.



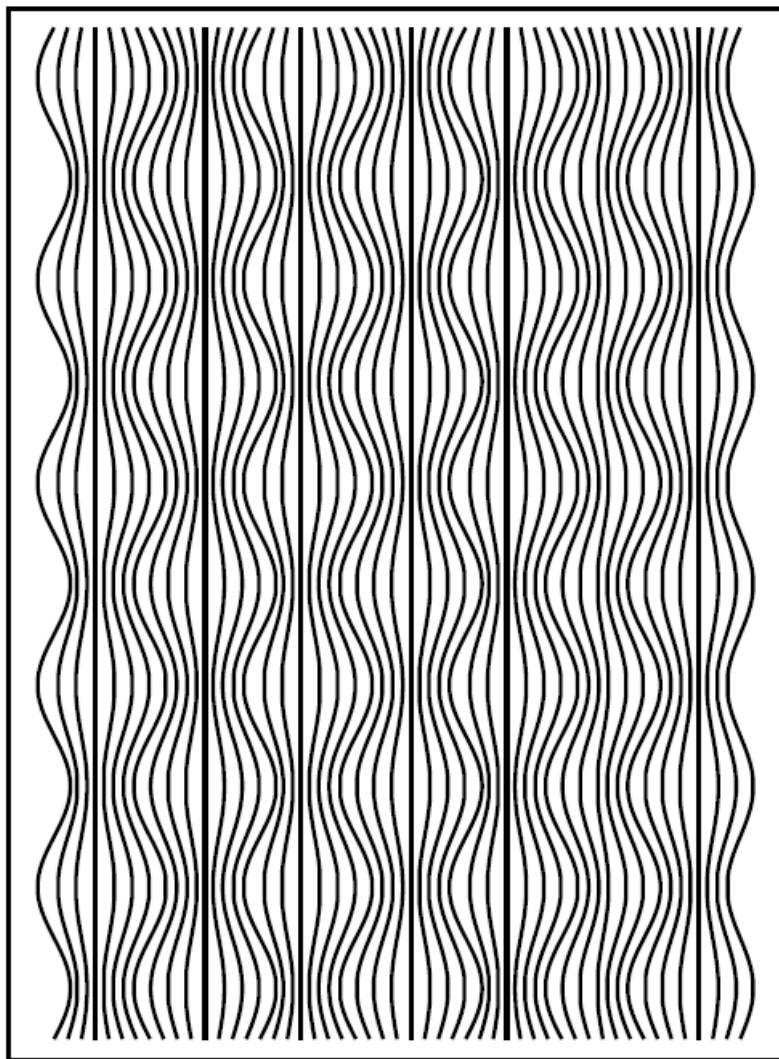
**1**



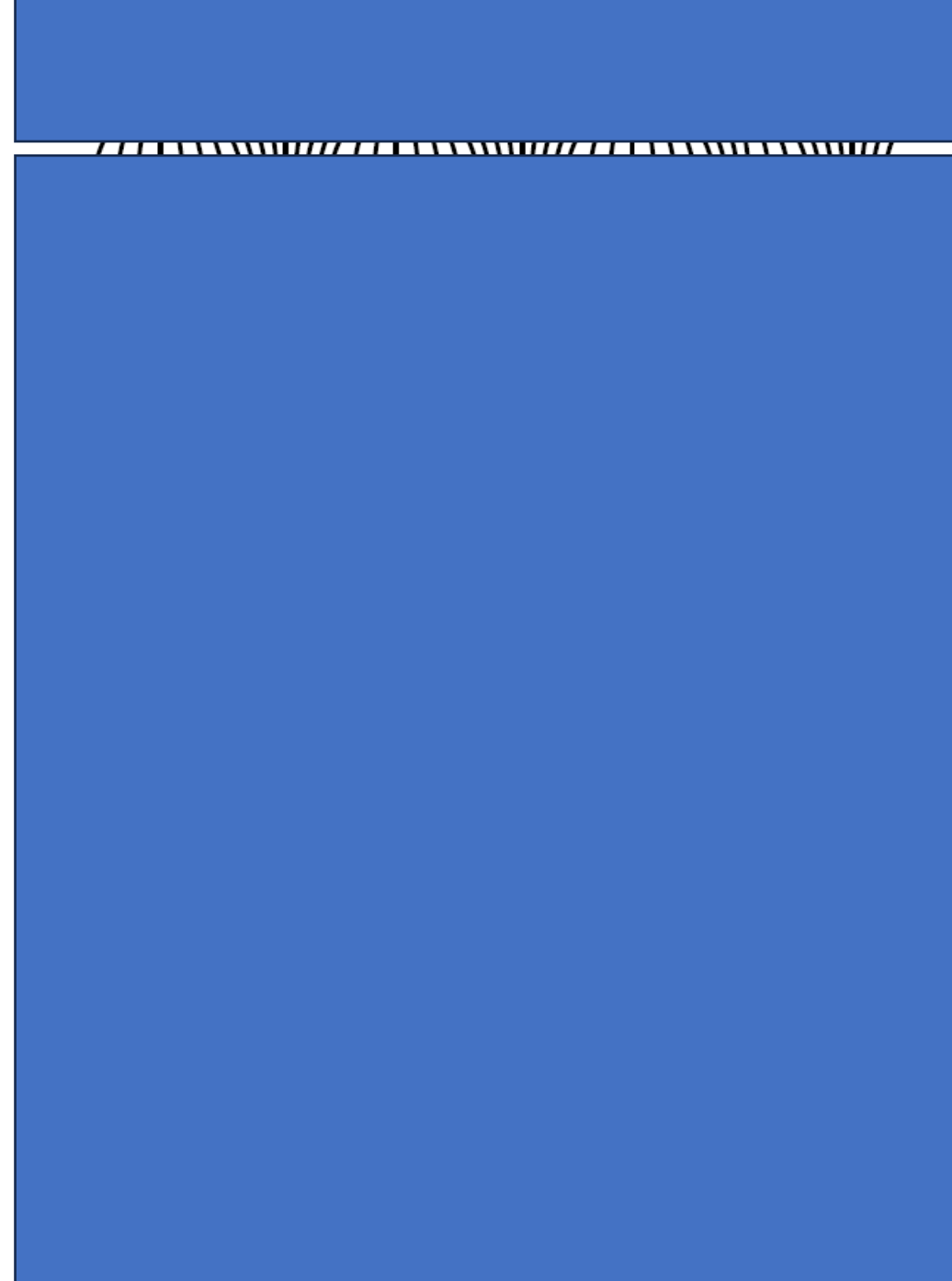
**Lopende golf**



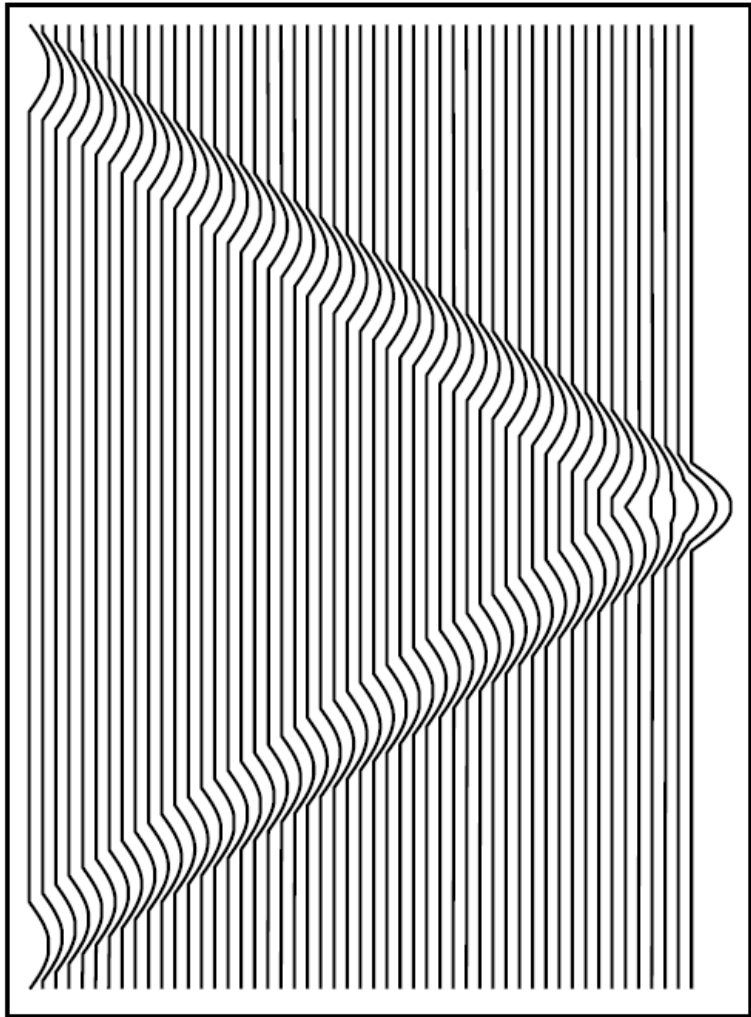
2



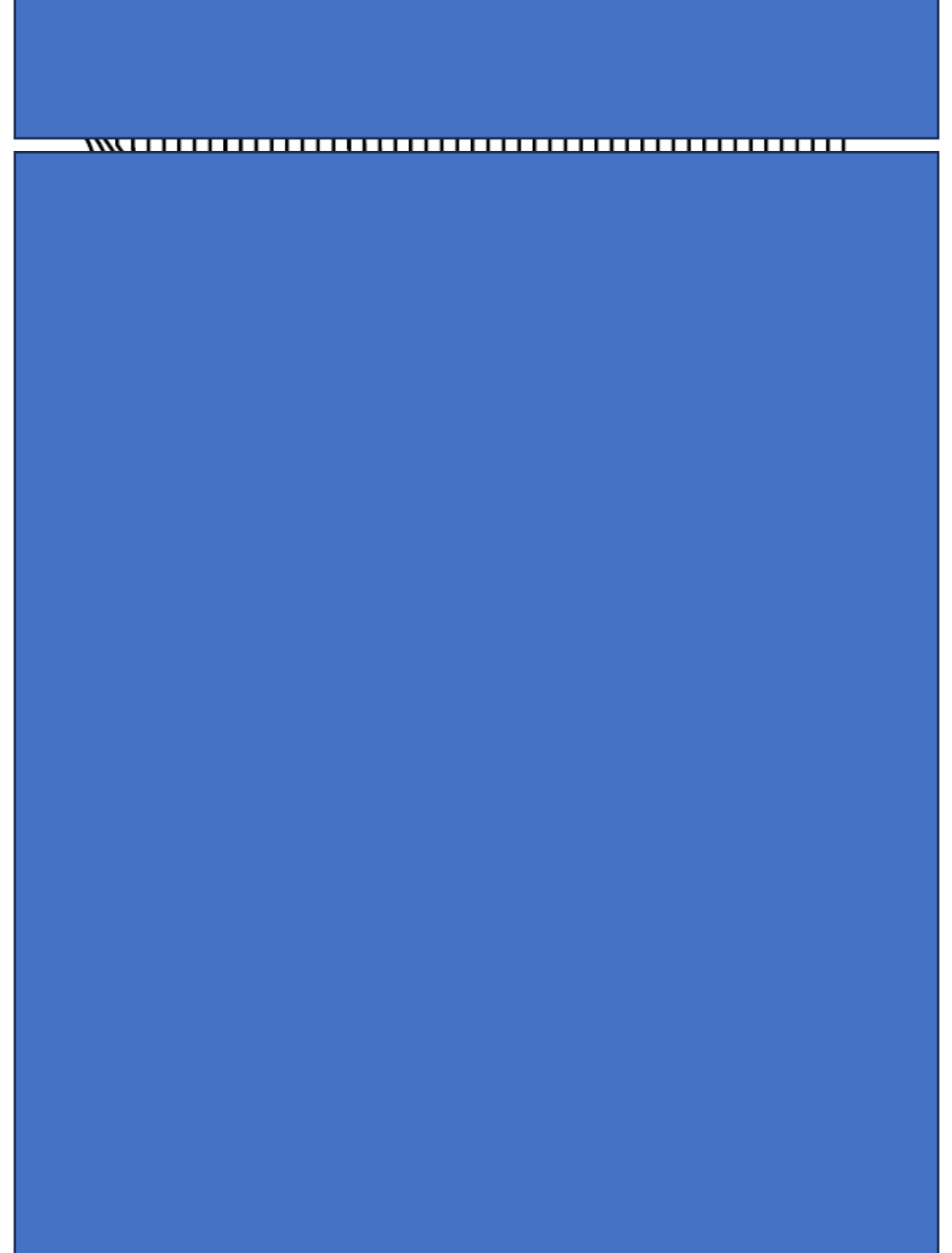
Staande golf



3

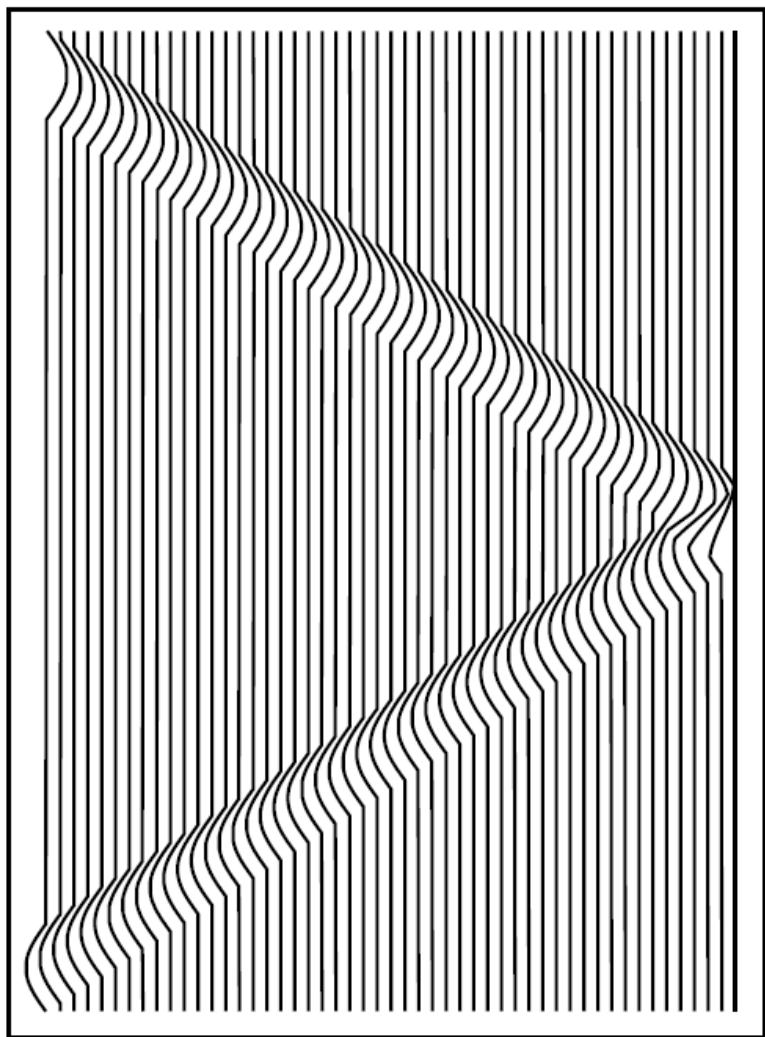


Puls in medium met los uiteinde

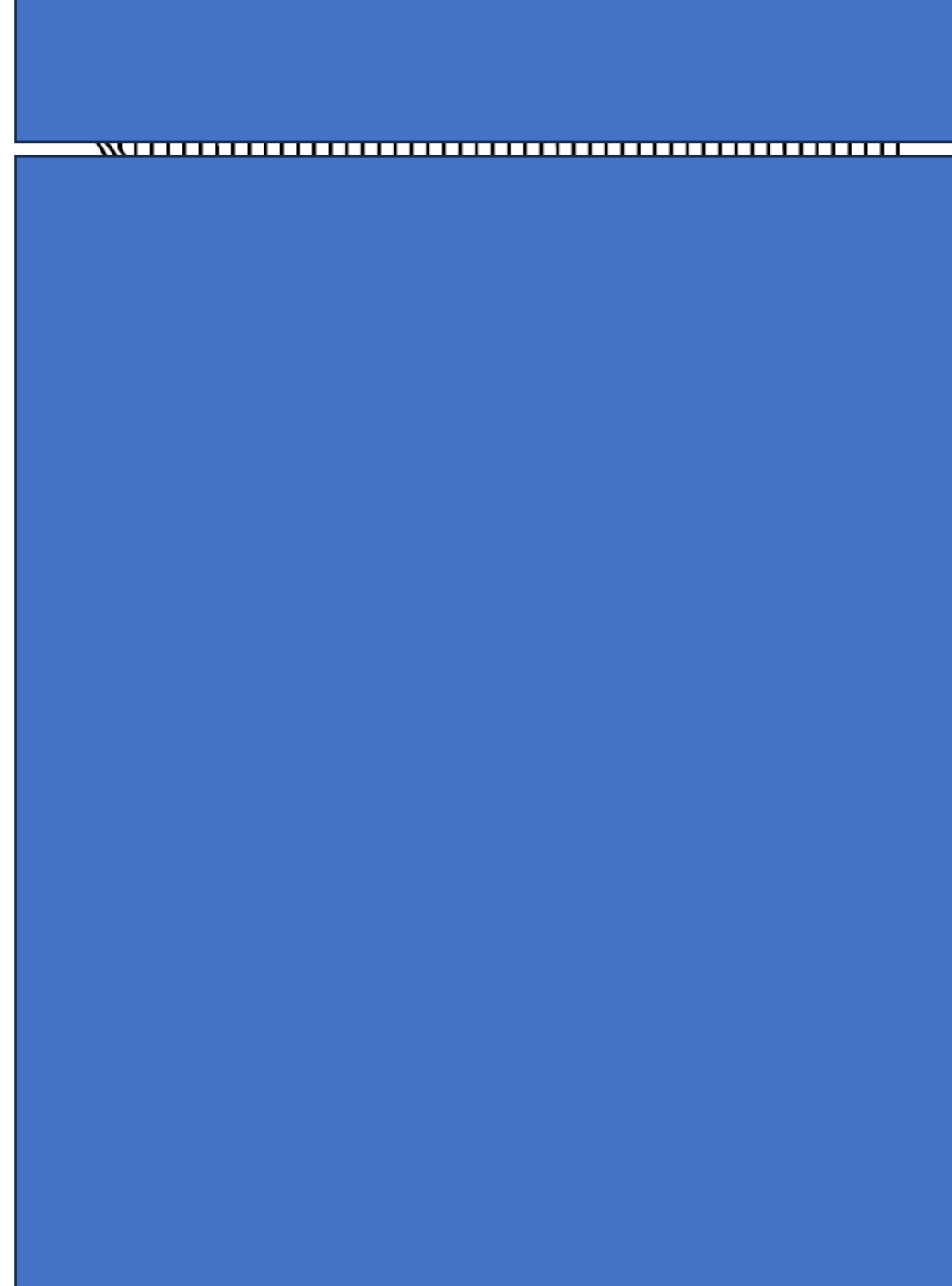




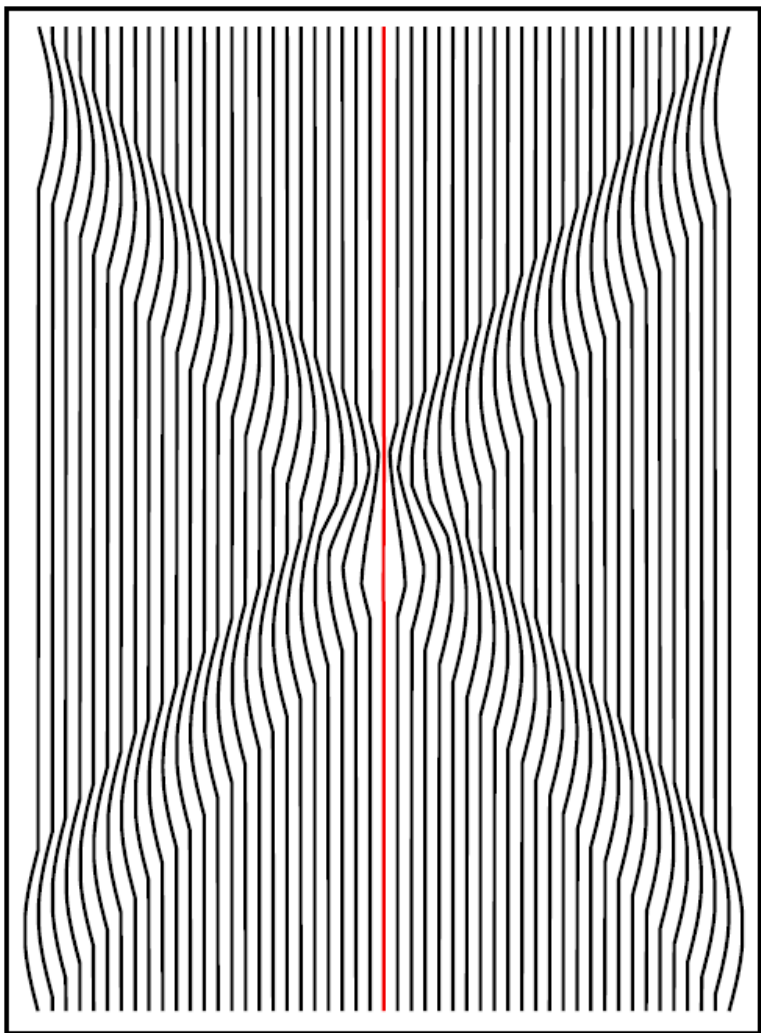
4



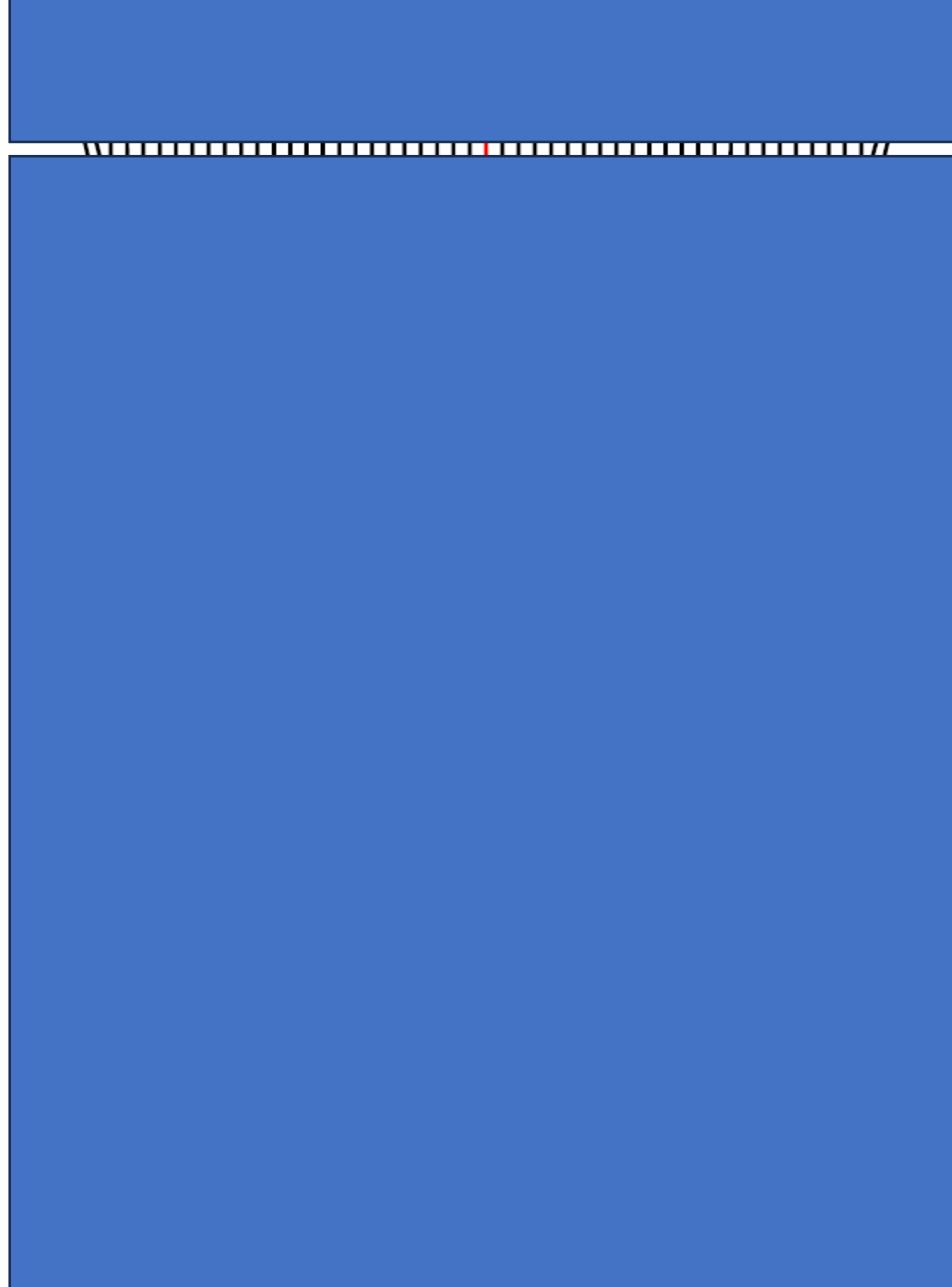
**Puls in medium met vast uiteinde**



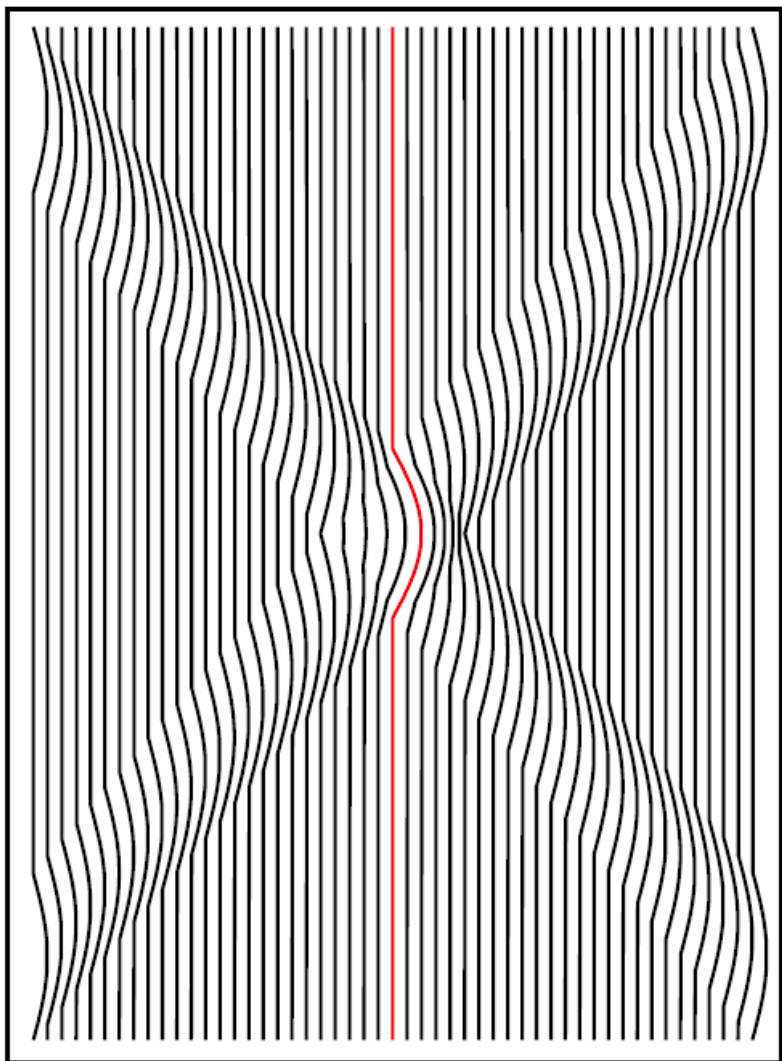
5



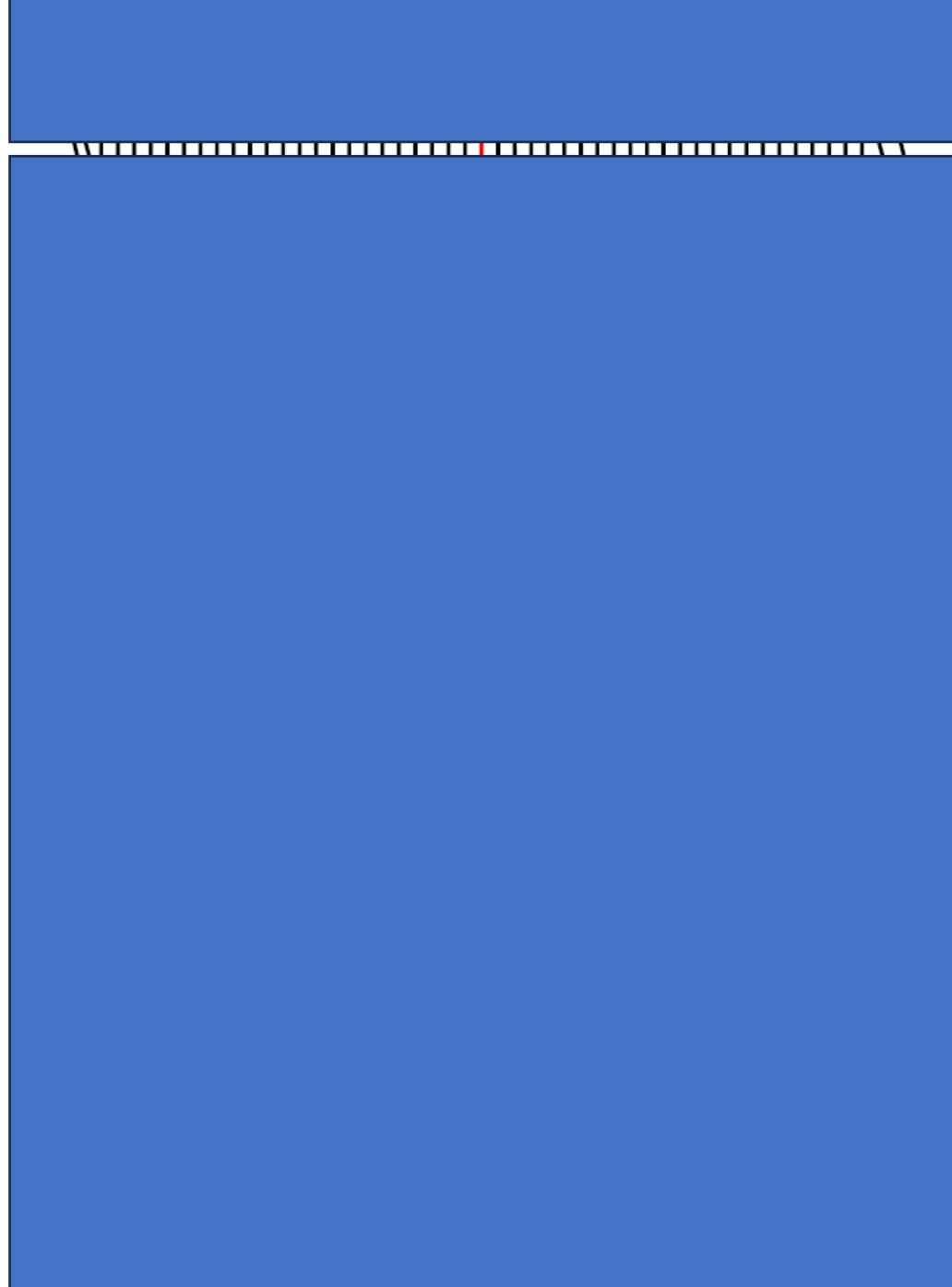
**Twee pulsen in tegengestelde richting die  
elkaar in het midden opheffen**



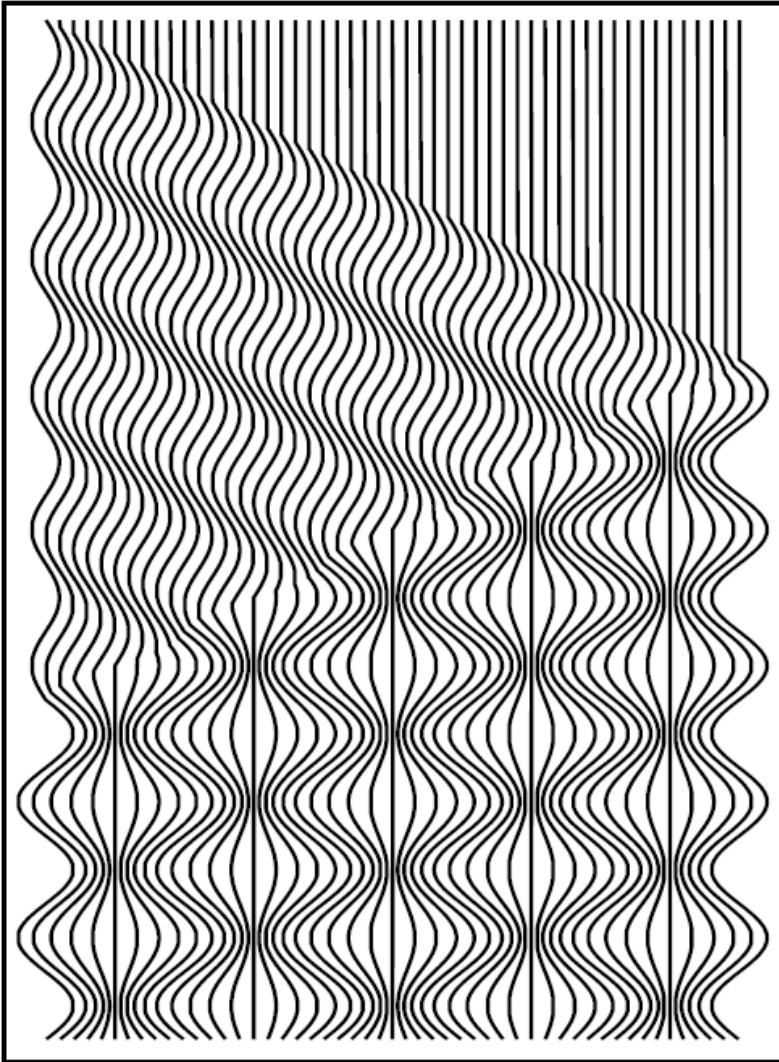
6



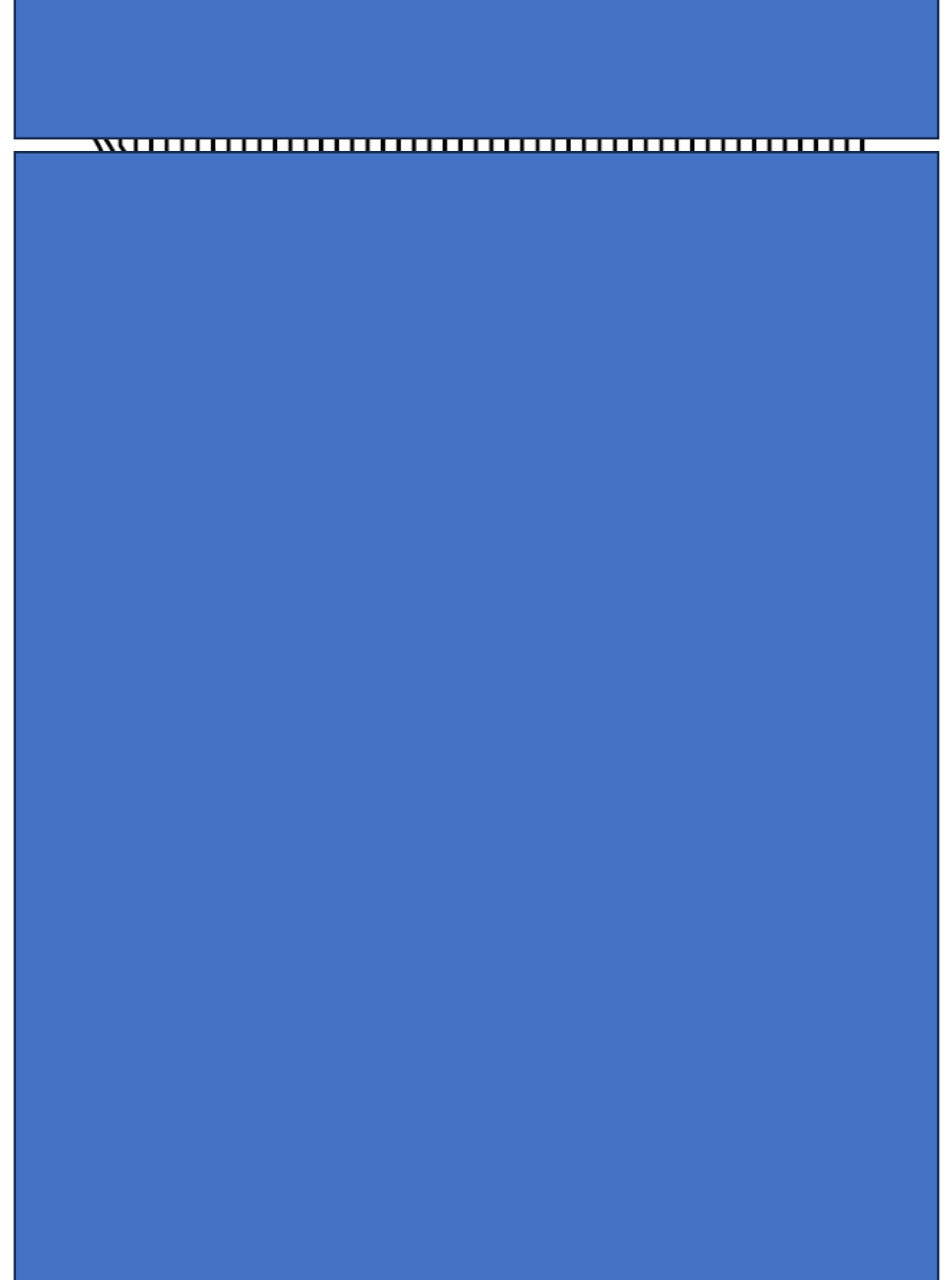
**Twee pulsen in tegengestelde richting die  
elkaar in het midden versterken**



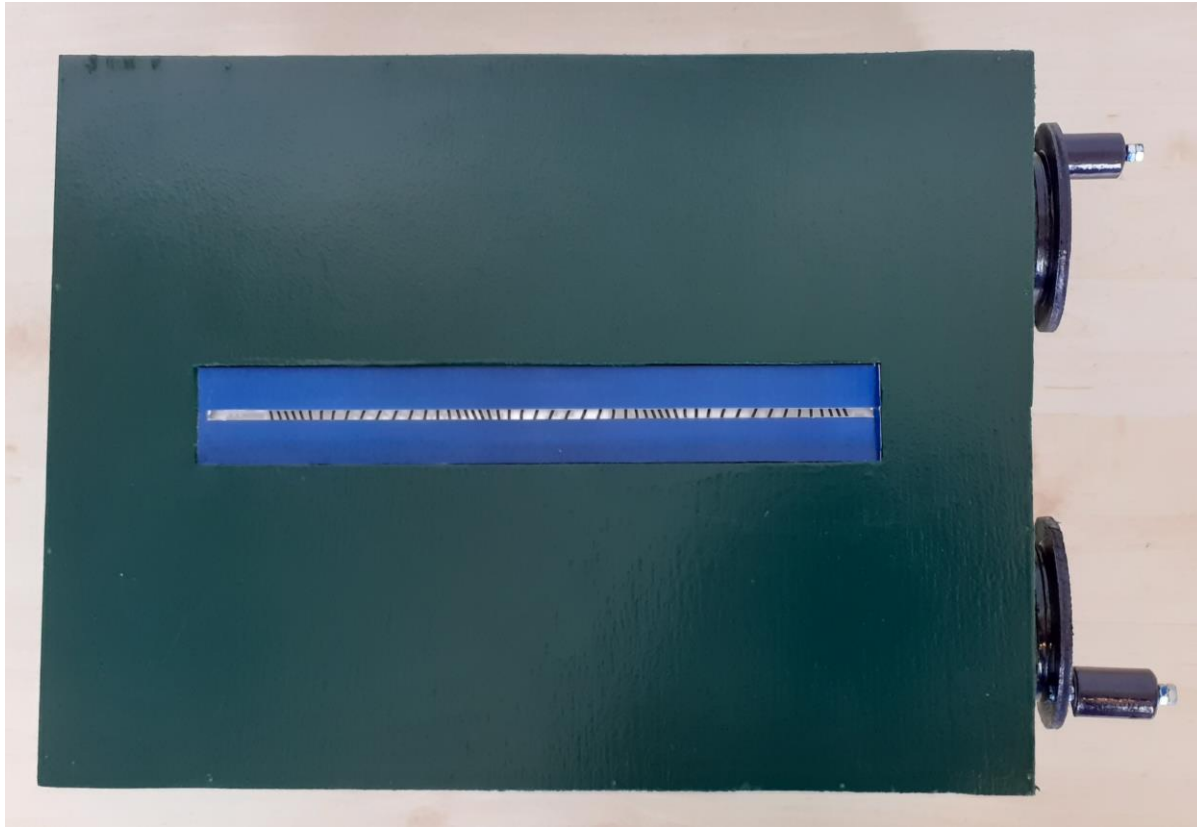
7



Ontstaan van een staande golf door  
reflectie van een lopende golf.



# De zeven kaarten in een draaibak

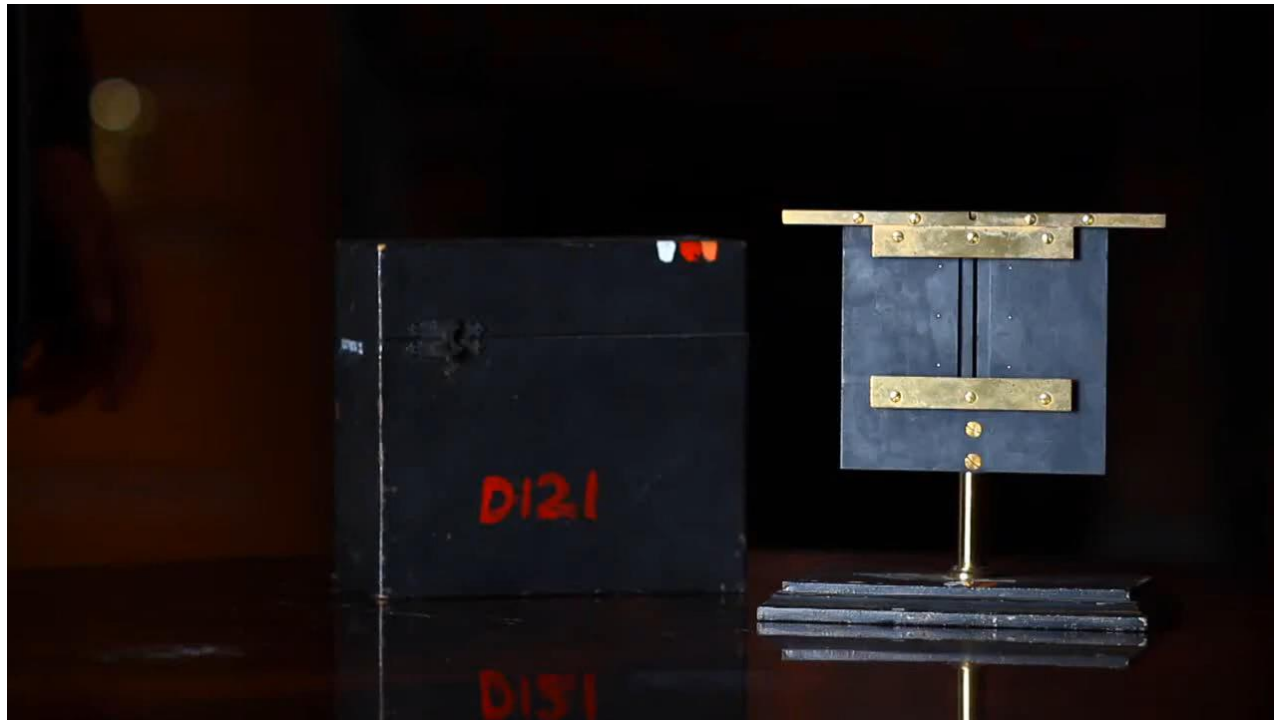


De zeven kaarten in een mechanische draaibak *à la* Crova



# Crova's schijf

Stamt al uit de 19<sup>e</sup> eeuw: ontwikkeld door Franse natuurkunde professor André Crova in 1867



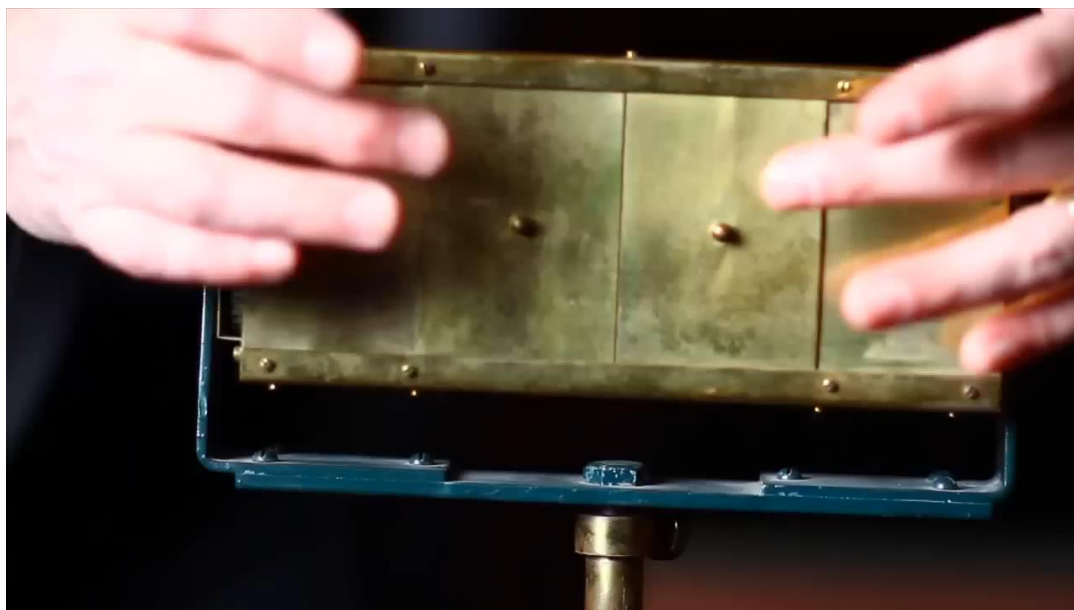
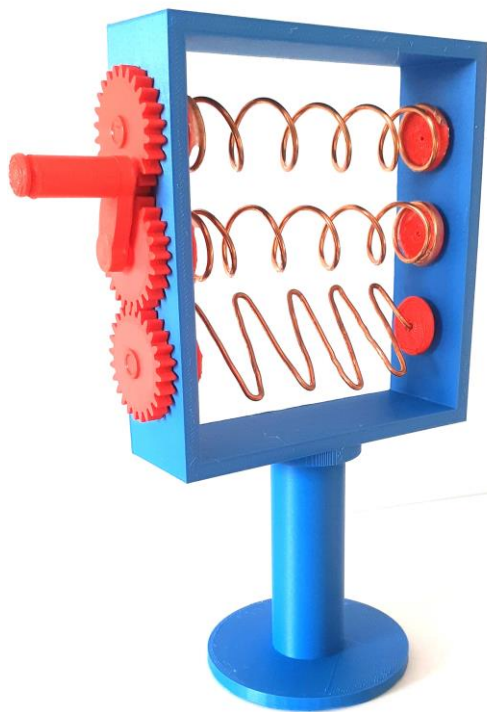
# Andere versie van de Crova's Disc



[Crova Disk by Max Kohl and Kipp & sons, C 1900. \(vanleestantiques.com\)](http://vanleestantiques.com)



# Golfmachine van Lovett

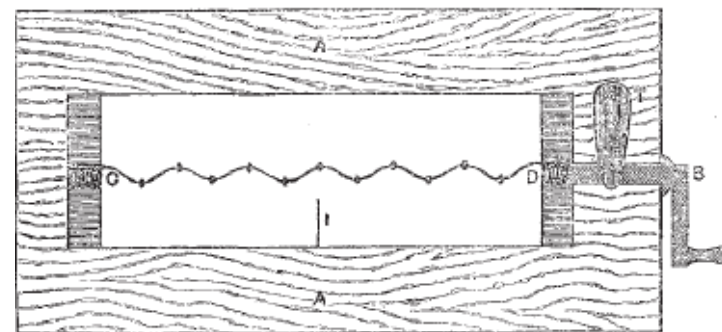


*Wiskundige verband tussen lopende en staande golven*

## A Simple Wave-Motion Apparatus

It has been suggested to me that I should publish a description of a simple and portable wave-motion apparatus, devised by me a year or two ago, which has given satisfactory results to others as well as to myself. I therefore send the description.

In the figure A A represents an ordinary wooden lantern slide, with a rectangular aperture, which may vary in size according to the size of the lantern condensers, the sketch being half size for 4-inch condensers. A small winch, B, is fitted into the slide at one end of the aperture, and held in its place by the tongue, T. The spindle, B D, is milled or otherwise roughened near the end, D. A brass stud similar in shape to the milled end of the spindle, but *smooth* and slightly smaller, is fixed in the opposite side of the aperture at C. A helix of 25-gauge hard brass wire is wound on a spit of the same size as the smooth stud, taking care to wind the coils close together; about fifteen turns of the helix are cut off, and the middle five turns drawn out till they form a perfect wave similar to the figure when held up to the light. The length of the helix should then be the same as C D. One end of the helix is pushed tight on the milled end, D, and the other end is slipped loosely over the stud, C, so as to work



on it like a swivel, to keep the end of the helix true when the winch is turned. A little bead of wax is melted on each crest and hollow of the wave to represent particles, and the essential parts of the apparatus are complete. On placing it in front of the lantern, and focussing, a distinct and striking image of a moving wave with its vibrating particles is produced by turning the winch.

If the helix is not perfectly straight the image of the wave will rise up and down more or less as a whole; the helix should then be straightened or "set" with the fingers till true. When once set thin glass plates may be placed on each side to protect it from injury. An index, I, of wire, may be fixed so as to give a means of proving that the particles *only* move up and down.

A modification I have tried by using a dark wire with bright silver beads, on a velvet back-ground in the aphe gescope, is more difficult to make and use. I therefore prefer the apparatus as sketched above.

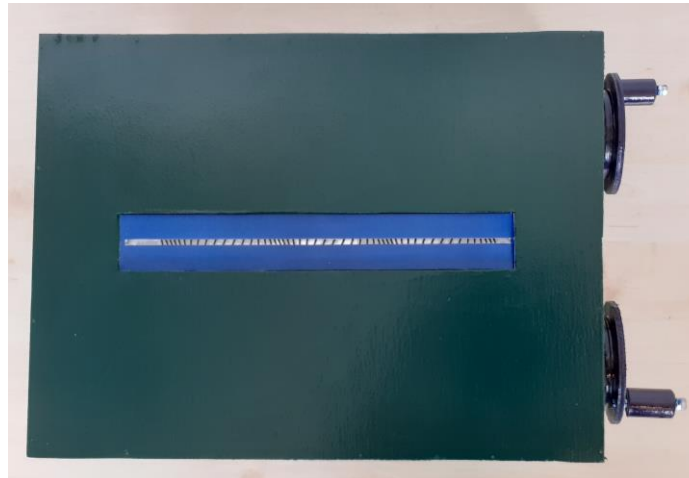
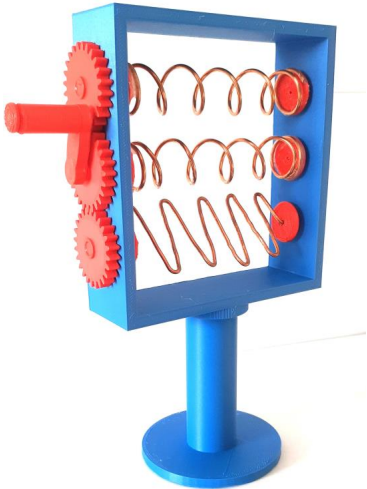
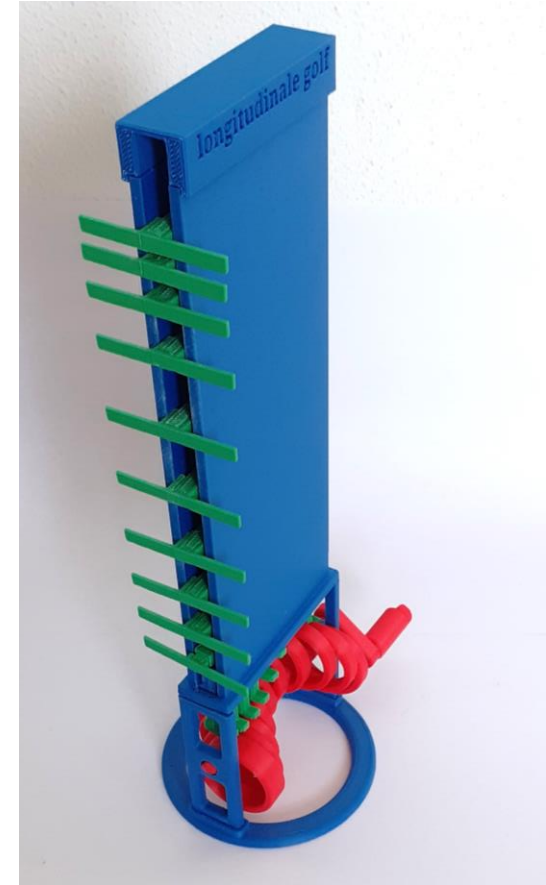
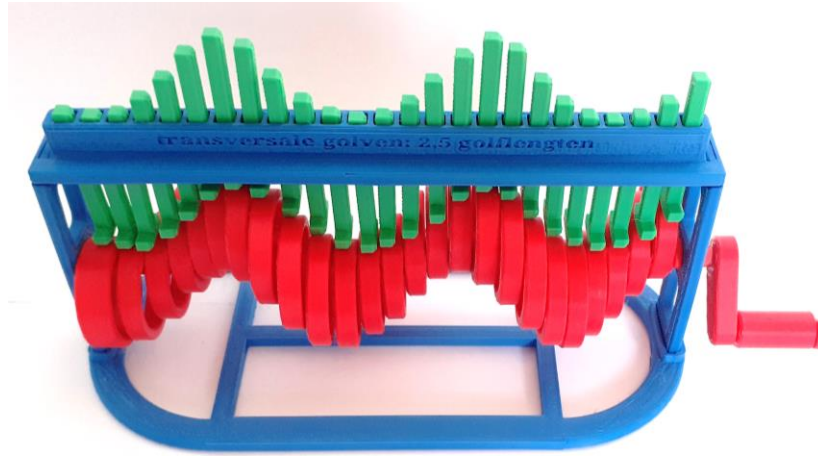
Of course the amount of finish depends on the taste of the user, &c. A pasteboard frame instead of mahogany, a wire bent twice at right angles instead of a finished brass winch, and tied to the frame by two bits of wire instead of let in, &c., may be used, thus reducing the cost to a few halfpence.

In use it will recommend itself.

W. JESSE LOVETT

Birmingham

# Wat hebben deze voorbeelden allemaal gemeen?



# Wat valt op aan de voorbeelden die we tot nu toe hebben gezien?

- Zijn allemaal 'voorgeprogrammeerd' om een bepaalde vorm (en verschijnsel) van een golf weer te geven.
- De getoonde golfmachines vertonen geen natuurlijk golfgedrag. Het is alleen een weergave.
- Je krijgt alleen terug wat je erin stopt. '*Programmeer*' je een lopende golf dan krijg je er ook alleen een lopende golf uit.



# Kinetische golfmachines

## Voordelen:

- Kinetische golfmachines zijn met name interessant voor het visualiseren en begrijpen van de (wiskundige) vorm van een transversale golf en een longitudinale golf.
- Snelheid golfbeweging instelbaar. Golf kan worden stilgezet en teruggespeeld.
- Golf met discrete elementen toont duidelijk dat deeltjes niet met de golf meebewegen.

## Nadelen:

- Zeer ongeschikt om het verband  $v = \lambda \cdot f$  mee uit te leggen. Zowel  $v$  als  $f$  veranderen tegelijk, maar  $\lambda$  blijft constant. Voldoet aan  $v = \lambda \cdot f$  maar is niet fysisch relevant.
- Geeft geen inzicht in de fysische oorsprong van een golf (de trilling).
- Is vaak *geprogrammeerd* om maar één type golf te laten zien en toont niet het volledige palet aan golfverschijnselen.

# Dynamische golfmachines

*Wat zouden dat zijn?*

We gaan een aantal voorbeelden bekijken.

# Slinkie

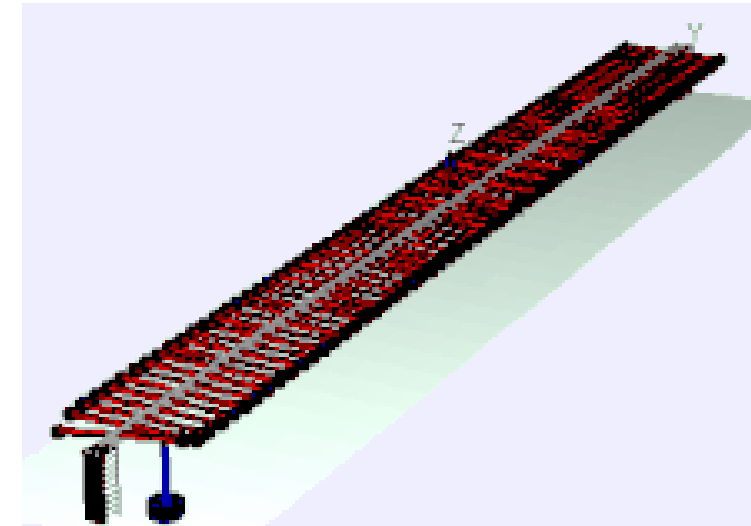
- Eenvoudig systeem (1 object)
- Zowel transversaal als longitudinale golven kunnen worden gedemonstreerd.
- Lage golfsnelheid
- Ontstaan van staande golf goed zichtbaar.
- Reflectie bij open en vast uiteinde heel mooi zichtbaar.



# Shive's wavemachine



Gepresenteerd in 1959 door John Shive  
[AT&T Archives: Similarities of Wave Behavior \(Bonus Edition\)](#)  
[\(youtube.com\)](#)



$$v = \sqrt{\frac{\kappa}{i}}$$

Met  $\kappa$  de torsieconstante van een eenheidslengte wavemachine.

En  $i$  het traagheidsmoment per eenheidslengte wavemachine.

Voor een puntmassa geldt voor het traagheidsmoment:  $I = mr^2$



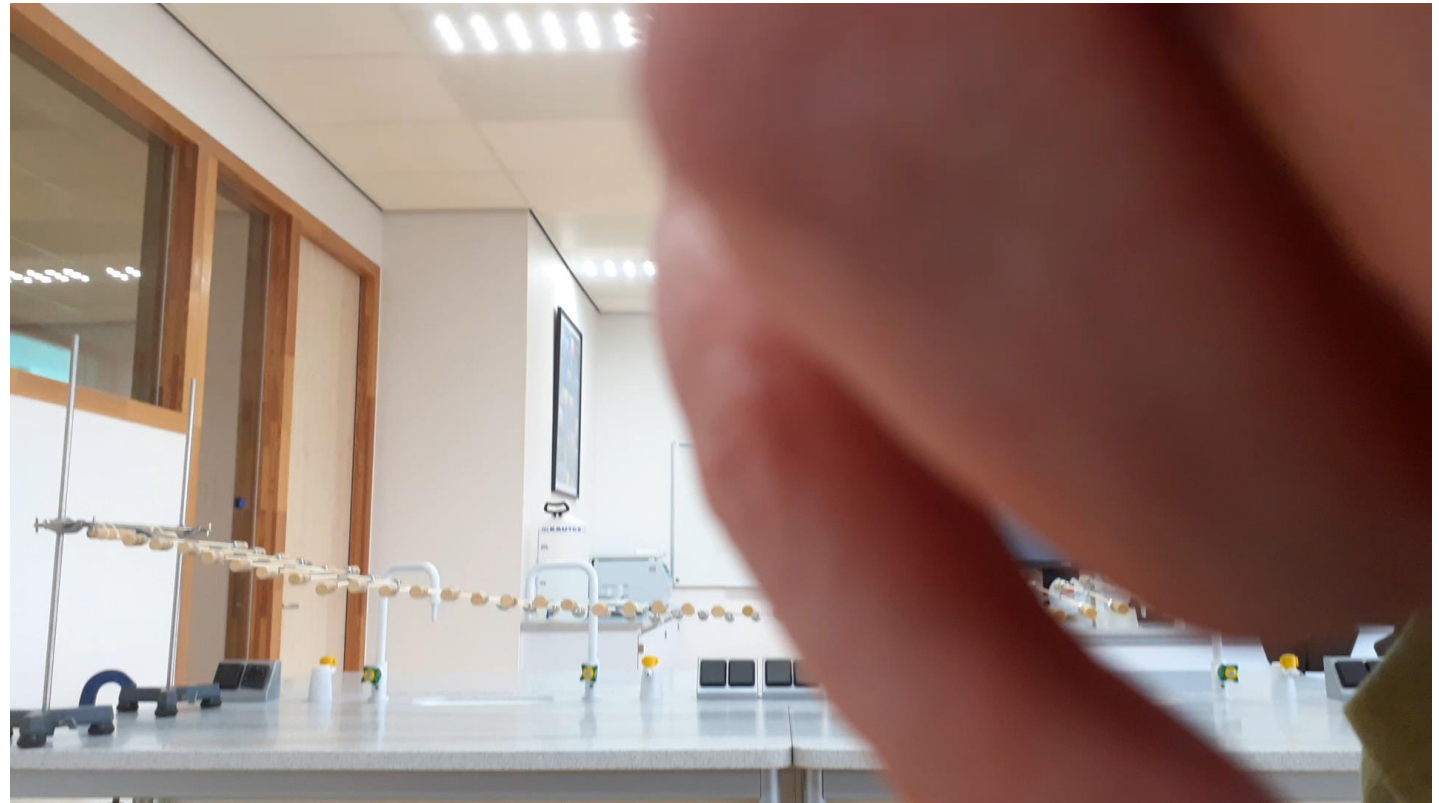
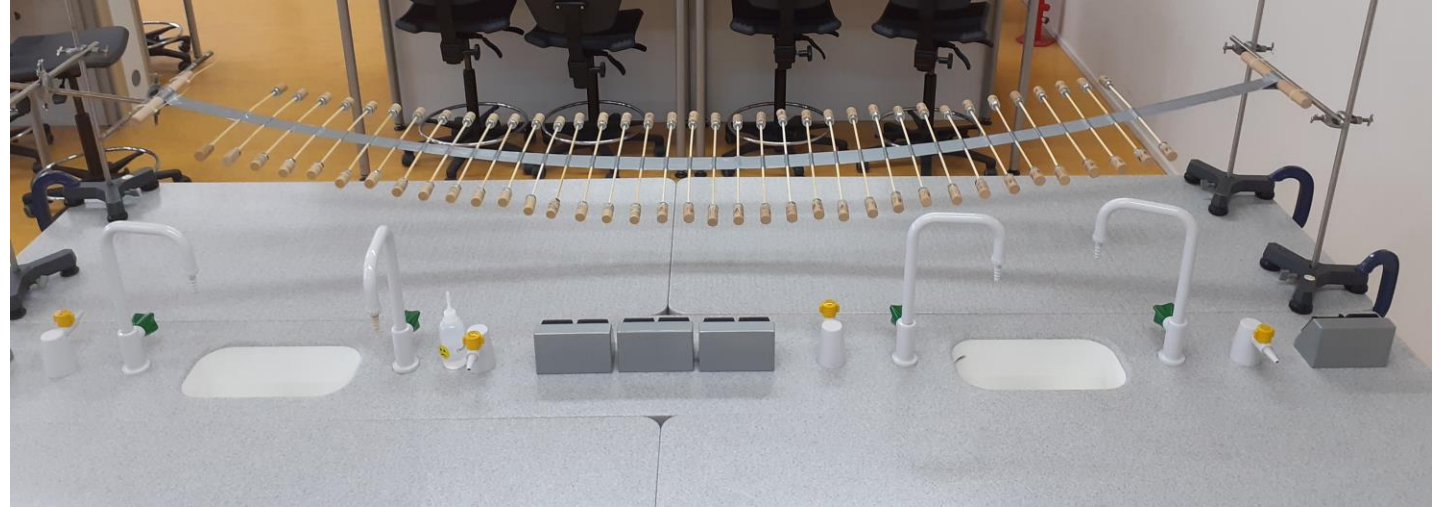
# Shive's wavemachine

$$v = \sqrt{\frac{\kappa}{i}}$$

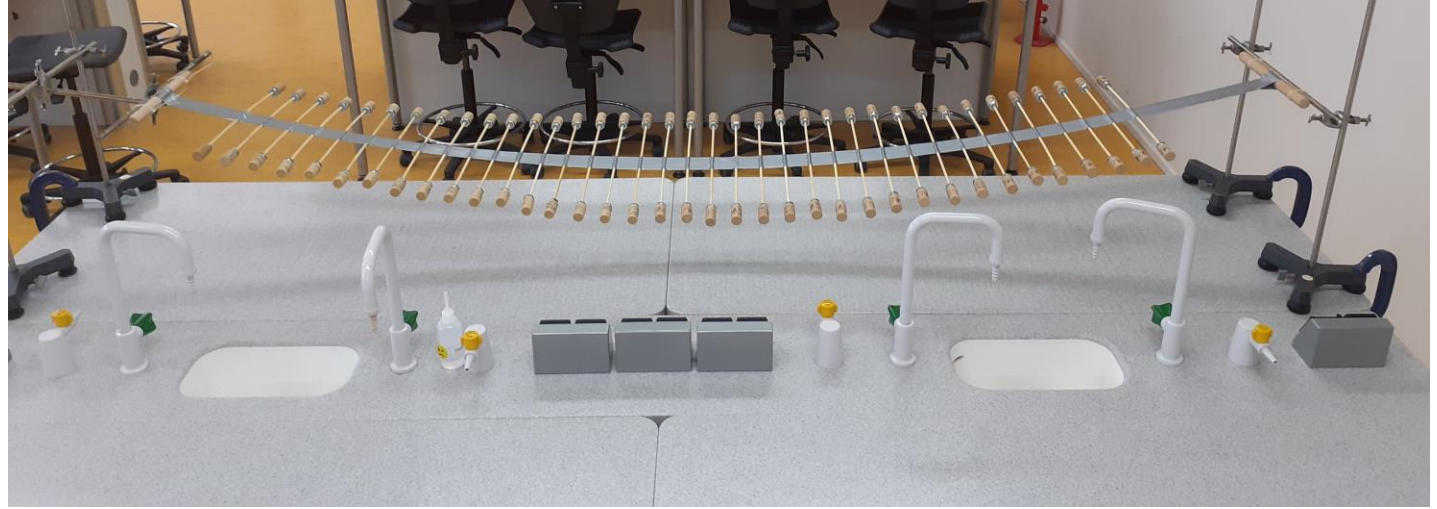
$\kappa$  torsieconstante *maal* meter  
 $i$  traagheidsmoment *per* meter

Grote massa's aan het uiteinde zorgen voor een groot traagheidsmoment en dus een lage golfsnelheid.

Maakt de golf beter te volgen.

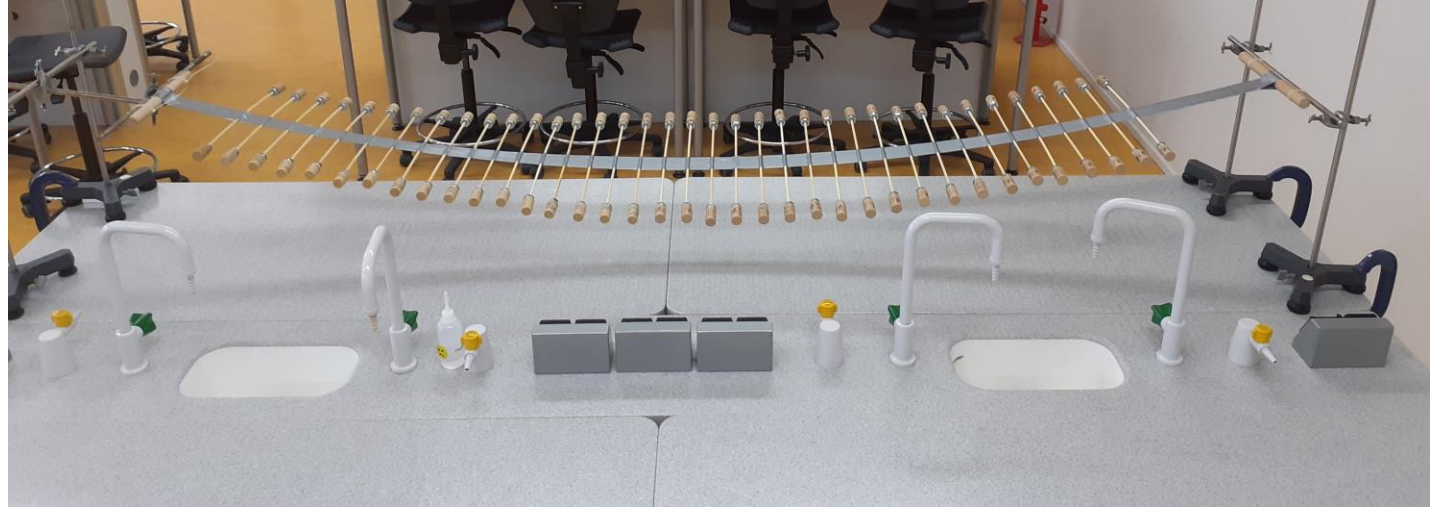


# Shive's wavemachine



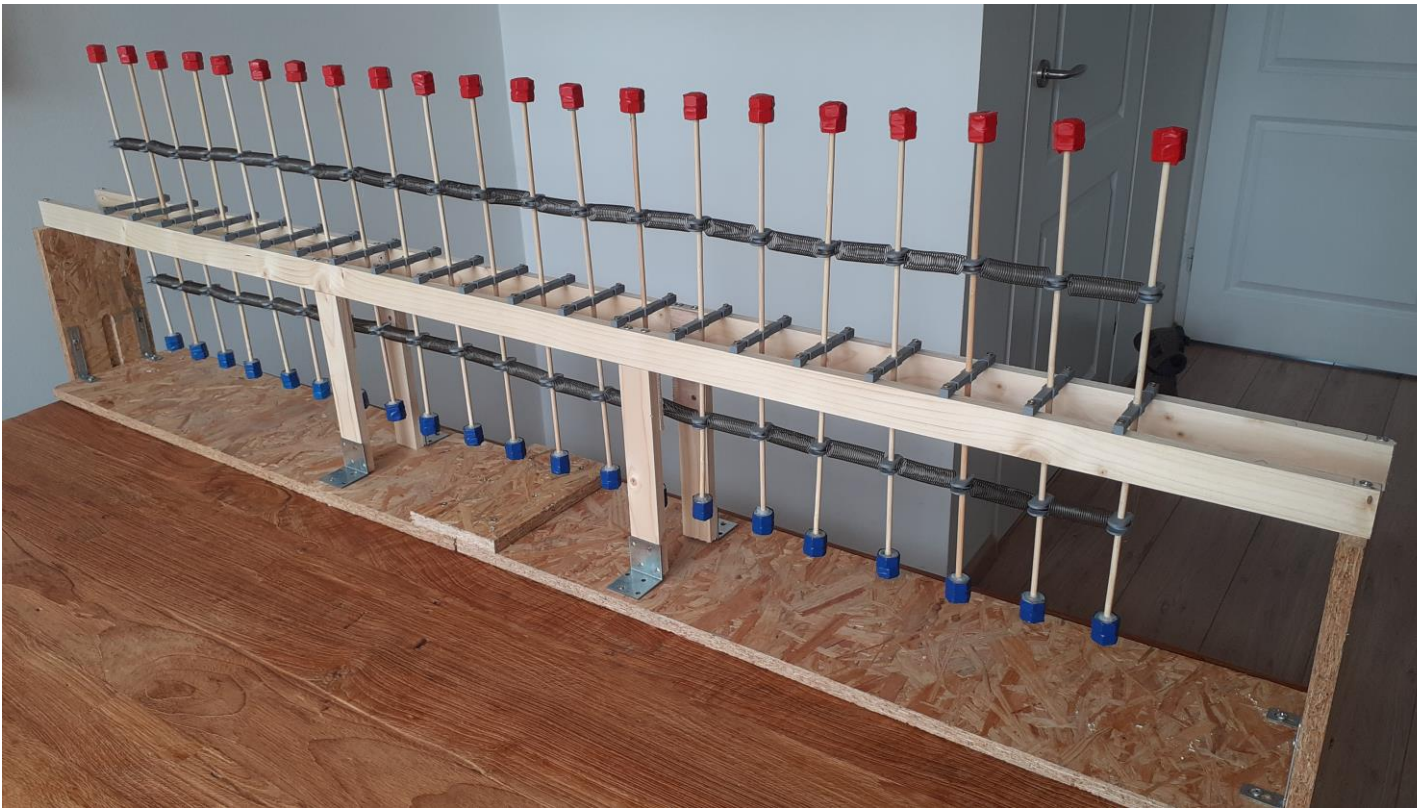


# Shive's wavemachine



# Hayakawa's golfmachine

Dynamische golfmachine om longitudinale golven te genereren.



$$v = \frac{rx_0}{R} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

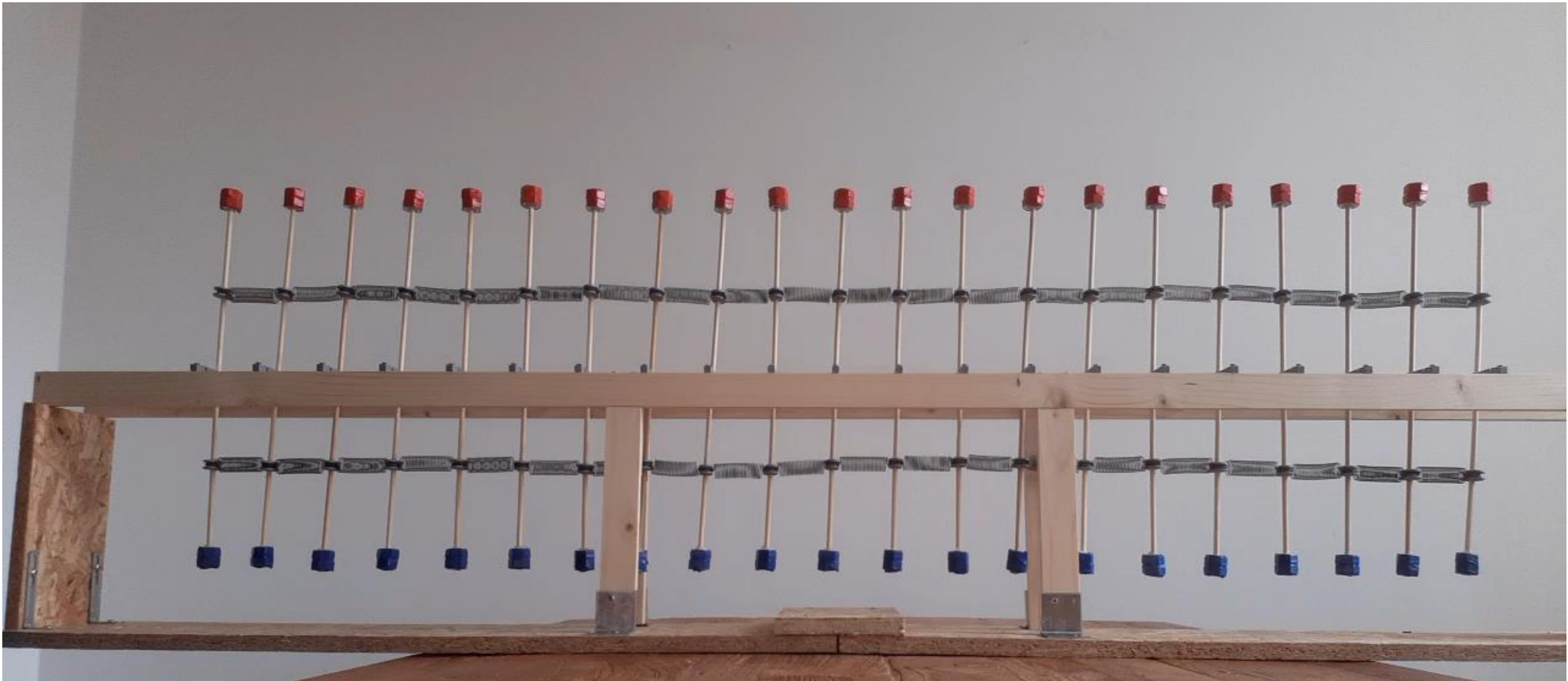
$r$  afstand draai-as tot positie veer  
 $R$  afstand draai-as tot massa's  
 $x_0$  afstand tussen opeenvolgende stokjes  
 $k$  veerconstante enkele veer  
 $M$  totale massa aan het uiteinde van een stokje.

Golfsnelheid o.a. te verkleinen door extra massa aan de uiteinden aan te brengen (of minder stugge veren gebruiken)

Voordeel t.o.v. slinkie: discreet systeem. Individuele 'deeltjes' goed te markeren en te volgen.

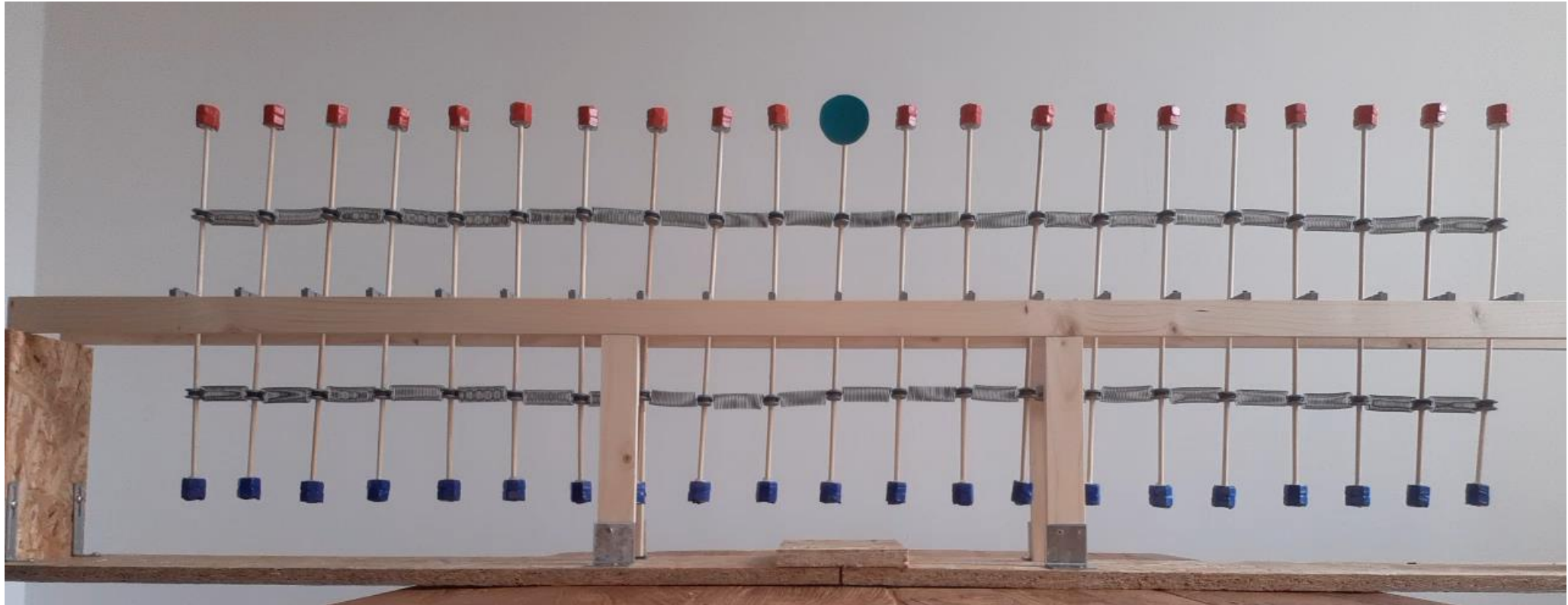
# Hayakawa's golfmachine

Puls met open uiteinde

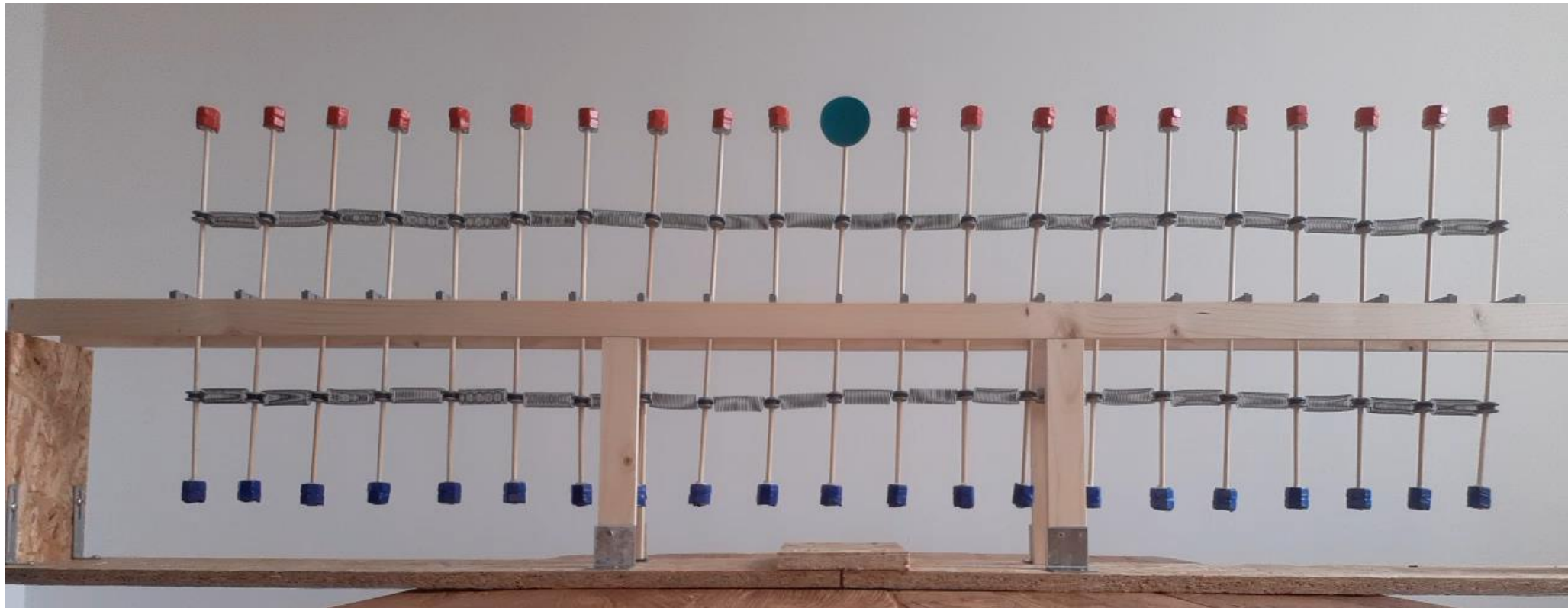




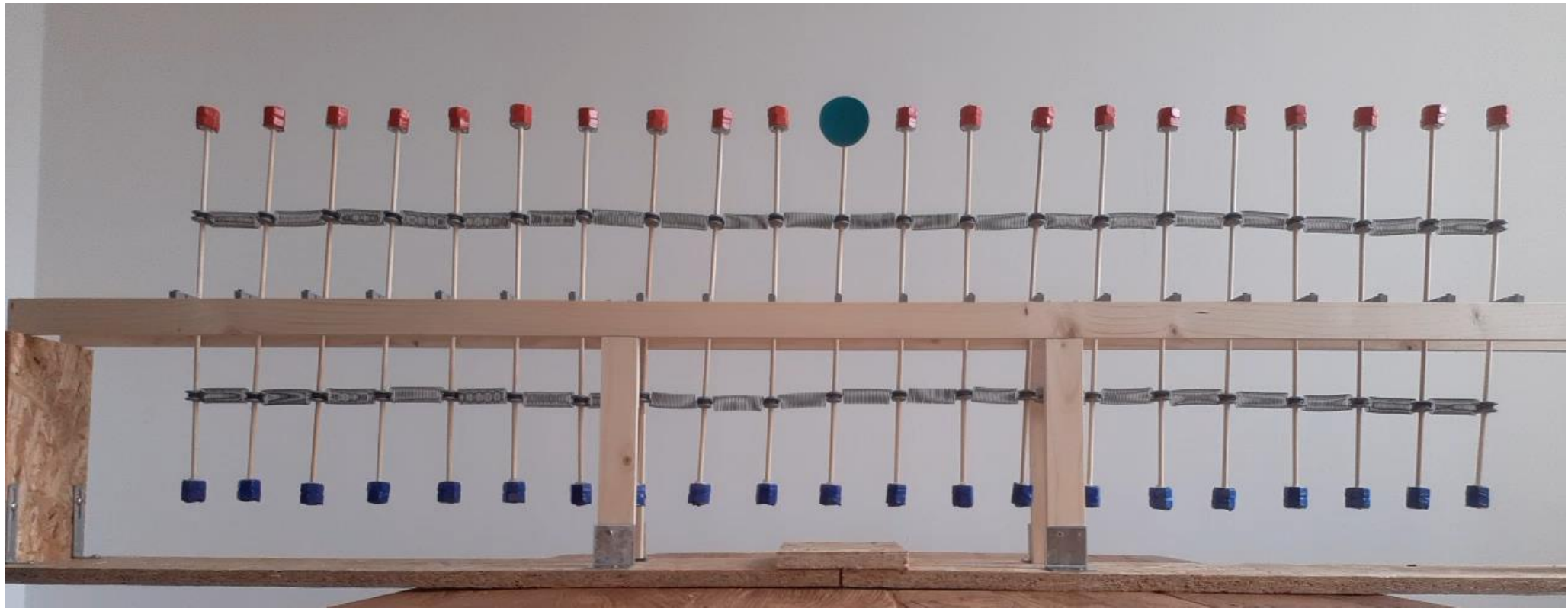
# Hayakawa's golfmachine



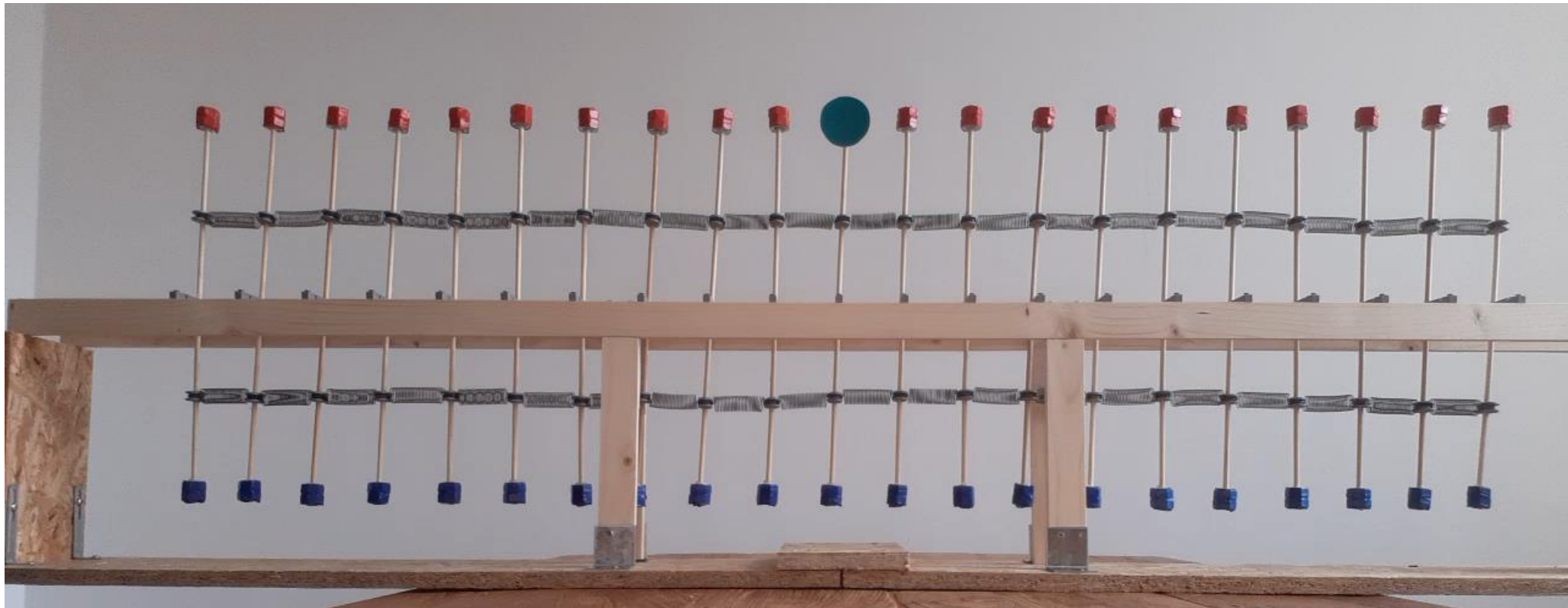
# Hayakawa's golfmachine



# Hayakawa's golfmachine

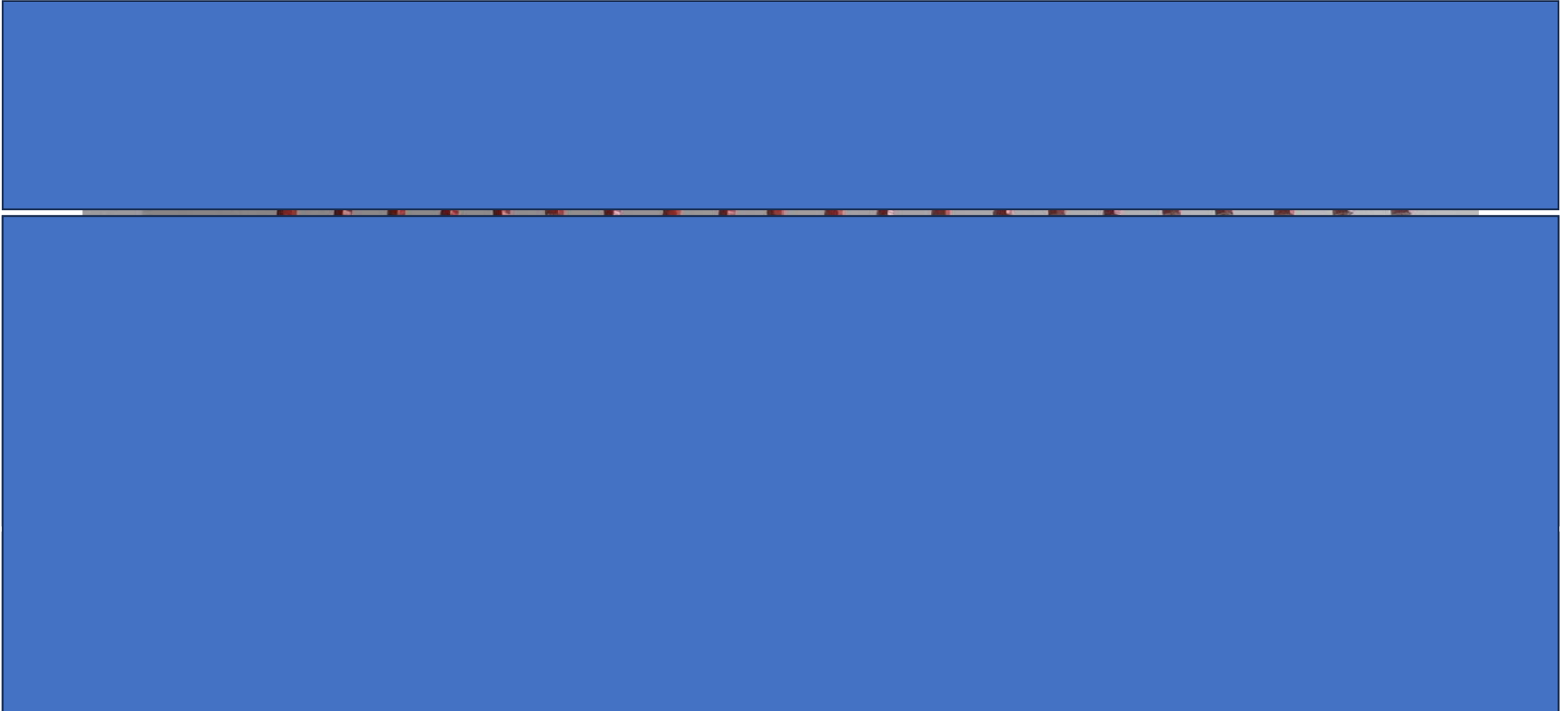


# Hayakawa's golfmachine

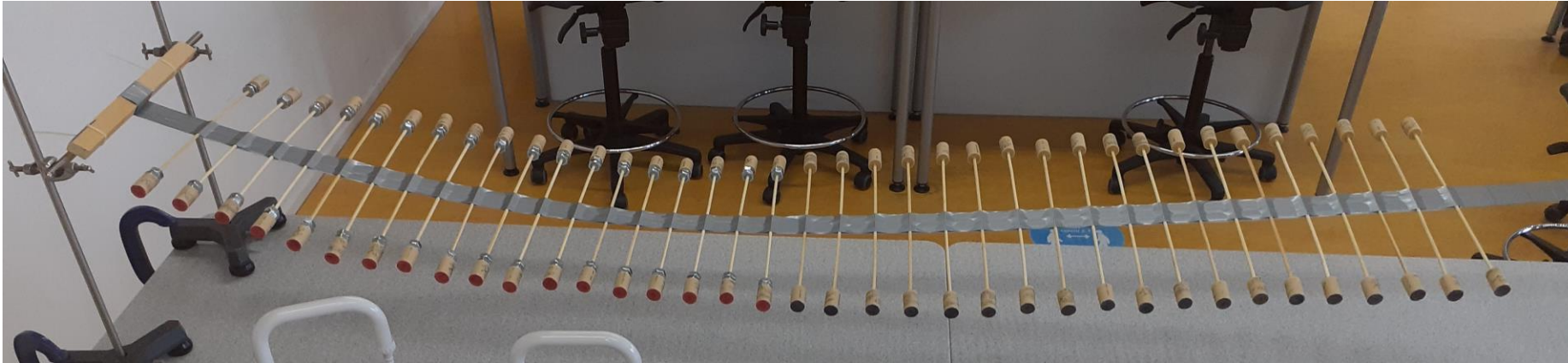




# Hayakawa's golfmachine



# Tweede Shive's wavemachine



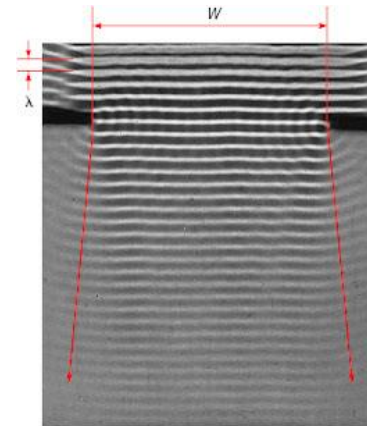
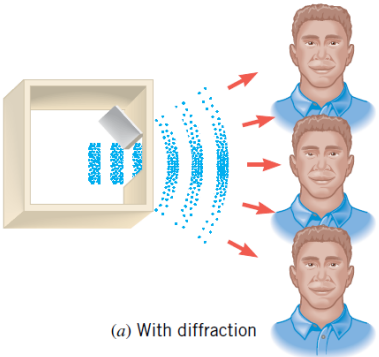
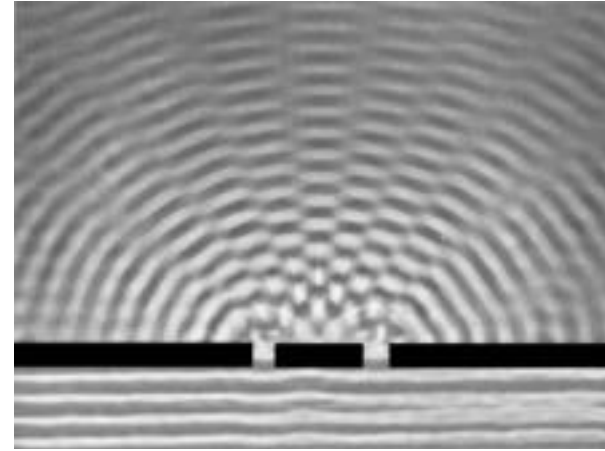
Alleen de eerste helft heeft extra massa aan het uiteinde van het stokje. Daardoor is de golfsnelheid in de eerste helft lager dan in de tweede helft. Model voor twee verschillende optische media.

Blauwe kurken: stelt *lucht* voor  
Rode kurken: stelt *glas* voor

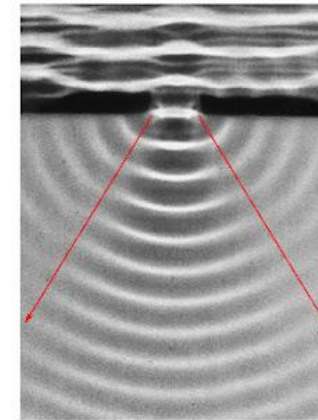


# Verschijselen met interferentie en buiging

—————→ *Golfbak*



(a) Smaller value for  $\lambda/W$ ,  
less diffraction.



(b) Larger value for  $\lambda/W$ ,  
more diffraction.

# Wat valt op aan de nieuwe voorbeelden die we hebben gezien?

- Golfmachines en simulaties vormen zelf steeds een fysisch systeem dat zelf natuurlijk golfgedrag vertoont. Verstoringen en trillingen worden in door het betreffende medium/systeem doorgegeven.
- Je krijgt meer dan wat je erin stopt. Met elk systeem kun je verschillende golfverschijnselen laten zien. Dat is inherent aan het systeem. Je zou hier dus kunnen zeggen dat een golfverschijnsel een **emergent** verschijnsel is. Je stopt er van te voren geen golf in, maar het komt er als gedrag (van alle componenten samen) wel uit.



# Dynamische golfmachines

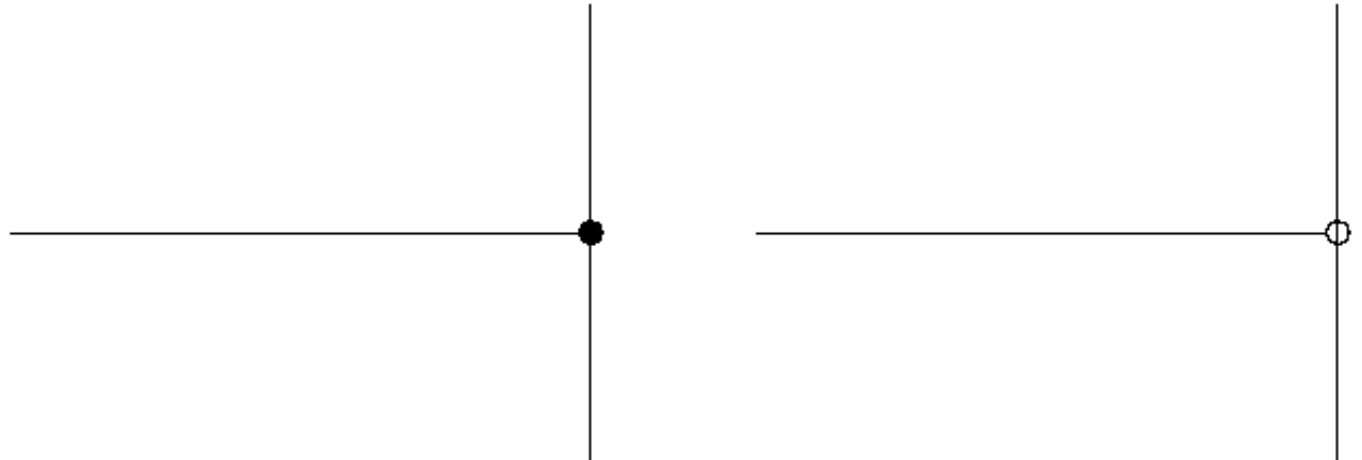
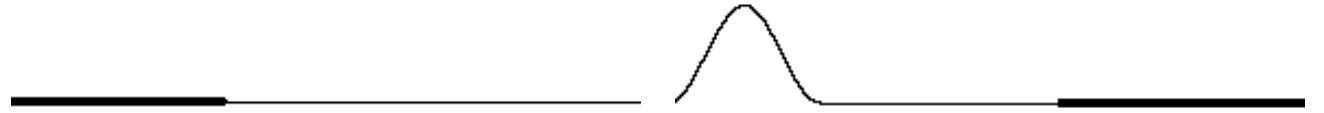
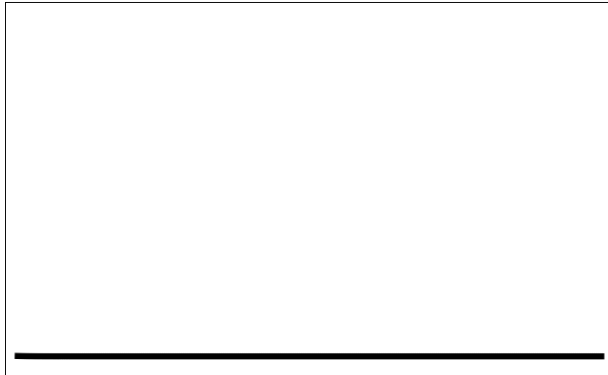
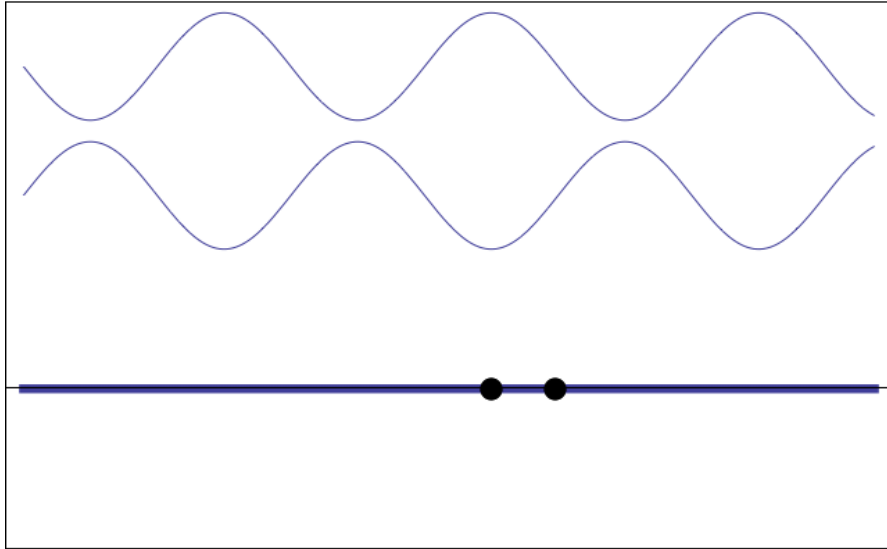
## Voordelen:

- Dynamische golfmachines zijn met name interessant voor het begrijpen van de fysische principes achter de golfverschijnselen, waaronder de fysische oorsprong van een golf (de trilling).
- Zeer geschikt om het verband  $v = \lambda \cdot f$  mee uit te leggen. Omdat  $v$  vastligt in het medium kunnen we door  $f$  te veranderen  $\lambda$  veranderen. Je kunt met één golfmachine meestal meerdere verschijnselen tonen (lopende golven, staande golven, pulsen, reflectie, superpositie, polarisatie etc.)
- Golf met discrete elementen toont duidelijk dat de deeltjes zelf niet met de golf meebewegen.

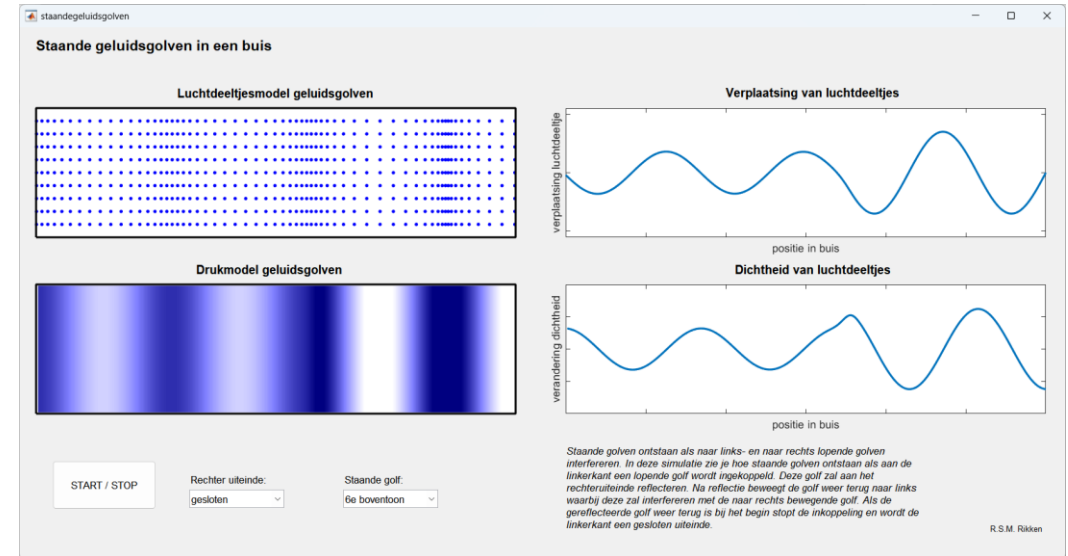
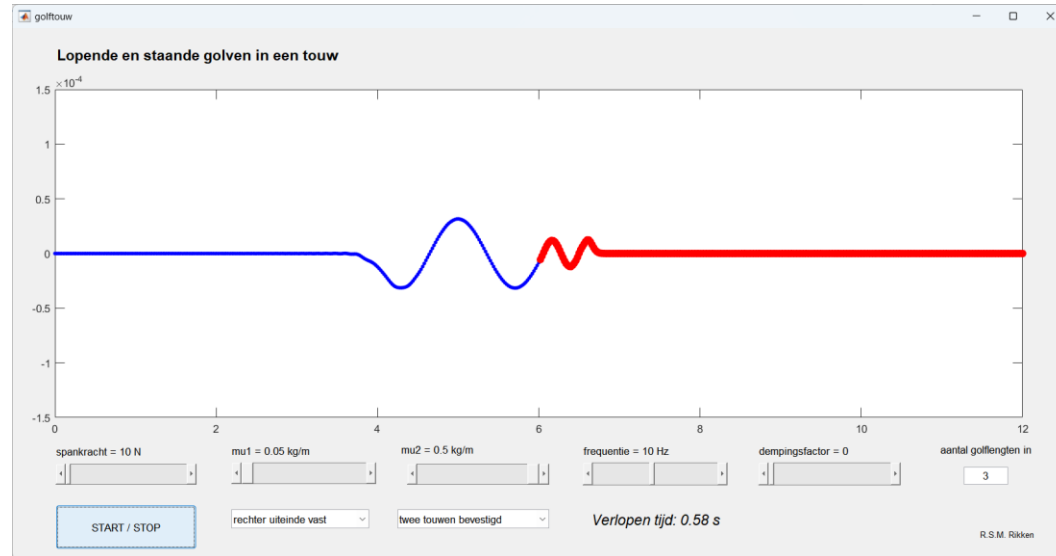
## Nadelen:

- Beweging kan snel gaan → zorg dat deze vertraagd wordt door medium aan te passen.
- Gevoelig voor verstorende elementen waardoor de golven niet zo perfect van vorm zijn als die in de kinetische golfmachines.

# Animaties

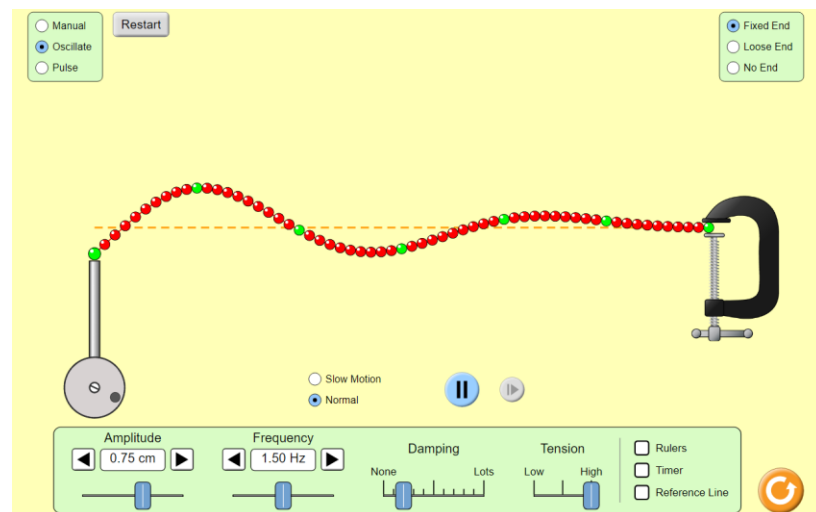


# Simulaties



[www.simufysica.nl](http://www.simufysica.nl)

Niet de golf zelf maar de interacties tussen deeltjes worden hier gesimuleerd. Het golfkarakter treedt vanzelf op als we een deeltje laten trillen / verstoren.



[Wave on a String - Waves | Frequency | Amplitude - PhET Interactive Simulations \(colorado.edu\)](https://phet.colorado.edu/en/simulations/ Wave on a String)

Even samenvatten



# Golfbewegingen zichtbaar maken

```
graph TD; A[Golfbewegingen zichtbaar maken] --> B[Kinetische golfmachines]; A --> C[Dynamische golfmachines]; B --> D[Eigenschappen]; B --> E[Voorbeelden]; C --> F[Eigenschappen]; C --> G[Voorbeelden];
```

## Kinetische golfmachines

### Eigenschappen

- Het te tonen golfverschijnsel is voorgeprogrammeerd. Het apparaat zelf vertoont geen fysisch golfgedrag.
- Geen last van demping en/of ruis in het systeem.
- Golfsnelheid is tijdens gebruik te variëren. Golf kan op elk moment gestopt worden en teruguit gespeeld worden.
- Golflengte ligt vast; de frequentie past zich aan de golfsnelheid aan.
- Geschikt voor het visualiseren en begrijpen van het **wiskundige** deel van een bepaald golfverschijnsel.

### Voorbeelden

- Crova's schijf / plaatjes
- Powell's Wave Machine
- Lovett's wave machine
- Wheatstone's Wave Machine
- Animaties

## Dynamische golfmachines

### Eigenschappen

- Het te tonen golfverschijnsel komt voort uit onderliggende fysische principes en is dus een emergent verschijnsel.
- Demping, dispersie, ruis etc. kunnen de werking van het apparaat verstoren.
- De golfsnelheid ligt tijdens gebruik vast. Frequentie is vrij te variëren.
- Golflengte is indirect te variëren door de frequentie of golfsnelheid aan te passen.
- Geschikt voor visualiseren en begrijpen van het **natuurkundige** deel van een bepaald golfverschijnsel

### Voorbeelden

- Slinkie
- Golfbak
- Shive's golfmachine
- Hayakawa's golfmachine
- Computersimulaties

# Conclusies

- Begrip van golfverschijnselen leidt tot begrip van zeer veel **fenomenen** in verschillende domeinen van de natuurkunde.
- Elke golfmachine heeft zijn eigen ***functie***.
- **Kinetische golfmachines** vooral geschikt voor het tonen van de golfbeweging zelf. In principe vooral een wiskundig model. Hulpmiddel bij visualisatie, geen last van verstoringen. Alle deeltjes tegelijk aangedreven en vertoont geen natuurlijk golfgedrag.
- **Dynamische golfmachines** zijn fysische systemen die natuurlijk golfgedrag vertonen. Geschikt voor tonen ontstaan van golf (door trilling op 1 plek). Goed voorbeeld voor het uitleggen van het verband  $v = \lambda \cdot f$   
In onze uitleg zijn deze golfmachines vaak een analoog systeem voor bijvoorbeeld lucht (geluidsgolven) of elektromagnetische velden (lichtgolven).
- **Uitgangspunt:**
  - *Welk fenomeen willen we verklaren?*
  - *Welk model is hiervoor het meeste geschikt?*