examenbundel.nl

VERNIEUWD
Sluit volledig aan op het examenprogramma

samen gevat}

vwo

Natuurkunde

ThiemeMeulenhoff

examenbundel.nl

samen gevat

vwo

Natuurkunde

ir. A.P.J. Thijssen

R.R.W. Engelgeer-van Riel

#geenexamenstress

mijn.examenbundel.nl

Gratis oefenen en

alle belangrijke exameninfo

ThiemeMeulenhoff

Colofon

Auteurs
A.P.J. Thijssen
R.R.W. Engelgeer-van Riel

Redacteur
Lineke Pijnappels, Tilburg

Opmaak
Crius Group, Hulshout (België)

Technisch Tekenwerk
EMK cartografie, www.emk.nl

Omslagfoto
© Getty Images / E+ / shannonstent

Over ThiemeMeulenhoff

ThiemeMeulenhoff ontwikkelt slimme flexibele leeroplossingen met een persoonlijke aanpak. Voor elk niveau en elke manier van leren. Want niemand is hetzelfde.

We combineren onze kennis van content, leerontwerp en technologie, met onze energie voor vernieuwing. Om met en voor onderwijsprofessionals grenzen te verleggen. Zo zijn we samen de motor voor verandering in het primair, voortgezet en beroepsonderwijs.

Samen leren vernieuwen.

www.thiememeulenhoff.nl

ISBN 978 90 06 66392 1
Achtste druk, eerste oplage, 2024

Deze uitgave is volledig CO_2-neutraal geproduceerd. Het voor deze uitgave gebruikte papier is voorzien van het FSC®-keurmerk. Dit betekent dat de bosbouw op een verantwoorde wijze heeft plaatsgevonden.

Voorwoord

Beste examenkandidaat,

Voor je ligt de geactualiseerde Samengevat natuurkunde vwo, die aansluit op de exameneisen die gelden voor het CE vanaf 2025 en gebaseerd is op de Syllabus Centraal Examen 2025, versie 4, juni 2023.
In dit boek vind je de leerstof en de vaardigheden voor het vwo-examen natuurkunde kort en systematisch weergegeven.
Deze samenvatting stelt je in staat om in korte tijd grote hoeveelheden stof te herhalen en te overzien. Hoofd- en bijzaken worden onderscheiden waardoor je inzicht krijgt in de grote lijnen van de stof en in de samenhang tussen de verschillende onderwerpen.

Met Samengevat bereid je je zelfstandig voor op het examen. Bij verwijzingen naar het tabellenboek Binas wordt uitgegaan van de 7e editie. Achter in het boek op pagina 180 staat aangegeven waar een vermelde Binas-tabel is te vinden in het tabellenboek ScienceData.
In hoofdstuk 11 is gewerkt met programma Coach 7.
Tijdens het examen mag geen gebruik worden gemaakt van een grafische rekenmachine.
De keuzegroepen Kern- en deeltjesprocessen, Relativiteitstheorie, Biofysica en Geofysica zijn niet opgenomen in dit boek.
Ook het onderdeel Eigenschappen van stoffen en materialen is niet opgenomen in dit boek (dit onderdeel is alleen voor het schoolexamen verplicht, niet voor het centraal schriftelijk examen).
Gecombineerd met de Examenbundel vwo natuurkunde vormt deze Samengevat de beste voorbereiding op je examen. De theorie vind je in Samengevat en je oefent met de opgaven uit Samengevat en uit de Examenbundel!

Samengevat en Examenbundel zijn naast elke methode te gebruiken.

Heb je opmerkingen? Meld het ons via vo@thiememeulenhoff.nl

Amersfoort, juli 2024

opmerking
Hoewel dit boek met de grootste zorg is samengesteld, kunnen auteurs en uitgever geen aansprakelijkheid aanvaarden voor aanwijzingen naar aanleiding van publicaties van de overheid betreffende specifieke examenonderwerpen, de hulpmiddelen die je tijdens het examen mag gebruiken, duur en datum van je examen, etc.
Het is altijd raadzaam je docent of onze website www.examenbundel.nl te raadplegen voor actuele informatie die voor jouw examen van belang kan zijn.

Hoe werk je met dit boek?

In SAMENGEVAT vormen linker- en rechterbladzijde een geheel. De begrippen die links kort worden weergegeven, worden rechts nader toegelicht (door definities of voorbeeldvraagstukken).

LINKERBLADZIJDE

Op de linkerbladzijde staan boomdiagrammen die de onderlinge relaties van begrippen laten zien.
De linkerbladzijde dient als een checklist om snel na te gaan of de genoemde onderwerpen bekend zijn.

dit is het **hoofdbegrip**	→	**weerstand *R* (in Ω)**
begrip van 1e orde, informatie over **weerstand** + toelichting	→	■ **ohmse weerstanden** weerstanden met constante waarde
begrippen van 2e orde, informatie over **ohmse weerstanden**	→	■ **koolweerstand** vaak gebruikt in radio's, tv's etc.
		■ **(metalen)draad** bij constante temperatuur
cursieve tekst geeft relatie met bovenliggend begrip (hier draad) aan	→	*weerstand in formule*
		■ $R = \frac{\rho \cdot \ell}{A}$ ρ = soortelijke weerstand (in Ω m)
		ℓ = lengte van de draad (in m)
drie **begrippen** van 3e orde, informatie over **(metalen)draad** + toelichting		A = grootte van doorstroomoppervlak (in m^2)
		ronde draden: $A = \pi \cdot r^2 = \frac{1}{4}\pi \cdot d^2$
ook begrip van 4e orde is mogelijk		■ **weerstand van (koperen) elektriciteitssnoer** is heel klein
		■ **temperatuurstijging draad** ρ neemt toe, dus de weerstand neemt ook toe
volgend begrip van 1e orde, etc.		■ **niet-ohmse weerstanden weerstanden** met variabele waarde, o.a.
		■ **PTC** weerstand met '**P**ositieve **T**emperatuur **C**oëfficiënt'
		■ **NTC** weerstand met '**N**egatieve **T**emperatuur **C**oëfficiënt'
		■ **LDR** '**L**ight **D**ependent **R**esistor' ⇒ lichtgevoelige weerstand

RECHTERBLADZIJDE

Op de rechterbladzijde vind je definities van begrippen, soms een overzicht en vooral veel voorbeeldopgaven. Bij de voorbeeldopgaven is er meestal eerst een inleiding. Daarna komt er een vraag in cursieve letter, met een streepje ervoor.
Direct eronder staat het antwoord op de vraag.
Het is een goede manier van oefenen wanneer je met een blaadje het antwoord afdekt en eerst zelf probeert de opgave op te lossen (in plaats van direct te lezen wat de oplossing is).

Inhoud

1 Trillingen en golven

trilling

twee kenmerken

- **beweging moet regelmatig terugkerend (periodiek) zijn**
- **er moet een evenwichtsstand zijn** ⇒ beweging van aarde om zon is geen trilling, want er is geen evenwichtsstand

relevante grootheden

- **trillingstijd T (in s) en frequentie f (in Hz ofwel s^{-1})**
  - $T = \frac{1}{f}$ (of $f = \frac{1}{T}$) trillingstijd wordt ook 'periode' genoemd
- **amplitude A (in m)** is maximale uitwijking uit evenwichtsstand
  - **A is uitsluitend positief**
- **uitwijking u (in m)**
  - **u kan positief of negatief zijn** vaak wordt gebruikt: u naar boven of naar rechts positief en u naar beneden of naar links negatief
  - **u varieert van $-A$ tot $+A$** er geldt: $A = |u_{max}|$

registreren van trillingen komt neer op het maken van een (u,t)-diagram van de trilling: hiermee is een trilling goed te bestuderen

verschillende mogelijkheden o.a.

- **beroete plaat** trek trillende benen van stemvork over een beroete plaat
- **oscilloscoop** toont op scherm een (u,t)-diagram van de trilling
  - **horizontaal** wordt de tijd uitgezet
    - **tijdbasis** bepaalt het aantal seconden (of ms of µs) per hokje; dit wordt weergegeven als: s div^{-1} (= s $division^{-1}$ = aantal seconden per hokje)
  - **verticaal** wordt de uitwijking van het trillende voorwerp uitgezet; hiertoe moet de trilling worden omgezet in een elektrische trilling (bv. microfoon: zet geluid om in elektrische trilling) of je haalt een elektrische trilling uit een toongenerator (f en A zijn hierbij regelbaar)
    - **spanning** verticaal is uitgezet: volt div^{-1} = aantal volt per hokje
- **computer** bv. met een sensor, een meetpaneel en het programma Coach

fase φ (geen eenheid)

- $\varphi = \frac{t}{T}$ formule alleen gebruiken indien wordt gestart op $t = 0$ s
  - **faseverschil tussen twee trillingen A en B** $\Delta\varphi = \left|\frac{t}{T_A} - \frac{t}{T_B}\right|$
  - **faseverschil bij een trilling tussen twee momenten** $\Delta\varphi = \frac{\Delta t}{T}$
  - **gereduceerde fase** $0 \le \varphi_{red} < 1$; om van een trillende massa de u te bepalen hoeft slechts φ_{red} bekend te zijn

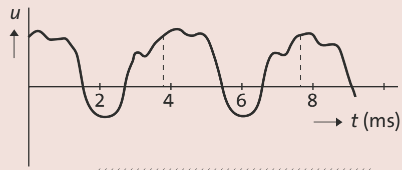
trilling periodieke beweging om een evenwichtsstand (stand die het voorwerp inneemt nadat het door demping volledig is uitgetrild).

gedempte trilling trilling waarbij het energieverlies niet telkens wordt aangevuld ⇒ de amplitude neemt af tot nul. De frequentie blijft tijdens het dempen gelijk.

ongedempte trilling trilling waarbij geen energieverlies optreedt of waarbij het energieverlies voortdurend wordt aangevuld ⇒ de amplitude blijft constant.

trillingstijd (of periode) tijd nodig voor één trilling (= één volledige heen en weer gaande beweging, totdat de beweging zich herhaalt).

frequentie aantal trillingen, uitgevoerd in één seconde.
Zie het (u,t)-diagram hiernaast van de stem van iemand die een bepaalde toon zingt.

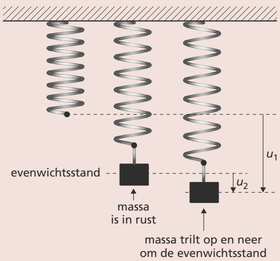


- *Bepaal de trillingstijd en de frequentie.*

De beweging herhaalt zich na 3,8 ms ⇒

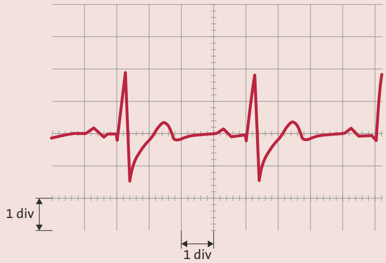
$T = 3{,}8\text{ ms} \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}8 \cdot 10^{-3}} = 2{,}6 \cdot 10^2\text{ Hz}$

uitwijking afstand van het zwaartepunt van het trillende voorwerp tot de evenwichtsstand. In de figuur u_2.
Bij veren is de *uitrekking* u_1 van de veer in het algemeen ongelijk aan de *uitwijking* u_2 uit de evenwichtsstand (zie fig.).



evenwichtsstand stand die trillend voorwerp inneemt nadat het (door *demping*) is uitgetrild.

oscilloscoop instrument dat het verloop van een elektrische spanning U als functie van de tijd kan weergeven ⇒ het instrument kan (U,t)-diagrammen weergeven.
Een ecg (elektrocardiogram = de weergave van de elektrische activiteit van het hart) is afgebeeld op het scherm van een oscilloscoop (zie fig.).
Voor de tijdbasis (horizontaal) geldt: 200 ms div^{-1};
voor de spanning (verticaal) geldt: 0,50 mV div^{-1}.
(div. = division = hokje)



- *Bepaal de frequentie f en de maximale uitwijking van het afgebeelde oscilloscoopbeeld.*

Eén trilling komt overeen met 4 div. ⇒ $T = 4 \cdot 200\text{ ms} = 800\text{ ms} \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}800} = 1{,}3\text{ Hz}$

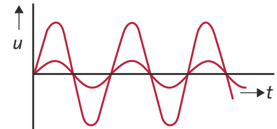
De maximale uitwijking komt overeen met 1,9 div ⇒ $A = 1{,}9 \cdot 0{,}50\text{ mV} = 0{,}95\text{ mV}$

fase aantal trillingen dat een voorwerp of deeltje heeft uitgevoerd.

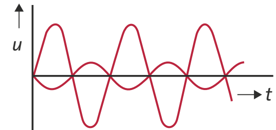
gereduceerde fase fase minus het aantal gehelen.

faseverschillen

- **in fase trillen** de massa's trillen 'gelijk op' (zie bovenste figuur hiernaast)
- **in tegenfase trillen** de massa's trillen 'tegengesteld';
  voortdurend in fase (of in tegenfase) trillen komt voor bij golven/trillingen met dezelfde trillingstijd T;
  af en toe in fase (of in tegenfase) trillen komt voor bij golven/trillingen met verschillende trillingstijd T



in fase

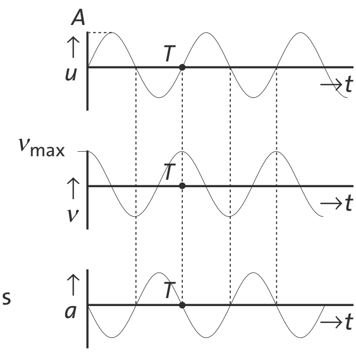


in tegenfase

harmonische trilling uitwijking is sinusfunctie van de tijd, zie het (u,t)-diagram hieronder

bij harmonische trilling met op t = 0 s passage door de evenwichtsstand omhoog geldt:

- **plaatsfunctie:** $u(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$; $u_{max} = A$, want u is maximaal bij sin = 1
- **diagrammen**
  - **(u,t)-diagram:** sinusfunctie
  - **(v,t)-diagram:** af te leiden uit (u,t)-diagram volgens de regel:
    v = steilheid in (u,t)-diagram
    - $v_{max} = \frac{2\pi A}{T}$
    - **v_{max} = maximale steilheid in (u,t)-diagram**
      steilheid is maximaal wanneer $u = 0$
  - **(a,t)-diagram:** af te leiden uit (v,t)-diagram volgens de regel: a = steilheid in (v,t)-diagram



- **tekenen van (u,t)-diagram** teken o.a. punten op $\frac{1}{12}T$ voor en na een nuldoorgang; voor deze punten geldt namelijk: $|u| = \frac{1}{2}A$, want

$$u(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{1}{12}T\right) = A \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{1}{2}A \quad \text{(rekenmachine op rad)}$$

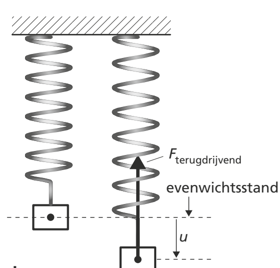
treedt op bij

- **elastische voorwerpen** want hierbij wordt voldaan aan $\vec{F}_{terugdrijvend} = -C \cdot \vec{u}$; zie hieronder

krachten bij harmonische trillingen

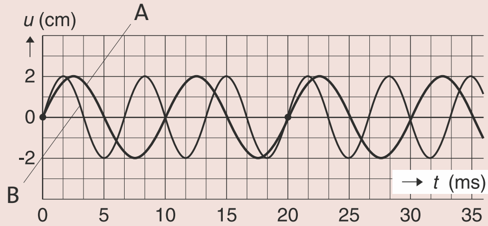
algemene regel bij elke harmonische trilling

- $\vec{F}(t) = -C \cdot \vec{u}(t)$ F en u zijn vectoren; F is steeds tegengesteld aan u
  - **$\vec{F}(t)$ = terugdrijvende kracht op tijdstip t** dit is de kracht die ervoor zorgt dat het trillende voorwerp telkens terugkeert naar de evenwichtsstand; F is meestal een *resulterende* kracht en verandert in de loop van de tijd sinusvormig
  - **$\vec{u}(t)$ = uitwijking uit evenwichtsstand op tijdstip t**
  - **C = krachtconstante = constante verhouding van $\left|\frac{F_{terugdrijvend}}{u}\right|$**



faseverschil tussen twee trillingen aantal trillingen dat de ene trilling op een bepaald tijdstip méér heeft gemaakt dan de andere trilling.

In de figuur staan de (u,t)-diagrammen van twee trillingen A en B, die allebei begonnen op t = 0,0 ms.



- *Op welke tijdstippen zijn de trillingen in fase?*
  Kijk wanneer de trillingen 'gelijk op' trillen.
  Dat is op t = 0,0 ms en t = 20 ms.
  En als de grafiek zou doorlopen, ook op 40 ms, 60 ms, 80 ms, etc.
- *Op welke tijdstippen zijn de trillingen in tegenfase?*
  Dan zijn de trillingen tegengesteld $\Rightarrow$ dit is op t = 10 ms, t = 30 ms, t = 50 ms, etc.
- *Bereken het faseverschil tussen A en B op t = 15 ms.*
  A heeft dan $1\frac{1}{2}$ maal getrild en B $2\frac{1}{4}$ maal (af te lezen in het diagram hierboven).
  Het faseverschil bedraagt dus $2\frac{1}{4} - 1\frac{1}{2} = \frac{3}{4}$

harmonische trilling twee gelijkwaardige definities
- Trilling waarbij het (u,t)-diagram een sinusfunctie van de tijd is.
- Trilling waarvoor geldt: $F_{\text{terugdrijvend}} \sim$ uitwijking u en tegengesteld aan u.

gebruik van formule voor *u*(*t*)

Voor een bepaalde harmonisch trillende massa geldt:
$u(t) = 12 \cdot \sin(8{,}0 \cdot t)$ cm; t in seconden; $(8{,}0 \cdot t)$ in radialen
- *Bepaal de amplitude A en de trillingstijd T van deze trilling.*
  Vergelijk $u(t) = 12 \cdot \sin(8{,}0 \cdot t)$ met de algemene formule $u(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ $\Rightarrow$
  $A = 12$ cm en $8{,}0 \cdot t = 2\pi \cdot f \cdot t \Rightarrow f = 1{,}27$ Hz $\Rightarrow T = \dfrac{1}{f} = 0{,}79$ s

massa-veersysteem

Een onbelaste veer heeft een lengte van 4,6 cm. Harmen hangt een massa van 280 g aan de veer. De lengte van de veer wordt hierdoor 7,3 cm.
- *Bereken de veerconstante C van deze veer.*
  De uitrekking u = 7,3 cm − 4,6 cm = 2,7 cm. De kracht op de veer is de zwaartekracht:
  $F_z = m \cdot g = 0{,}28 \cdot 9{,}8 = 2{,}744$ N. De veerconstante volgt uit: $C = \dfrac{F}{u} = \dfrac{2{,}744\ \text{N}}{0{,}027\ \text{m}} = 1{,}0 \cdot 10^2\ \text{N m}^{-1}$
- *Bereken de trillingstijd van de trilling die ontstaat wanneer men de massa 2,2 cm omlaag trekt en daarna loslaat. Geef je antwoord in twee significante cijfers.*
  Er geldt: $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{C}} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\dfrac{0{,}28}{1{,}0 \cdot 10^2}} = 0{,}33$ s

vervolg

Binas: formules (35B1)

eigentrillingen (eigenfrequenties)

- **systemen met slechts één eigentrilling** treedt o.a. op bij stemvork, massa die trilt aan veer en massa die slingert aan koord
- **systemen met meerdere eigentrillingen** treedt o.a. op bij snaren (snaarinstrumenten), luchtkolommen (blaasinstrumenten) en klankkasten
  - **vaak zijn meerdere eigentrillingen tegelijk mogelijk** klankkast van een instrument moet bij voorkeur zeer veel eigentrillingen bezitten: alle tonen moeten even hard klinken (= even goed meeresoneren)

eigentrillingen bij harmonische trillingen

- **algemene formule voor trillingstijd: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$** waarin m = massa van trillend voorwerp (in kg); C = krachtconstante (in N m^{-1}) = $\left|\frac{F_{\text{terugdrijvend}}}{u}\right|$; C kan betrekking hebben op slingerende massa aan koord, op trillende dobber in water, etc.
- **trillingstijd van massa-veersysteem: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$** waarin m = massa van trillend voorwerp (in kg); C = veerconstante van veer (in N m^{-1})

numeriek model van harmonische trilling met behulp van programma Coach

- **invoeren van $F = -C \cdot u$** in model levert automatisch sinusvormige trillingen; zie verder voorbeeld op pag. 159

resonantie

kenmerken

- **voorwerp gaat meetrillen** er is periodieke energieoverdracht op het juiste moment: resonantie vindt plaats indien de frequentie van de gedwongen trilling gelijk is aan (een van) de eigenfrequentie(s) van het voorwerp
- **amplitude neemt aanvankelijk toe** en wordt na enige tijd constant; dan geldt: energietoevoer per trilling = energieverlies per trilling

merk op

resonantie is soms gewenst (muziekinstrumenten) en soms ongewenst (hinderlijk meetrillen van voorwerpen)

lopende golven algemeen

- **er wordt trillingsenergie doorgegeven**
- **hiervoor zijn trillende deeltjes nodig** uitzondering: lichtgolven, want licht kan zich ook voortplanten in vacuüm; trillende deeltjes blijven gemiddeld op hun plaats ⇒ de deeltjes lopen niet met de golf mee

  voorbeelden

  - **watermoleculen** bij watergolven
  - **luchtdeeltjes** bij geluidsgolven
  - **‘snaardeeltjes’** bij golven in snaren

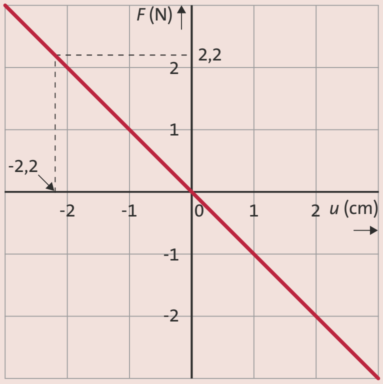
massa-veersysteem vervolg

- *Bereken de maximale snelheid waarmee de massa de evenwichtsstand passeert.*

  Er geldt: $v_{max} = \dfrac{2\pi \cdot A}{T} \Rightarrow v_{max} = \dfrac{2\pi \cdot 0{,}022}{0{,}33} = 0{,}42 \text{ m s}^{-1}$

- *Teken, door te kijken naar de krachten die werken, het ($F_{terugdrijvend}$,u)-diagram dat bij deze harmonische beweging hoort.*

  Er geldt steeds: $F_{terugdrijvend} \sim -u$. Om de grafiek te kunnen tekenen moet slechts één punt van de grafiek worden bepaald; bv. in de laagste stand van de massa geldt:
  uitwijking uit evenwichtsstand = −2,2 cm;
  dan geldt: uitrekking veer = 2,7 + 2,2 = 4,9 cm $\Rightarrow$
  $F_{veer} = C \cdot u = 1{,}0 \cdot 10^2 \cdot 0{,}049 = 4{,}9$ N omhoog gericht.
  Tevens geldt: $F_z = m \cdot g = 0{,}280 \cdot 9{,}81 = 2{,}75$ N omlaag gericht $\Rightarrow$ $F_{res} = F_{terugdrijvend} = 4{,}9 - 2{,}75 = 2{,}2$ N (omhoog gericht) $\Rightarrow$ de grafieklijn loopt door de coördinaten (−2,2 cm; 2,2 N). Zie diagram hiernaast.



eigentrilling trilling die een voorwerp zelf uitvoert nadat het uit de evenwichtsstand is gebracht (bv. door het een zetje te geven).

gedwongen trilling trilling die ontstaat wanneer een massa voortdurend gedwongen wordt om een bepaalde trillende beweging uit te voeren.

resonantie verschijnsel dat de amplitude van een trilling steeds groter wordt, omdat de energietoevoer telkens op het juiste moment komt. Dit gebeurt wanneer de frequentie van de gedwongen trilling gelijk is aan: (een van) de eigenfrequentie(s) van het voorwerp.

- Een schommel, steeds aangeduwd in een van de uiterste standen, is in resonantie.
- Wanneer een microfoon (via een versterker verbonden met een luidspreker) voor de luidspreker wordt gehouden, dan ontstaat er een pieptoon: resonantie.

  De cabine van de auto van Brahim is geveerd met veren met een totale veerconstante van 110 kN m^{-1}. In een straat ligt om de 10 m een verkeersdrempel. De auto rijdt met 54 km h^{-1} in deze straat en blijkt dan in resonantie te komen.

- *Bereken de massa van de auto. Geef je antwoord in het juiste aantal significante cijfers.*

  Er geldt: $v = 54 \text{ km h}^{-1} = 15 \text{ m s}^{-1}$. De tijd tussen twee drempels $= \dfrac{10}{15} = 0{,}67$ s $\Rightarrow$

  de eigentrilling van het chassis op zijn veren heeft een trillingstijd $T = 0{,}67$ s

  Dit invullen in $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{C}}$ ofwel: $T^2 = 4\pi^2\dfrac{m}{C} \Rightarrow m = \dfrac{T^2 \cdot C}{4\pi^2} = \dfrac{0{,}67^2 \cdot 110 \cdot 10^3}{4\pi^2} = 1{,}3 \cdot 10^3$ kg

lopende golf een zich voortplantende trilling.

lopende transversale golven

voorwaarde voor ontstaan

- **deeltjes moeten aan elkaar 'vast' zitten** ⇒ het ene deeltje trekt het andere mee omhoog of omlaag: er ontstaan bergen en dalen; uitzondering: lichtgolven, want daar trillen geen deeltjes (zie pag. 16)

  treedt op

  - **langs oppervlakken van vaste stoffen/vloeistoffen**
  - **bij koorden, snaren, veren etc.**

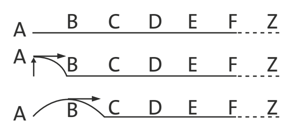
  merk op

  - **golf is gevolg van *na elkaar* bewegen van moleculen** vergelijk dit met de 'wave' in een voetbalstadion: de toeschouwers gaan alleen omhoog en omlaag; door de volgorde waarop de toeschouwers dit doen (eerst jij, dan de buurman, dan de volgende buurman, etc.) gaat er een golf door het stadion

manier van opwekken

- **laat deeltjes trillen in richting loodrecht op voortplantingsrichting van golf** zie figuur

  koord AZ:
  ↑ en ↓ = trillingsrichting van de koorddeeltjes
  → = voortplantingsrichting van de golf
  A start met een gedwongen harmonische trilling;
  B wordt even later mee omhoog getrokken; punt C volgt weer punt B, etc.

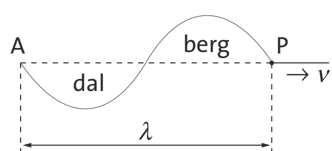


  merk op

  - **alle punten voeren dezelfde beweging uit als A** ze doen dit echter ná elkaar
  - **alle punten gaan eerst omhoog** want A gaat eerst omhoog ⇒ er gaat een 'berg' voorop
  - **alle punten trillen met dezelfde frequentie *f***
  - **alle punten trillen met dezelfde amplitude *A*** indien er geen demping is

voorkomende begrippen

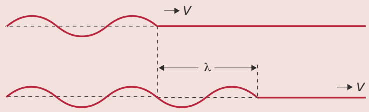
- **frequentie *f* (in Hz)** dit is de frequentie waarmee de afzonderlijke deeltjes op en neer trillen; frequentie verandert nooit bij overgang van ene medium naar andere medium
- **voortplantingssnelheid van golven *v* (of *c* in geval van lichtgolven) (in m s^{-1})** dit is een *andere* snelheid dan die waarmee de deeltjes op en neer trillen
- **golflengte λ (in m)** indien A één volledige trilling heeft uitgevoerd bevindt zich in het koord één golf ⇒ AP = λ (zie figuur hiernaast)



vervolg

voortplantingssnelheid *v* snelheid waarmee de golf zich voortplant. Snelheid hangt niet af van frequentie of golflengte. Snelheid hangt wel af van eigenschappen van medium waar golf doorheen loopt.

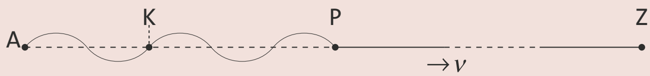
golflengte λ afstand die de golf aflegt in T seconden, of anders gezegd (zie fig.): de afstand van 'dal + berg', ofwel de afstand tussen top en *eerstvolgende* top (of tussen dal en *eerstvolgende* dal).



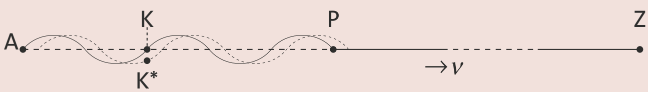
onderste figuur is één trillingstijd later dan bovenste figuur

lopende transversale golf golf die een voortplantingsrichting heeft die loodrecht staat op de richting waarin de deeltjes trillen. De 'wave' in een voetbalstadion is transversaal: toeschouwers gaan omhoog en de golf gaat bv. naar rechts. Golven in koorden/snaren zijn transversaal.

Een golf loopt in koord AZ vanuit A naar rechts en is op een bepaald moment gevorderd tot punt P. De afstand AP bedraagt 180 cm. A trilt met een frequentie van 5,0 Hz en een amplitude van 3,0 cm.



- *Bereken de golfsnelheid v.*
  AP = $2\frac{1}{2}\lambda = 180$ cm $\Rightarrow$ $\lambda = 0{,}72$ m $\Rightarrow$ $v = \lambda \cdot f = 0{,}72 \cdot 5{,}0 = 3{,}6$ m s^{-1}
- *Bereken de snelheid van deeltje A op het moment van tekening.*
  A passeert op het moment van tekening de evenwichtsstand $\Rightarrow$ de snelheid van A is maximaal $\Rightarrow v_A = v_{max} = \dfrac{2\pi \cdot A}{T} = 2\pi \cdot A \cdot f = 2\pi \cdot 0{,}030 \cdot 5{,}0 = 0{,}94$ m s^{-1}
- *Is K op het moment van tekening bezig omhoog te gaan of omlaag te gaan?*
  Teken de stand van het koord een tijd Δt later (zie stippellijn hieronder) $\Rightarrow$ K bevindt zich nu in K* $\Rightarrow$ K was bezig om omlaag te gaan.



- *Bereken hoelang K trilt op het moment van tekening.*
  De golf is juist gearriveerd bij P. Rechts van P zijn geen golven te zien $\Rightarrow$ P heeft dus nog niet getrild. Rechts van A bevindt zich $2\frac{1}{2}\lambda$ $\Rightarrow$ A trilde reeds $2\frac{1}{2}$ maal. Rechts van K bevindt zich $1\frac{1}{2}\lambda$ $\Rightarrow$ K heeft $1\frac{1}{2}$ maal getrild $\Rightarrow$ dit komt overeen met $1\frac{1}{2} \cdot T = 1\frac{1}{2} \cdot 0{,}20 = 0{,}30$ s

tekenen van (u,x)-diagram en (u_K,t)-diagram

Een koord AZ is zeer lang. Beginpunt A trilt voortdurend met frequentie $f = 5{,}0$ Hz en amplitude $A = 2{,}0$ cm. Beginpunt A start op $t = 0$ s en gaat eerst omlaag. De golfsnelheid v is gelijk aan 3,0 m s^{-1}.

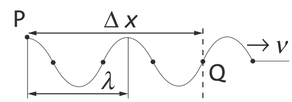
- *Teken de stand van het koord op t = 1,12 s.*
  Vooraf moet je eerst een aantal dingen beredeneren/berekenen:
  - $\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{3{,}0}{5{,}0} = 0{,}60$ m = 60 cm
  - aantal golven in koord = $\dfrac{t}{T} = \dfrac{1{,}12}{0{,}20} = 5{,}6$ (met: $T = \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{5{,}0} = 0{,}2$ s)

vervolg

lopende transversale golven vervolg

formules

- **$\lambda = v \cdot T$ ofwel $v = \lambda \cdot f$** algemene regel: λ past zich aan aan v en T, immers:
  v en T (of f) zijn direct te regelen $\Rightarrow$ λ past zich aan (λ is gevolg); uitzondering: staande golven bij snaren en luchtkolommen met vaste lengte, dan past f zich aan aan λ en v (zie pag. 18 e.v)
- **faseverschil tussen twee punten P en Q in één koord**
  $\Delta\varphi = \varphi_P - \varphi_Q$ geldt algemeen
  $\Delta\varphi = \dfrac{\Delta x}{\lambda}$ geldt in geval P en Q beide trillen
  - **gereduceerde faseverschillen**
    als $\Delta\varphi_{red} = 1$ $\Rightarrow$ P en Q zijn in fase;
    als $\Delta\varphi_{red} = \frac{1}{2}$ $\Rightarrow$ P en Q zijn in tegenfase;
    hier (zie figuur) geldt: $\varphi_P > \varphi_Q$, want golf gaat naar rechts, dus P trilt het langst



$\Delta\varphi_{PQ} = \dfrac{\Delta x}{\lambda} = \dfrac{1\frac{3}{4} \cdot \lambda}{\lambda} = 1\frac{3}{4}$

$\Delta\varphi_{red,\,PQ} = \frac{3}{4}$

- **(u_P,t)-diagram** toont de u van één punt P van het koord op allerlei tijdstippen
- **(u,x)-diagram ofwel: stand van koord** toont de u van alle deeltjes van het koord op één tijdstip $\Rightarrow$ het is een foto van een koord op één bepaald moment

lopende longitudinale golven deeltjes hoeven niet aan elkaar gekoppeld te zijn; er zijn verdichtingen en verdunningen

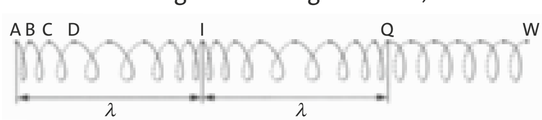
manier van opwekken

- **laat deeltjes trillen in dezelfde richting als voortplantingsrichting**
  voorbeeld
  geef bij A een klap tegen de staaf

A  ijzeren staaf

  (zie figuur) naar rechts gericht: er ontstaat in de staaf een lopende longitudinale golf
- **lange spiraalveer AZ**
  stand van de veer op t = 0 s:
  A start met een harmonische trilling en gaat als eerste naar rechts $\Rightarrow$ er gaat een verdichting van windingen naar rechts; B gaat even later ook naar rechts; C volgt weer punt B, etc.

  A gaat even later naar links $\Rightarrow$ er is een verdunning van windingen te zien; B zal even later ook naar links gaan, etc.;
  stand van de veer op $t = 2T$ (2 golven in de veer): zie figuur



  merk op
  - **elke winding blijft gemiddeld op zijn plaats**

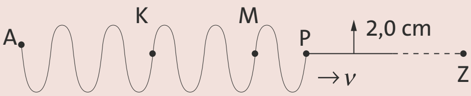
  begrippen bij transversale golven komen ook hier voor, o.a.
  - **frequentie** waarmee een winding heen en weer trilt
  - **golfsnelheid** snelheid waarmee de golf zich voortplant
  - **golflengte** λ is de afstand van verdichting tot verdichting = AI = IQ (zie figuur);
    hier geldt: λ past zich aan aan v en f met $\lambda = \dfrac{v}{f} = v \cdot T$

vervolg

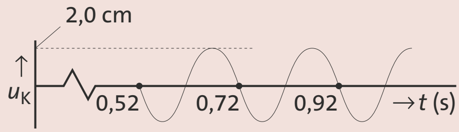
tekenen van (u,x)-diagram en (u_K,t)-diagram vervolg

- kop van de golf bevindt zich op $5{,}6 \cdot \lambda = 336$ cm van A
- er gaat een dal voorop, want A startte omlaag

Dus: teken vanaf de kop van de golf (P) 5,6 golven terug naar links:

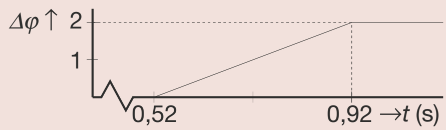


- *Bereken de uitwijking van A op t = 1,12 s.*
  Er geldt: $u_A = -A \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$ (–, want beginpunt A startte *omlaag*). Rekenmachine op rad
  $\Rightarrow u_A = -2{,}0 \cdot \sin(2\pi \cdot 5{,}0 \cdot 1{,}12)$ cm = +1,2 cm
- *Teken het uitwijking,tijd-diagram van punt K (PK = 3 · λ).*
  $PK = 3 \cdot \lambda = 3 \cdot 60 = 180$ cm $\Rightarrow$ AK = 336 – 180 = 156 cm. K 'start' op $t = \dfrac{1{,}56}{3{,}0} = 0{,}52$ s
  K gaat eerst omlaag, want er gaat een dal voorop. K trilt met $T = 0{,}20$ s en amplitude 2,0 cm $\Rightarrow$ zie figuur hiernaast.



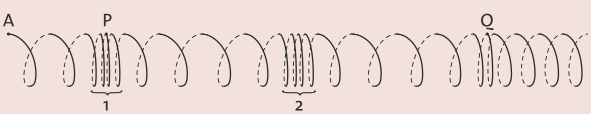
faseverschil tussen twee punten in één koord

- *Teken een diagram dat het faseverschil tussen K en M weergeeft als functie van de tijd (punt K en M: zie tekening vorige opgave).*
  voor $t = [0 \text{ s}; 0{,}52 \text{ s}] \Rightarrow \Delta\varphi = 0$
  voor $t = [0{,}52 \text{ s}; 0{,}52 + 2{,}0 \cdot T] \Rightarrow \Delta\varphi$ neemt toe van 0 tot 2,0 (want KM = 2 · λ)
  voor $t > 0{,}52 + 2{,}0 \cdot T$ (= 0,92 s) geldt: $\Delta\varphi$ blijft 2,0 $\Rightarrow$ diagram: zie figuur hierboven.



lopende longitudinale golf golf die een voortplantingsrichting heeft langs een lijn waarlangs ook de deeltjes heen en weer trillen. Een veelvoorkomende longitudinale golf is een geluidsgolf. Deze golf plant zich niet voort langs een lijn, maar breidt zich uit in alle richtingen.

In een veer loopt een longitudinale golf naar rechts; het uiteinde A begon harmonisch te trillen op $t = 0{,}0$ s. Enige tijd later is de situatie als hieronder getekend: de kop van de golf (een verdichting) is gevorderd tot punt Q.

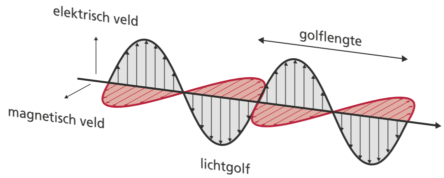


Gegeven: de afstand van verdichting 1 tot verdichting 2 bedraagt 60 cm; $f_A = 5{,}0$ Hz

- *Bereken de golfsnelheid.*
  $v = \lambda \cdot f \Rightarrow v = 0{,}60 \cdot 5{,}0 = 3{,}0 \text{ m s}^{-1}$
- *Is A eerst naar links of eerst naar rechts gegaan?*
  Naar rechts, want er loopt een verdichting voorop.
- *Hoelang trilt P op het moment van tekening?*
  Rechts van P bevinden zich precies twee golflengtes $\Rightarrow$ de fase van P is 2 $\Rightarrow$ P trilt gedurende $2 \cdot T = 2 \cdot \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{5{,}0} = 0{,}4$ s

Binas: formules (35B2)

elektromagnetische golven zijn transversale golven (zoals lichtgolven en radiogolven)



bestaan uit

- **trillende elektrische en magnetische velden** planten zich voort met de lichtsnelheid

lichtgolven ontstaan uit

- **atomen** die naar een lager energieniveau terugvallen; zie pag. 112

voorkomende begrippen

- **frequentie f (in Hz)** is de frequentie waarmee de velden op en neer trillen
  - **frequentie van zichtbaar licht** lichtgolven hebben een frequentie tussen $0{,}40 \cdot 10^{15}$ Hz en $0{,}80 \cdot 10^{15}$ Hz (Binas 19A) $\Rightarrow$ frequentie is zeer hoog
  - **frequentie blijft constant** geldt ook bij overgang naar een ander medium
- **golflengte λ (in m)** λ past zich aan aan lichtsnelheid c en f
  - **golflengte van zichtbaar licht** lichtgolven hebben in vacuüm/lucht een golflengte tussen ongeveer 380 nm (violet) en 750 nm (rood) (Binas 19A) $\Rightarrow$ golflengte is zeer klein

  formules

  - $\lambda = c \cdot T$ **ofwel** $c = \lambda \cdot f$
- **lichtsnelheid c (in m s^{-1})** bij lichtsnelheid gebruik je niet v, maar c
  - **in vacuüm** voor alle golflengtes λ geldt: $c = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ m s^{-1} (Binas 7)
  - **in medium $\neq$ vacuüm** bv. in glas; de lichtsnelheid c wordt dan kleiner
    - **wanneer c afneemt, neemt ook λ af** want $\lambda = c \cdot T$ (en T blijft constant)

elektromagnetisch spectrum frequentie f bepaalt of de elektromagnetische golven zichtbaar zijn (f bepaalt kleur van het licht) en welk effect deze golven hebben op hun omgeving

- **soorten elektromagnetische straling** verschillende soorten straling verschillen in vacuüm alléén in golflengte ofwel in frequentie; alle straling heeft de lichtsnelheid
  - **overzicht van soorten straling** zie pag. 26 (en Binas 19B)

merk op

- **schadelijk effect neemt toe met de frequentie** en neemt af met λ, want $\lambda \sim \frac{1}{f}$

geluidsgolven zijn longitudinale golven; hieronder worden geluidsgolven in lucht besproken

bestaan uit

- **verzameling van trillende luchtmoleculen**
  - **luchtmoleculen blijven gemiddeld op hun plaats** moleculen trillen slechts om hun evenwichtsstand
  - **golf is gevolg van na elkaar bewegen van opeenvolgende moleculen**

ontstaan uit

- **geluidsbronnen** bron brengt luchtmoleculen vlak bij de bron aan het trillen; er ontstaan verdichtingen en verdunningen van moleculen, deze verdichtingen en verdunningen planten zich voort

vervolg

elektromagnetisch spectrum verzameling van alle soorten elektromagnetische golven, gerangschikt naar frequentie of golflengte (Binas 19B). Zie ook pag. 26.

geluid een geluidsbron brengt lucht (of andere materie) in trilling. Deze trillingen breiden zich uit in de vorm van een geluidsgolf. Geluid is hoorbaar wanneer de frequentie ervan ligt tussen 20 Hz en 20.000 Hz én het geluid voldoende sterk is.

lopende geluidsgolven

Een luidspreker produceert een toon van 400 Hz. Vanaf de luidspreker planten zich verdichtingen en verdunningen van lucht voort (zie figuur pag. 18). Er geldt: $v_{geluid} = 340$ m s^{-1}.

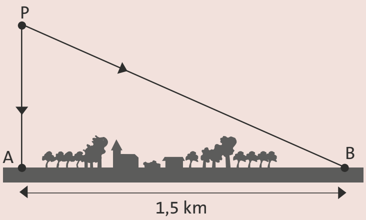
- *Hoe groot is de afstand tussen twee opeenvolgende verdichtingen?*

Deze afstand is gelijk aan λ. Er geldt: $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{400} = 0{,}850$ m

- *Is het juist dat luchtdeeltje P even later in Q is gearriveerd?*

Nee, P trilt heen en weer met zeer kleine amplitude maar blijft gemiddeld op zijn plaats. P geeft de trillingsenergie alleen door.

In een bepaald gebied onweert het. In de buurt van P (800 m boven de grond) slaat een bliksemstraal over tussen twee wolken. Onmiddellijk breidt zich vanuit P een enorme hoeveelheid geluid uit (donder). B zal de donder later horen dan A (zie figuur). Er geldt: $T_{lucht} = 20$ °C.



- *Hoeveel seconden na A zal B de donder horen?*

Bij $T = 20$ °C geldt: $v_{geluid\ in\ lucht} = 343$ m s^{-1} (Binas 15A).

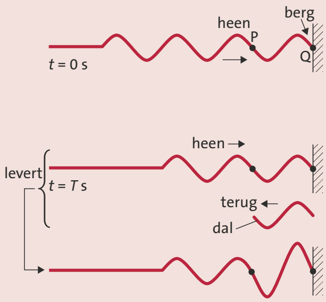
PA = 800 m $\Rightarrow$ PB = $\sqrt{1500^2 + 800^2} = 1700$ m $\Rightarrow$

PB – PA = 900 m $\Rightarrow$ als het geluid in A arriveert, moet het geluid dat op weg is naar B, nog

900 m afleggen $\Rightarrow$ het tijdsverschil Δt bedraagt: $\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{900}{343} = 2{,}6$ s

staande golven ontstaan als gevolg van interferentie: het samengaan van heenlopende en teruglopende (vaak: teruggekaatste) golven. Golfberg en golfdal kunnen elkaar verzwakken of zelfs uitdoven (destructieve interferentie); golfberg + golfberg (en ook golfdal + golfdal) versterken elkaar (constructieve interferentie).

Een golf loopt in een koord naar rechts en heeft de muur bereikt. Voorop loopt een golfberg. De muur kaatst de berg terug als een dal. De figuur toont de situatie op $t = 0$ s.



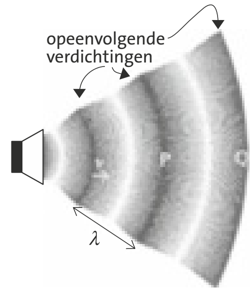
- *Laat zien dat op tijdstip T (trillingstijd) er in koorddeel PQ sprake is van constructieve interferentie.*

De heenlopende golf schuift 1λ op naar rechts; de teruggekaatste golf heeft een afstand 1λ afgelegd naar links, waarbij er een dal voorop loopt. Optellen van de twee golven op het deel PQ laat zien dat de golven elkaar versterken.

vervolg

Binas: geluidssnelheden (15A)

geluidsgolven



belangrijke geluidsbronnen

- **stembanden**
- **luidspreker** conus (trechter) van luidspreker gaat heen en weer en produceert verdichtingen en verdunningen van lucht (zie ook pag. 104)

belangrijke begrippen

- **frequentie f (in Hz)** is frequentie waarmee deeltjes (meestal moleculen) heen en weer trillen
  - **frequentie** bepaalt toonhoogte; hoe hoger de frequentie, hoe hoger de toon; gehoorgrenzen: 20 Hz < f < 20 kHz
  - **amplitude** bepaalt geluidssterkte; hoe groter de amplitude, hoe harder het geluid
- **geluidssnelheid v (in m s^{-1})** in lucht (20 °C) geldt: v = 343 m s^{-1} (Binas 15A)
  - **v_{geluid} hangt af van temperatuur van medium** als T > dan v_{geluid} >
  - **v_{geluid} hangt af van soort medium** bv. $v_{geluid,ijzer} > v_{geluid,lucht}$
  - **v_{geluid} hangt niet af van frequentie en/of amplitude**
- **golflengte λ (in m)** afstand tussen twee opeenvolgende verdichtingen

  kenmerken
  - **één golflengte λ wordt afgelegd in T seconden (T = trillingstijd)**
  - **λ past zich altijd aan aan v en f**

  formules
  - $\lambda = v \cdot T$ **ofwel** $v = \lambda \cdot f$

staande golven bij snaarinstrumenten snaar is in eigentrilling; luchtkolom van instrument resoneert mee met toon van snaar

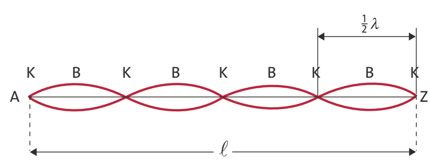
snaar in eigentrilling kenmerkt zich door

- **knopen** snaardeeltjes staan hier voortdurend stil

  treden op
  - **bij vaste uiteinden**
  - **midden tussen twee buiken**
- **buiken** snaardeeltjes trillen hier voortdurend maximaal op en neer

  treden op
  - **midden tussen twee knopen**
- **afstand knoop-buik = $\frac{1}{4}\lambda$**

meest voorkomende situatie



- **aan twee kanten ingeklemde gespannen snaar**

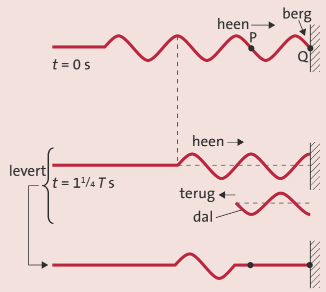
  voorwaarde voor ontstaan van staande golven (twee gelijkwaardige formuleringen)
  - $\ell = n \cdot \frac{1}{2}\lambda$ met n = 1, 2, 3, ...; in de figuur hierboven geldt: AZ = $\ell = 4 \cdot \frac{1}{2}\lambda = 2\lambda$
  - **op snaarlengte ℓ moet geheel aantal maal $\frac{1}{2}\lambda$ passen**

  verhouding van frequenties van de tonen
  - $f_{grondtoon} : f_{1e\ boventoon} : f_{2e\ boventoon} : \ldots = 1 : 2 : 3 : \ldots$

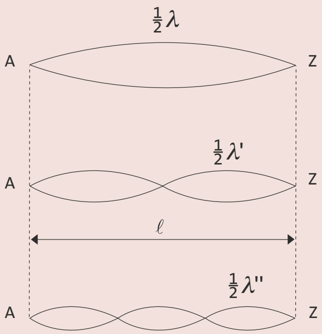
vervolg

staande golven vervolg

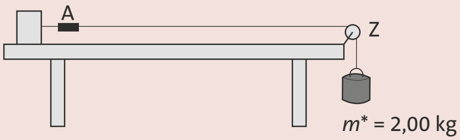
- *Op welk tijdstip na tijdstip T is er in koorddeel PQ sprake van destructieve interferentie?*
  Dat is op $t = 1\frac{1}{4}T$. Zie de figuur. In het gedeelte PQ zijn de heengaande en de teruggaande golf in tegenfase: ze doven elkaar uit.



staande golven bij snaren en snaarinstrumenten
Wanneer een vioolsnaar wordt aangestreken, gaat de snaar meerdere eigentrillingen tegelijk uitvoeren ⇒ de snaar resoneert tegelijk in meerdere tonen.



De belangrijkste toon is de grondtoon (1e figuur): op de snaar past dan $\frac{1}{2}\lambda$. Indien lengte ℓ van de snaar = $\frac{1}{2}\lambda$, dan heet de frequentie waarbij dit optreedt de *grondtoon* (f^*).
In 2e figuur past op ℓ $2 \cdot \frac{1}{2}\lambda'$; dit treedt op bij een frequentie $f' = 2 \cdot f^*$ en heet *eerste boventoon.*
In 3e figuur past op ℓ $3 \cdot \frac{1}{2}\lambda''$; dit treedt op bij een frequentie $f'' = 3 \cdot f^*$ en heet *tweede boventoon,* etc.



Een trilapparaat kan het beginpunt A van een snaar AZ verticaal op en neer laten trillen. Wanneer dit gebeurt, plant zich een golf voort door de snaar van A naar Z. Dit gebeurt met een bepaalde golfsnelheid v. Voor deze golfsnelheid blijkt de volgende formule te gelden:

$v = \sqrt{\dfrac{F_s}{(m/\ell)}}$ waarin F_s = spankracht in de snaar (veroorzaakt door de hangende massa m^*)

en $\dfrac{m}{\ell}$ is de massa van de snaar per meter snaarlengte.

- *Laat zien dat deze formule klopt wat de eenheden betreft.*
  Eenheden invullen: $\sqrt{\dfrac{\text{N}}{(\text{kg m}^{-1})}} = \sqrt{\dfrac{\text{kg} \cdot \text{m s}^{-2}}{(\text{kg m}^{-1})}} = \sqrt{\dfrac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \text{m s}^{-1}$ ⇒ resultaat is de eenheid van v
  ($\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m s}^{-2}$ volgt uit de wet $F = m \cdot a$; zie pag. 58 en zie Binas 4, bij ‘kracht’).
- *Bereken de spankracht in de snaar (zie fig.).*
  $F_s = F_{z\text{ op }m^*} = m^* \cdot g = 2{,}00 \cdot 9{,}81 = 19{,}6$ N
  De snaar AZ is 3,00 m lang en heeft een massa van 4,20 gram. Zie ook de figuur.
- *Bereken de snelheid van de golven in de snaar.*
  $F_s = 19{,}6$ N en $\dfrac{m}{\ell} = \dfrac{4{,}20 \cdot 10^{-3}}{3{,}00} = 1{,}40 \cdot 10^{-3}$ kg m^{-1} ⇒ $v = \sqrt{\dfrac{19{,}6}{1{,}40 \cdot 10^{-3}}} = 118$ m s^{-1}

vervolg

staande golven bij snaarinstrumenten vervolg

andere vaak voorkomende situatie

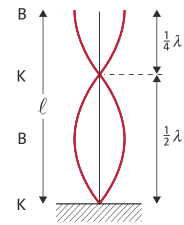
- **aan één kant ingeklemde staaf** kant waar staaf is ingeklemd is een knoop; het vrije uiteinde is een buik

  voorwaarde voor ontstaan van staande golven (twee gelijkwaardige formuleringen)

  - $\ell = (2n - 1) \cdot \frac{1}{4}\lambda$ met n = 1, 2, 3, ...; in de figuur hiernaast geldt: $\ell = \frac{3}{4}\lambda$ (n is dan gelijk aan 2)
  - **op staaflengte ℓ moet een geheel aantal $\frac{1}{2}\lambda$ + éénmaal $\frac{1}{4}\lambda$ passen**

  verhouding van frequenties van de tonen

  - $f_{\text{grondtoon}} : f_{\text{1e boventoon}} : f_{\text{2e boventoon}} : ... = 1 : 3 : 5 : ...$



- **$v = \lambda \cdot f$ geldt ook bij resonerende snaren** v is snelheid van de lopende golven in de snaar, die samen de staande golf vormen

staande golven bij blaasinstrumenten beschouw blaasinstrument als kolom waarin lucht kan trillen

resonerende luchtkolom kenmerkt zich door

- **knopen** luchtdeeltjes staan voortdurend stil

  treden op

  - **bij vaste uiteinden** want deeltje kan vlak bij wand niet heen en weer trillen: wand blokkeert en maakt één helft van trilling onmogelijk
  - **midden tussen twee buiken**
- **buiken** luchtdeeltjes trillen voortdurend maximaal op en neer

  treden op

  - **vlak bij openingen** plaats van buik valt niet precies samen met plaats van opening, maar ligt meestal iets buiten opening
  - **midden tussen twee knopen**
- **afstand knoop-buik = $\frac{1}{4}\lambda$**

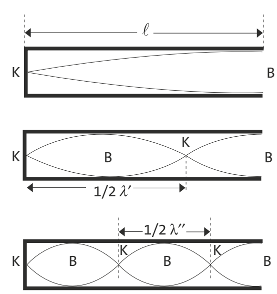
twee veelvoorkomende situaties

- **buis (lengte ℓ) met één open uiteinde en één dicht uiteinde** bij dicht uiteinde ligt een knoop; buik ligt iets buiten de opening

  er zijn allerlei eigentrillingen mogelijk

  - $\ell = \frac{1}{4}\lambda$ ⇒ grondtoon
  - $\ell = \frac{1}{2}\lambda' + \frac{1}{4}\lambda' = \frac{3}{4}\lambda'$ ⇒ 1^{e} boventoon
  - $\ell = 2 \cdot \frac{1}{2}\lambda'' + \frac{1}{4}\lambda'' = \frac{5}{4}\lambda''$ ⇒ 2^{e} boventoon

  enzovoort



B = buik: de lucht trilt heftig
K = knoop: de lucht trilt niet

  - **algemeen: $\ell = (2n - 1) \cdot \frac{1}{4}\lambda$** met n = 1, 2, 3, ...
  - $f_{\text{grondtoon}} : f_{\text{1e boventoon}} : f_{\text{2e boventoon}} : ... = 1 : 3 : 5 : ...$

vervolg

staande golven bij snaren en snaarinstrumenten vervolg

De snaar wordt zó in trilling gebracht dat hij voornamelijk gaat resoneren in de derde boventoon.

- *Bereken de frequentie van deze boventoon.*

  Derde boventoon $\Rightarrow$ op snaarlengte past $4 \cdot \frac{1}{2}\lambda \Rightarrow 2 \cdot \lambda = 3{,}00$ m $\Rightarrow \lambda = 1{,}50$ m

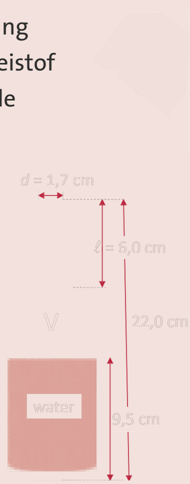
  Voor f geldt dan: $f = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{118}{1{,}50} = 78{,}7$ Hz

- *Wat gebeurt er, natuurkundig gezien, bij het stemmen van een gitaarsnaar?*

  Je verandert dan de F_s van de snaar. Stel, je maakt F_s groter $\Rightarrow v_{golven}$ groter, terwijl de snaarlengte constant blijft (dus ook $\lambda_{grondtoon}$ is constant) $\Rightarrow f$ groter, dus hogere toon.

staande golven bij luchtkolom

Een bierflesje is gedeeltelijk gevuld met water. Wanneer je boven de opening van het flesje blaast, hoor je een toon. Omdat de luchtkolom boven de vloeistof geen rechte vorm heeft, gelden niet de formules van de linker pagina. Bij de situatie van de fles blijkt te gelden:



$f_{grondtoon} = \dfrac{v}{2\pi} \cdot \sqrt{\dfrac{A}{V \cdot \ell}}$ met: v = geluidssnelheid (in m s^{-1}),

A = oppervlakte van de flesopening (in m^2), V = volume van de lucht in de fles (in m^3) en ℓ = lengte van de hals van de fles (in m).

De fles wordt voor 9,5 cm gevuld met water.

- *Hoe zou je, aan het eind van dit experiment, achter de grootte van het volume V kunnen komen?*

  Zet de deels gevulde fles op een weegschaal en meet hoeveel gram water je moet toevoegen totdat de fles vol is. Aantal gram = aantal cm^3 lucht.

  De flesopening heeft een diameter van 1,7 cm. De temperatuur is 20 °C.

- *Welke frequentie verwacht je voor de grondtoon, als de fles wordt aangeblazen en als nadien voor V gevonden is: V = 119 cm³? Zie ook gegevens in de figuur.*

  Voor de geluidssnelheid geldt: $v = 343$ m s^{-1}. Oppervlakte A is te berekenen met $A = \pi \cdot r^2 = \frac{1}{4}\pi \cdot d^2 = \frac{1}{4}\pi \cdot (1{,}7 \cdot 10^{-2})^2 = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$ m^2. Hieruit volgt voor $f_{grondtoon}$:

  $$f_{grondtoon} = \frac{v}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A}{V \cdot \ell}} = \frac{343}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2{,}3 \cdot 10^{-4}}{119 \cdot 10^{-6} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-2}}} = 3{,}1 \cdot 10^2 \text{ Hz}$$

- *Als je bij aanblazen inderdaad – ongeveer – deze frequentie meet, is de genoemde formule daarmee dan 'bewezen'?*

  Nee, dat is niet zo. Je moet dan f meten bij meerdere v's (A, V en ℓ constant), f meten bij meerdere A's (v, V en ℓ constant), etc.

- *Welke frequentie van de grondtoon zou je gevonden hebben als je de theorie van de linker pagina mag toepassen?*

  Dan geldt: hoogte luchtkolom = 22,0 – 9,5 = 12,5 cm. Deze afstand is gelijk aan $\frac{1}{4}\lambda$.

  $\Rightarrow \lambda = 50$ cm $\Rightarrow f_{grondtoon} = \dfrac{v}{\lambda} = \dfrac{343}{0{,}50} = 6{,}9 \cdot 10^2$ Hz; een heel andere uitkomst dus.

staande golven bij blaasinstrumenten vervolg

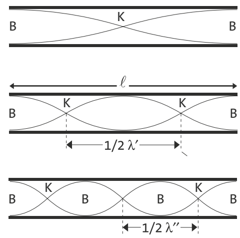
- **buis (lengte) met twee open uiteinden** iets buiten de open uiteinden liggen buiken

er zijn allerlei eigentrillingen mogelijk

- $\ell = \frac{1}{2}\lambda$ ⇒ grondtoon
- $\ell = 2 \cdot \frac{1}{2}\lambda' = \lambda'$ ⇒ 1^e boventoon
- $\ell = 3 \cdot \frac{1}{2}\lambda'' = \frac{3}{2}\lambda''$ ⇒ 2^e boventoon

enzovoort

- **algemeen:** $\ell = n \cdot \frac{1}{2}\lambda$ met n = 1, 2, 3, ...
- $f_{\text{grondtoon}} : f_{\text{1e boventoon}} : f_{\text{2e boventoon}} : ... = 1 : 2 : 3 : ...$



B = buik: de lucht trilt heftig

K = knoop: de lucht trilt niet

eigenfrequenties van luchtkolom berekenen via $\lambda = \frac{v}{f}$; λ bepalen door te tellen hoeveel golven in kolom passen; luchtkolommen hebben, evenals snaren, meerdere eigenfrequenties

staande golven bij blaasinstrument

Blaasinstrumenten worden eerst altijd ‘ingespeeld’ en daarna gestemd. Het instrument moet eerst op temperatuur worden gebracht.

- *Leg uit waarom.*

Na enige tijd blazen stijgt de temperatuur van het instrument en hiermee ook de temperatuur van de lucht in het instrument. Dus neemt de geluidssnelheid toe (Binas 15A)
$\Rightarrow$ de frequentie van de grondtoon stijgt. Het instrument kan anders vals klinken.

Een trompet wordt in gedachten gebogen tot een rechte buis en heeft dan een lengte ℓ. Aan de linkerkant zit het mondstuk; aan de rechterkant bevindt zich de kelk van de trompet.
Het is onmogelijk om op een trompet de grondtoon te spelen. De eerste en volgende boventonen zijn wel te spelen en vormen de natuurtonen van de trompet.
Deze natuurtonen hebben, gerekend vanaf de eerste boventoon, frequenties die gelijk zijn aan 233 Hz, 349 Hz, 466 Hz, 583 Hz, etc.
Bij een luchtkolom als deze zijn er twee mogelijkheden:

- mogelijkheid 1: mondstuk en kelk gedragen zich allebei als een buik
- mogelijkheid 2: het mondstuk gedraagt zich als een knoop en de kelk als een buik

- *Toon met behulp van de gegeven frequenties en de inleidende tekst aan dat je bij een trompet te maken hebt met de eerste mogelijkheid.*

Bij mogelijkheid 1 past op de lengte ℓ van de trompet $\frac{1}{2}\lambda$ of λ of $1\frac{1}{2}\lambda$ of 2λ etc.
Voor de verhouding van de frequenties van de boventonen geldt dan:
$f_{\text{grondtoon}} : f_{\text{1e boventoon}} : f_{\text{2e boventoon}} : f_{\text{3e boventoon}} : f_{\text{4e boventoon}} \ldots = 1 : 2 : 3 : 4 : 5 : \ldots$
(bij mogelijkheid 2 zou dat zijn 1 : 3 : 5 : 7 enz.) Dus geldt ook:
$f_{\text{1e boventoon}} : f_{\text{2e boventoon}} : f_{\text{3e boventoon}} : f_{\text{4e boventoon}} \ldots = 2 : 3 : 4 : 5 : \ldots$
Dit is de dezelfde verhouding als 233 : 349 : 466 : 583 $\Rightarrow$ mogelijkheid 1 is de juiste.

De temperatuur van de lucht in de trompet is ongeveer 30 °C. De buik ligt bij de eerste boventoon 4 cm rechts van de kelk.

- *Bereken de lengte van de rechte trompetbuis. Geef je antwoord in drie significante cijfers.*

Bij de eerste boventoon (233 Hz) is de lengte van de resonerende luchtkolom gelijk aan λ.
$v_{\text{geluid 30 °C}}$ ligt tussen 343 m s^{-1} en 354 m s^{-1} (Binas 15A) $\Rightarrow$ $v \approx 348{,}5$ m s^{-1} $\Rightarrow$

$\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{348{,}5}{233} = 1{,}50$ m $\Rightarrow$ lengte trompetbuis = 150 cm − 4 cm = 146 cm

dopplereffect bij geluid geluidsbron B beweegt naar stilstaande waarnemer W toe; waargenomen frequentie is hoger dan de frequentie van de bron; uitleg m.b.v. getallenvoorbeeld: v_{geluid} = 343 m s^{-1}; frequentie die bron produceert f_{bron} = 200 Hz

vergelijk situatie dat bron niet beweegt met situatie dat bron wel beweegt

- **bron B en waarnemer W staan beide stil** afstand BW = 343 m

  na 1 seconde geldt dan (zie fig. 1; niet op schaal)

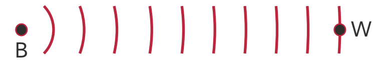
  

  fig. 1

  - **kop van de golf heeft waarnemer W bereikt**
  - **staart van de golf is op *t* = 1 s vanuit B vertrokken**
  - **tussen B en W bevinden zich 200 golven** W hoort de normale frequentie van 200 Hz

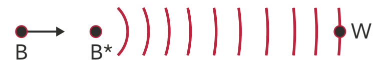
  

  fig. 2

- **bron B beweegt naar stilstaande waarnemer W toe** met snelheid 20 m s^{-1}

  na 1 seconde geldt dan (zie fig. 2, niet op schaal)

  - **kop van de golf (vanuit B vertrokken) heeft waarnemer W bereikt**
  - **staart van de golf is op *t* = 1 s vanuit B* vertrokken**
  - **tussen B* en W bevinden zich 200 golven** de golven lijken in elkaar gedrukt; de golflengte die W waarneemt is kleiner geworden in vergelijking met de eerste situatie (want B*W < BW) $\Rightarrow$ W neemt hogere frequentie waar dan f_{bron}

  merk op

  - **indien B van W af beweegt** dan gebeurt het tegenovergestelde: W neemt lagere frequentie waar dan f_{bron}

toepassingen

- **meting van bloedsnelheid** ultrasoon geluid reflecteert tegen bewegende rode bloedcellen; teruggekaatst geluid heeft andere frequentie; verschil tussen ingestraalde frequentie en teruggekaatste frequentie is een maat voor de bloedsnelheid
- **metingen van snelheid van voertuigen** bv. bij snelheidscontroles
- **metingen aan de snelheid van sterren** licht(golven) die sterren uitzenden vertonen ook dopplereffect; het uitgezonden licht krijgt een hogere frequentie als een ster de aarde nadert en een lagere frequentie als een ster van de aarde af beweegt (zie pag. 124)
- **sonarsystemen bij duikboten**

dopplereffect bij geluid verschijnsel dat de toonhoogte die een waarnemer hoort afhangt van de snelheid van de geluidsbron in de richting van de waarnemer (of omgekeerd: van de snelheid van de waarnemer in de richting van de geluidsbron).

Wanneer de waarnemer stilstaat en de geluidsbron beweegt, dan is de waargenomen frequentie f_W te berekenen met $f_W = \frac{v}{v \pm v_B} \cdot f_B$, waarin v = geluidssnelheid; f_B = frequentie van de bron en v_B = snelheid van de bron.

- *Leg uit wat het + of – teken (±) in de formule betekent.*

Wanneer de bron nadert, dan is $f_W > f_B \Rightarrow \frac{v}{v \pm v_B} > 1 \Rightarrow$ je moet rekenen met $\frac{v}{v - v_B}$
Wanneer de bron zich verwijdert, reken je in de noemer met $v + v_B$.

De sirene van een ambulance geeft o.a. een toon van 500 Hz. De ambulance rijdt met 90 km h^{-1} een straat in. De temperatuur is 20 °C.

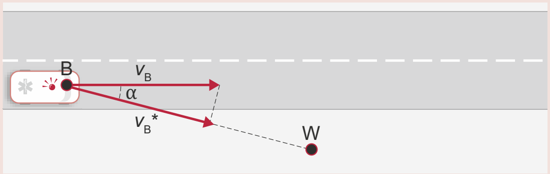
- *Bereken met de formule hierboven de waargenomen frequentie bij naderen en bij zich verwijderen.*

$$f_{W,\,nader} = \frac{v}{v \pm v_B} \cdot f_B = \frac{343}{343 - 25} \cdot 500 = 539 \text{ Hz en}$$
$$f_{W,\,verwijder} = \frac{v}{v \pm v_B} \cdot f_B = \frac{343}{343 + 25} \cdot 500 = 466 \text{ Hz}$$

Bovenstaande uitkomsten suggereren dat je slechts twee tonen hoort. In de praktijk hoor je een vloeiende overgang van 539 Hz naar 466 Hz.

- *Bedenk hiervoor een verklaring.*

Bovenstaande berekening geldt als de ambulance exact in jouw richting rijdt. Je zou dus midden op de weg moeten gaan liggen om slechts twee tonen te horen. Dat komt nooit voor.



Hiernaast zie je schematisch een situatie uit de praktijk getekend: waarnemer W staat op de stoep.

- *Leg uit hoe in dit geval f_w moet worden berekend. Geef een formule hiervoor.*

Het gaat om de component van v_B in de richting van W, dus om v_B^* (= $v_B \cdot \cos\alpha$). De formule wordt dus:
$$f_W = \frac{v}{v \pm v_B \cdot \cos\alpha} \cdot f_B$$

Wanneer hoort W de toon van 500 Hz als 500 Hz?
Dan bevindt de ambulance (B) zich recht voor W. Hoek α (zie formule hierboven) is dan 90° en cos 90° = 0; de formule wordt dan: $f_W = \frac{v}{v \pm v_B \cdot \cos\alpha} \cdot f_B = \frac{v}{v \pm 0} \cdot f_B = \frac{v}{v} \cdot f_B = f_B$
Dus: $f_W = f_B = 500$ Hz

9 789006 663921