

AKOESTIEK EN PSYCHO-AKOESTIEK

Johan Rijckaert

AKOESTIEK EN PSYCHO-AKOESTIEK



ACADEMIA PRESS

© Academia Press

Van Duyseplein 8

9000 Gent

Tel. 09 233 80 88 Fax 09 233 14 09

info@academiapress.be www.academiapress.be

Uitgeverij Academia Press maakt deel uit van Lannoo Uitgeverij, de boeken- en
multimediadivisie van Uitgeverij Lannoo nv.

Johan Rijckaert, Akoestiek en psycho-akoestiek

Gent, Academia Press, 2015, p. III + 162

ISBN 978 90 382 2563 0

D/2015/4804/157

NUR 890

U 2397

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of vermenigvuldigd door middel van druk,
fotokopie, microfilm of op andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming
van de uitgever.

Woord vooraf

De belangrijkste functie van het horen voor de mens is het verstaan van spraak. Het overgrote deel van de communicatie verloopt door middel van de gesproken taal. Bovendien verwerven we het gros van onze kennis, die we voor het functioneren in de maatschappij nodig hebben, via spraak. Vanuit dit standpunt zouden we geluid kunnen definiëren als de informatiedrager bij de gesproken taal. Het is echter niet eenvoudig een sluitende definitie van geluid te geven omdat geluid op verschillende manieren kan benaderd worden.

In de eerste plaats kan men zich de vraag stellen wat geluid als fysisch verschijnsel eigenlijk is, hoe het ontstaat en hoe het zich gedraagt. De tak van de fysica die de fysische aspecten van het geluid bestudeert noemen we de akoestiek.

In het geval van spraak vindt het geluid zijn oorsprong in het stemapparaat. Het mechanisme van de vorming van spraakklanken wordt behandeld in de fonetiek.

Geluid veroorzaakt in de meeste gevallen een geluidssensatie ter hoogte van het gehoororgaan van een waarnemer. Deze invalshoek heeft te maken met de fysiologie van het gehoor. In het oor wordt de geluidsdrukvariatie via het buitenoor en het middenoor naar het binnenoor overgebracht. Hierin bevinden zich de haarcellen die de eigenlijke geluidsreceptoren zijn. Een geactiveerde haarcel geeft een zenuwsignaal af dat, na verwerking in de hersenen, als geluid geïnterpreteerd wordt.

Eenmaal de omzetting van het akoestisch signaal in zenuwpulsen behandeld is komt als derde luik de beschrijving van het geluid op subjectieve basis. Gebruik makend van de psychofysica van het horen of kortweg de psycho-akoestiek proberen we de sensatie, uitgedrukt in subjectieve parameters zoals toonhoogte, luidheid, klankkleur, dynamiek, drempel e.d. te begrijpen.

Het feit dat we geluid ook soms als lawaai omschrijven, brengt met zich mee dat geluid in dergelijke gevallen ook vanuit ecologische hoek benaderd moet worden. In de sonometrie proberen we met objectieve parameters het subjectieve gedrag van geluid vast te leggen en aan vooropgestelde (wettelijke) regels te toetsen. Een onmiddellijk gevolg van deze problematiek is dat, geluidsbeheer met de bijhorende lawaaipreventie en sensibilisering, belangrijke domeinen zijn van de audioloog.

Belangrijk te beseffen is dat al deze aspecten met elkaar continue in interactie zijn en het daardoor niet mogelijk en ook niet altijd gewenst is elk van deze deelfacetten met betrekking tot het geluid in zijn verschillende schuifjes te behandelen.

Dit naslagwerk bevat de basiskennis akoestiek en psycho-akoestiek voor studenten audiologie en logopedie. Bij de opbouw is gekozen voor een overwegende beschrijvende aanpak. Waar mathematische verdieping een meerwaarde is, zijn uitbreidingsteksten (blauwe kaders) toegevoegd. Opdat de (autodidactische) lezer

zichzelf zou kunnen toetsen op inzichtelijk vlak en essentiële rekenvaardigheden zou kunnen verwerven zijn er een aantal denk- en rekenvragen (beige kaders) opgenomen.

Uiteraard zijn constructieve suggesties die tot een verbetering van dit naslagwerk kunnen leiden steeds welkom.

Bij deze realisatie wil ik graag een woord van dank richten aan de collega's van de afstudeerrichting audiologie aan de Arteveldehogeschool en in het bijzonder aan Griet de Smet en Myriam Claeys, voor de inhoudelijke en taalkundige bijsturingen.

Dank aan Hannes Rijckaert voor de hulp bij de ontwikkeling van de talloze figuren.

J. Rijckaert, 2015

Inhoudsopgave

1. Basisbegrippen uit de mechanica	
1.1 Scalaire versus vectoriële grootheden	1
1.2 Plaats of positie	2
1.3 Verplaatsing en afgelegde weg	3
1.4 Snelheid	3
1.5 Snelheid bij een eenparig cirkelvormige beweging	4
1.6 Versnelling	5
1.7 Versnelling bij een eenparig cirkelvormige beweging	6
1.8 Kracht	6
1.9 Druk	8
1.10 Arbeid	8
1.11 Energie	9
1.12 Vermogen	11
1.13 Trillingsmodellen	11
1.14 Semi-logaritmische grafieken	13
2. Harmonische trillingen	
2.1 Omschrijving van een HT	15
2.2 Bewegingsvergelijking van een HT	15
2.3 Grafische voorstelling van een HT	16
2.4 De kinematica van de HT	17
2.5 De eigenfrequentie van een HT	18
2.6 Het onderscheid tussen twee HT	19
2.7 Het superpositiebeginsel	21
2.8 Het samenstellen van HT met dezelfde frequentie	22
2.9 Het samenstellen van HT met een verschillende frequentie	24
2.10 Zwevingen	25
3. Niet-harmonische trillingen	
3.1 De gedempte trilling	27
3.2 De gedwongen trilling	28
3.3 Reactanties bij een trillend stelsel	30
3.4 Impedantie bij een trillend stelsel	31
3.5 Stijfheid- en massa-gedomineerd	33
3.6 De middenoorresponse	34
3.7 Begrippen uit de tympanometrie	35
4. Geluidsgolven	
4.1 Het begrip lopende golf	37
4.2 Fysische kenmerken van een lopende golf	38
4.3 De geluidsdruk van een geluidsgolf	39
4.4 De intensiteit van een geluidsgolf	40
4.5 De effectieve geluidsdruk (sound pressure)	41
4.6 Het geluidsniveau in dBSPL	42
4.7 Het verschil in geluidsniveaus	44
4.8 Het optellen en aftrekken van geluidsniveaus	44
4.9 Interferentie van twee geluidsgolven	46
4.10 Het oor als kamfilter	48
4.11 Terugkaatsing van geluidsgolven	49
4.12 Absorptie van geluidsgolven	50
4.13 Het middenoor als impedantie-aanpasser	51
4.14 De geluidsvelden in een gesloten ruimte	52
4.15 Diffractie van geluidsgolven	53
4.16 De oorschelp als low-pass filter	54
5. Complexe geluiden	
5.1 Soorten geluiden	57
5.2 Het principe van de Fourieranalyse	57
5.3 Het frequentiespectrum van een klank	60
5.4 Het frequentiespectrum van een witte ruis	60

5.5	Het frequentiespectrum van een bandruis	62
5.6	Het frequentiespectrum van een roze ruis	64
5.7	Het frequentiespectrum van clicks	65
5.8	Het frequentiespectrum van een toonstoot	67
6.	Resonantievolumes	
6.1	De terugkaatsing van een golf in een eindpunt	69
6.2	Staande golven in een trillende snaar	69
6.3	Resonantievolumes	71
6.4	Resonantiekromme van een luchtvolume	72
6.5	De bijdrage van resonantie bij horen	73
6.6	De bijdrage van resonantie bij klinkervorming	75
7.	Psycho-akoestische ervaring van toonhoogte	
7.1	De toonhoogte van een zuivere toon en een klank	77
7.2	Toonhoogtewaarnemen is een niet-lineair verschijnsel	78
7.3	Helderheid versus toonhoogte	80
8.	Psycho-akoestische ervaring van timbre en dynamiek	
8.1	Theorema van Helmholtz	83
8.2	Het timbre van een klank	84
8.3	De dynamiek van klanken	84
8.4	Invloed van de gassnelheid op het timbre	85
9.	Psycho-akoestische ervaring van geluidssterkte	
9.1	De sterkte van zuivere tonen	87
9.2	De gehoordrempel	87
9.3	Het onbehaaglijkheidsniveau	88
9.4	Het waarneembare geluidsniveau van zuivere tonen	89
9.5	Het luidheidsniveau van zuivere tonen	90
9.6	Het gehoorveld	91
9.7	Het audiogram	92
9.8	De sterkte van complexe geluiden	93
9.9	Gehoorgeschedigings door lawaai	95
10.	Maskeren	
10.1	Begrip maskering	97
10.2	Maskering van zuivere tonen door een smalbandruis	97
10.3	Maskering van zuivere tonen door een witte ruis	99
10.4	Niet simultane maskering	100
11.	Luidheid	
11.1	Luidheid van een zuivere toon	103
11.2	Effect van ruis op de luidheid	104
11.3	Luidheid van een tonencomplex	105
11.4	De kritische bandbreedte volgens Zwicker	106
11.5	Energie- en luidheidsommatie	108
11.6	De hypothese van Fletcher	110
12.	Differentiële drempels	
12.1	Het begrip differentiële drempel	113
12.2	Differentiële drempel voor geluidsintensiteit	114
12.3	Differentiële drempel voor frequentie	117
12.4	De tijdsfactor bij het waarnemen van geluid	119
13.	Binauraal horen	
13.1	Binaurale luidheidsommatie	123
13.2	Binauraal horen en oriëntatie	124
14.	Fysiologische aspecten van psycho-akoestiek	
14.1	Fysiologie van het buitenoor	125
14.2	Fysiologie van het middenoor	125
14.3	Anatomie van het binnenoor	128

14.4 Plaatstheorie van toonhoogtehooren.....	131
14.5 Tijdstheorie van toonhoogtehooren.....	135
14.6 De evolutie van het gehoororgaan.....	137
14.7 Het gedrag van het binnenoor bij twee gelijktijdige zuivere tonen	138
14.8 Het elektrisch gedrag van de gehoorzenuw.....	139
14.9 Het auditieve analysefilter.....	142
14.10 De signaalsterkte	145

BIJLAGEN

1. Oplossing vragen.....	147
2. Herhalingsoefeningen.....	153
3. Antwoorden op herhalingsoefeningen.....	156

INDEX

HOOFDSTUK 1

BASISBEGRIPPEN UIT DE MECHANICA

De fundamenteën van de akoestiek of de leer van het geluid liggen in de fysica en in het bijzonder in de mechanica. Het is bijgevolg evident dat voor een goed begrip van de akoestiek een aantal basisbegrippen uit de mechanica onontbeerlijk zijn.

1.1 Scalaire versus vectoriële grootheden

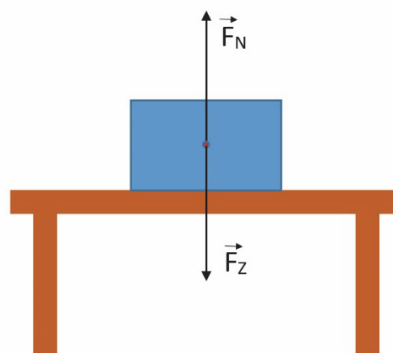
Bij wetenschappelijk onderzoek gaat men het gedrag van bepaalde variabelen en de onderlinge relatie tussen deze grootheden bestuderen. Het is hierbij nodig onderscheid te maken tussen scalaire en vectoriële grootheden.

Scalaire grootheden zijn volledig bepaald door een getalwaarde en een eenheid die samen de grootte van de fysische grootheid uitdrukken. Wanneer we bijvoorbeeld vragen een stuk touw van 35 cm af te knippen dan beschikken we over voldoende gegevens om die opdracht te kunnen uitvoeren. Lengte is een scalaire grootheid die volledig gedefinieerd is door haar maatgetal (hier 35) en haar eenheid (cm).

Vectoriële grootheden daarentegen zijn slechts bepaald wanneer hun grootte, richting, zin en eventueel hun aangrijpingspunt gekend zijn. Voor de eenvoud nemen we richting en zin samen in de term richting. Een vectoriële grootheid wordt grafisch weergegeven door middel van een pijl die de richting van de vector aanduidt. De lengte van de pijl is een maat voor de grootte van die vector.

“Verplaats de doos 2 meter”, is een opdracht die niet eenduidig uit te voeren is. Normaliter wordt van de opdrachtgever verwacht dat hij ook zegt naar waar (in welke richting) de doos moet verplaatst worden. Verplaatsing is duidelijk een vectoriële grootheid.

Ook kracht is een vectoriële grootheid.



Figuur 1: kracht is een vectoriële grootheid

In onderstaande figuur is duidelijk te zien hoe enerzijds de zwaartekracht $\vec{F}_Z$ verticaal naar beneden werkt terwijl het steunvlak een even grote maar tegengestelde reactiekracht $\vec{F}_N$ naar boven uitoefent. Merk op dat de krachtvector genoteerd wordt als $\vec{F}$ (vector F) terwijl de notitie F enkel de grootte van de kracht aanduidt.

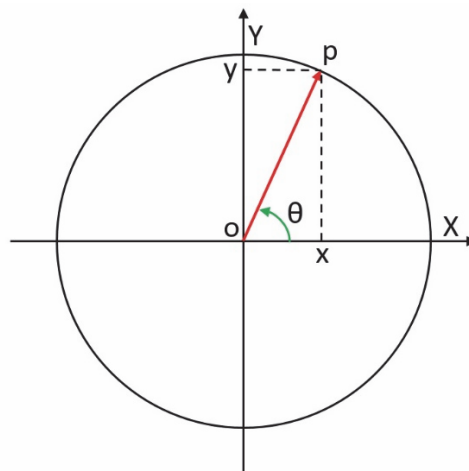
1.2 Plaats of positie

Lichamen worden vaak vereenvoudigd tot een punt dat alle massa van het beschouwde lichaam bevat. Zo 'n massa noemen we een puntmassa en stellen we voor door een massapunt P.

De plaats van een puntmassa wordt bepaald door de plaatsvector $\vec{r}$. Deze plaatsvector kan, in het vlak (2 dimensies), op twee manieren beschreven worden. We kunnen gebruik maken van een stel van cartesische coördinaten (x, y) of van een stel van poolcoördinaten (r, θ).

Met cartesische coördinaten zijn we goed vertrouwd. De positie van het punt wordt in dit geval bepaald door een horizontale positie x en een verticale positie y beide ten opzichte van een vrij gekozen referentiepunt o, de oorsprong.

Anderzijds is de plaats van een punt ook bepaald door de richting θ van diens drager en de afstand r, gemeten langs die drager ten opzichte van de oorsprong. De richting θ , gemeten in radialen (1 rad is ongeveer 57 graden), en de afstand r in meter noemen we samen de poolcoördinaten van het gekozen punt.



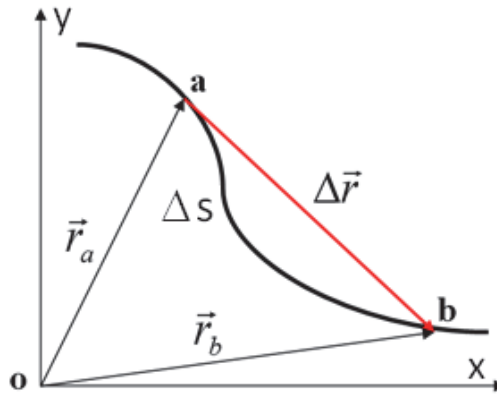
Figuur 2: cartesische en poolcoördinaten van een punt P

Het verband tussen cartesische coördinaten en poolcoördinaten wordt gegeven door

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \theta \\ y = r \cdot \sin \theta \end{cases} \quad \text{en} \quad \begin{cases} r^2 = x^2 + y^2 \\ \tan \theta = y/x \end{cases}$$

1.3 Verplaatsing en afgelegde weg

Stel dat een deeltje beweegt langs een kromlijnige baan van punt a naar punt b in een tijdsspanne $\Delta t = t_b - t_a$ waarbij t_a en t_b de tijdstippen zijn waarop het deeltje respectievelijk in a en in b is. Bekijk nu aandachtig de volgende figuur. Het mag duidelijk zijn dat de afgelegde weg Δs de afstand is die gemeten wordt langs de baan ab in dit geval totaal verschillend is van de verplaatsing $\Delta \vec{r}$ die de afstand ab in "vogelvlucht" weergeeft.



Figuur 3: verplaatsing en afgelegde weg

1.4 Snelheid

De snelheid wordt gedefinieerd als het tempo waarmee de plaats wijzigt en wordt derhalve uitgedrukt in meter per seconde (m/s).

Legt een auto in precies 1 uur tijd een weg af van 50 km dan is de gemiddelde snelheid v_g van deze wagen over het gegeven traject 50 km/h.

$$v_g = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Toch is het weinig waarschijnlijk dat gedurende het ganse traject de snelheid 50 km/h bedroeg. De tijdsspanne van 1 uur is te groot om te mogen aannemen dat de auto met een constante snelheid reed.

Bij een snelheidscontrole met een "speed gun" wordt de afgelegde weg gedurende een zeer korte tijdsspanne gemeten. Dit tijdsinterval is zo klein dat men in dit geval kan spreken van de ogenblikkelijke snelheid v .

Deze situatie wordt wiskundig geformuleerd als de limiet van de gemiddelde snelheid in een infinitesimaal klein tijdsinterval ($\Delta t \rightarrow 0$). Per definitie stelt deze limiet de afgeleide voor van de afgelegde weg s naar de tijd t .

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

Vergelijken we deze formule met deze van de gemiddelde snelheid dan kan men hieruit afleiden dat de differentiaalnotities ds en dt equivalent zijn met respectievelijk een infinitesimaal kleine verplaatsing Δs en een infinitesimaal kleine tijdsspanne Δt .

1.5 Snelheid bij een eenparige cirkelvormige beweging

Bij een eenparig cirkelvormige beweging (ECB) doorloopt het deeltje met een constante baansnelheid v , een cirkelvormige baan met straal r .

De tijd nodig voor één volledige omloop of cyclus noemen we de periode T (in s).

De lengte van de baan is in dit geval de omtrek van de cirkel. Omdat de baansnelheid constant is geldt voor een ECB

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

Uit de periode kan men heel gemakkelijk het aantal cycli per seconde berekenen. Stel dat de omlooptijd van een deeltje 0,050 s bedraagt dan zal het in staat zijn 20 keer per seconde de volledige omtrek te doorlopen. Het aantal cycli per seconde duidt men aan met de term frequentie. De dimensie van frequentie is “cycli per seconde” (cps) of de hertz (Hz).

Uit bovenstaand voorbeeld kunnen we besluiten dat het verband tussen de periode T en de frequentie f gegeven wordt door

$$f = \frac{1}{T}$$

Dit betekent dat de uitdrukking voor baansnelheid bij een ECB kan geschreven worden als

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot f$$

Terwijl een deeltje een ECB uitvoert verandert, samen met zijn positie op de omtrek, ook de rotatiehoek θ . De hoeksnelheid ω wordt gedefinieerd als het tempo waarmee de hoek θ verandert.

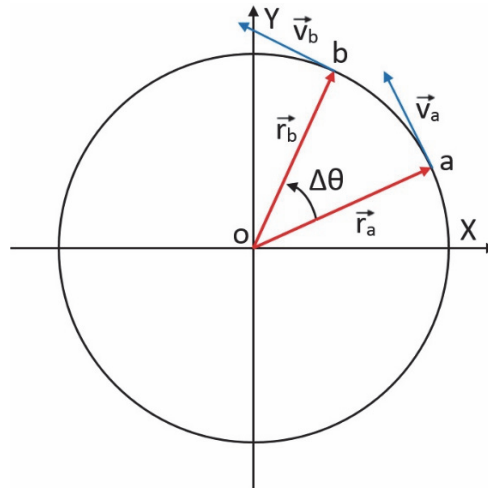
$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

Een volledige cirkel meet 360° . Binnen de fysica moet men hoeken uitdrukken in radialen waarbij 360° gelijk is aan $2 \cdot \pi$ (6,28) radialen. Bijgevolg is de dimensie van hoeksnelheid, radialen per seconde (rad/s).

$$\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Nemen we nog eens als voorbeeld het deeltje met een omlooptijd van 0,050 s dan heeft dit een hoeksnelheid 126 rad/s.

Zoals de volgende figuur laat zien is de baansnelheid een vectoriële grootheid die op elk moment rakend is aan de cirkelvormige baan van de ECB. Ook de hoeksnelheid is een vector. Deze staat in het punt o, loodrecht op het vlak en komt naar voor (uit het blad) voor een rotatie in tegenwijzerzin.



Figuur 4: baansnelheid bij een ECB

1.6 Versnelling

De versnelling a wordt gedefinieerd als het tempo waarmee de snelheid wijzigt. Hieruit volgt dat de dimensie van versnelling, meter per seconde per seconde is of kortweg m/s^2 .

Wanneer een auto in een tijdsspanne van 10 s zijn snelheid opdrijft van 20 m/s naar 25 m/s dan kan men stellen dat de wagen een versnelling van $0,5 \text{ m/s}^2$ heeft ondergaan. Toch is het weinig waarschijnlijk dat gedurende de ganse periode de snelheid op dezelfde wijze toenam. Op het ogenblik dat er bijvoorbeeld moet geschakeld worden onderbreekt men even het versnellen. De gegeven waarde is bijgevolg opnieuw een gemiddelde.

$$a_g = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Evenals bij de snelheid kan men de versnelling gedurende een zeer korte tijdsspanne ($\Delta t \rightarrow 0$) meten met als resultaat de ogenblikkelijke versnelling.

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Hieruit blijkt dat de ogenblikkelijke versnelling de afgeleide is van de snelheidsfunctie naar de tijd.

1.7 Versnelling bij de eenparig cirkelvormige beweging

Is er een versnelling bij een ECB? Zoals de naam het zelf zegt is de ECB een eenparige beweging wat impliceert dat de snelheid op elk moment even groot is. Maar door het feit dat de snelheid een vectoriële grootheid is, is niet alleen de grootte maar ook de richting van de snelheidsvector van belang. Omdat, van punt tot punt, de raaklijn aan de cirkel van richting verandert, varieert ook steeds de richting van de snelheid. Dit heeft tot gevolg dat, omwille van die richtingsverandering, de ECB wel degelijk een versnelling kent!

Berekeningen laten toe aan te tonen dat de versnelling, die verantwoordelijk is voor deze continue verandering van de richting van de snelheidsvector, steeds naar het centrum gericht is.

Dit leidt voor de ECB tot volgende conclusies.

- Tangentieel is Δv nul wat betekent dat er geen tangentiële versnelling is. M.a.w. de grootte van de snelheid is constant.
- Radiaal is Δv verschillend van nul wat betekent dat er een centripetale versnelling is. Omdat de snelheid steeds op dezelfde wijze van richting verandert (cirkelvormige baan), stelt men dat er een constante centripetale (naar het middelpunt gericht) versnelling is. Deze is verantwoordelijk voor de constante kromming van de cirkelvormige baan.

1.8 Kracht

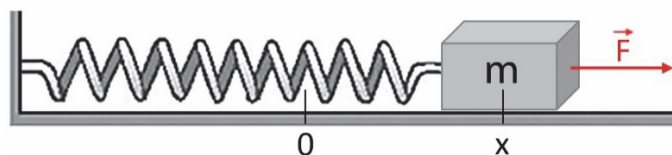
Een kracht $\vec{F}$ is vaak oorzaak van vervorming of van een verandering in de bewegingstoestand (versnellen-vertragen, baan krommen). Kracht wordt gemeten in newton (N) waarbij $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$.

De aarde is omgeven door een gravitatieveld. Hiermee wordt bedoeld dat de aarde op elke massa m in haar onmiddellijke omgeving een zwaartekracht uitoefent. Nemen we aan dat de gravitatieveldsterkte $9,81 \text{ N/kg}$ bedraagt dan kunnen we stellen dat een massa van 100 g een zwaartekracht van ongeveer 1 N ondervindt.

$$F_z = m \cdot g = 0,100 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg} \approx 1 \text{ N}$$

Elastische vervormingen worden beschreven door de wet van Hooke. Deze bepaalt dat de kracht F die nodig is om een veer (binnen haar elasticiteitsgebied) over een afstand x uit te rekken niet constant is maar lineair toeneemt naarmate men de veer verder uitrekt

$$F = k \cdot x$$



Figuur 5: de elastische vervorming van een veer t.g.v. een externe kracht

In dit geval veroorzaakt de kracht een vervorming van de veer. De veerconstante of stijfheid k (in N/m) drukt uit hoe star of hoe stijf de veer is. Hoe stijver de veer, hoe groter k is. Merk op dat er ten gevolge van de trekkracht $F = k \cdot x$ een even grote maar tegengestelde terugroepende reactiekracht $F_v = -k \cdot x$ in de veer optreedt.

Laat men een gespannen veer los dan zal zij onder invloed van de veerkracht de massa m in beweging brengen, volgens de tweede wet van Newton.

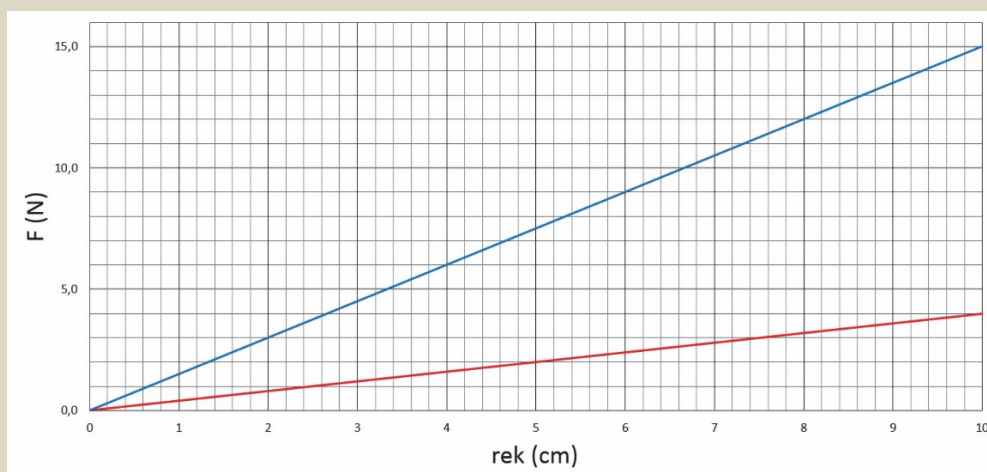
$$F = m \cdot a$$

De veerkracht F_v veroorzaakt dus niet enkel een vervorming van de veer maar is ook verantwoordelijk voor een verandering in de bewegingstoestand van de gekoppelde massa m . Concreet betekent dit dat tijdens de trilling de snelheid van de massa steeds verandert.

VRAAG 1

Onderstaande grafiek toont het gedrag van twee veren met respectieve stijfheden k_1 (oranje) en k_2 (blauw) die elastisch uitgerekt worden over een afstand x .

- Waarom verschillen deze twee veren van elkaar?
- Welk mathematisch verband bestaat er tussen beide stijfheden?



Figuur 6: het gedrag van 2 veren binnen bij een elastische rek

1.9 Druk

Algemeen wordt de druk p gedefinieerd als de kracht F die loodrecht op een oppervlak S werkzaam is.

$$p = \frac{F}{S}$$

Het best is men vertrouwd met het begrip hydrostatische druk zoals we die ervaren wanneer we naar de bodem van een zwembad duiken. Deze druk is het gevolg van een vloeistofkolom die zich boven ons bevindt zodat deze druk recht evenredig is met de hoogte van de kolom. Hoe hoger de vloeistofzuil is, hoe groter de hydrostatische druk is. Dit verklaart waarom we oorsuizingen krijgen wanneer we op een grotere diepte gaan zwemmen.

Het doortrekken van deze redenering naar gasen toe is volledig fout! De druk in gasen is niet het gevolg van de statische eigenschappen van een ‘gaszuil’ maar is te wijten aan het kinetische gedrag van de gasmoleculen.

Inderdaad, gasmoleculen opgesloten in een vat (lucht in fietsband), botsen voortdurend tegen de wanden van het vat. Hierdoor oefenen zij op die wanden elementaire krachtjes uit die resulteren in de globale gasdruk in het vat. Deze gasdruk p hangt af van:

- de hoeveelheid gasmoleculen die in het vat aanwezig zijn
- de middelbare snelheid van de gasmoleculen (zelf functie van de temperatuur T)

Dat er op grote hoogte minder luchtdruk heerst, heeft dus niets te maken met het feit dat de ‘luchtzuil’ die op je hoofd staat kleiner is maar vindt zijn verklaring in het feit dat de lucht er ijler is. Bovendien is het op grote hoogte kouder. Met andere woorden, minder gasmoleculen en een lagere temperatuur veroorzaken een lagere luchtdruk.

Druk wordt volgens de S.I. eenheden gemeten in pascal (Pa) waarbij $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Druk is echter van zo ‘n groot technisch belang dat er naast de pascal nog tal van andere eenheden in gebruik zijn. De belangrijkste zijn: $1 \text{ atm} = 1013 \text{ hPa}$ en $1 \text{ bar} = 1000 \text{ hPa}$

1.10 Arbeid

Wanneer een deeltje o.i.v. een constante kracht F_x (langs de x-as) een verplaatsing Δx veroorzaakt dan definieert men de arbeid W ten gevolge van deze kracht als

$$W = F_x \Delta x$$

Arbeid wordt gemeten in joule: $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$

Voor een kracht $F(x)$ die functie is van de plaats (dus niet constant is) dient men de verplaatsing Δx op te delen in elementaire verplaatsingen dx . De totale arbeid W wordt bekomen door al deze elementaire stukjes arbeid $dW = F(x).dx$ te sommeren (te integreren) over de totale afgelegde weg.

$$W = \int_0^x dW = \int_0^x F(x).dx$$

Uitbreiding

Dit laatste kunnen we duidelijk illustreren aan de hand van de arbeid die nodig is om een veer vanuit haar evenwichtsstand over een afstand x uit te rekken.

$$W = \int_0^x F(x).dx = k \int_0^x x.dx = k \cdot \left[\frac{x^2}{2} \right]_0^x = \frac{k \cdot x^2}{2}$$

1.11 Energie

Energie is misschien een van de meest gebruikte begrippen uit de fysica en toch is het bijzonder moeilijk een eenvoudige definitie voor energie te geven. Eerst en vooral moeten we beseffen dat energie een toestand is. Een systeem bezit een hoeveelheid energie. Hoe meer energie een systeem bezit hoe meer het systeem in staat is “iets te doen”. Een zware steen op grote hoogte is een grotere bedreiging dan een lichte steen op kleine hoogte. De eerste bezit meer potentiële energie dan de tweede. Een vrachtwagen aan 100 km/h is bij een botsing een grotere bedreiging dan een mug aan 2 km/h. De eerste bezit meer kinetische energie dan de tweede.

Uit bovenstaande mag blijken dat arbeid en energie sterk met elkaar verbonden zijn.

$$W = \Delta E$$

Deze uitdrukking moet als volgt gelezen worden:

- wordt er arbeid geleverd op een stelsel dan neemt de energie van het stelsel toe.
- wordt er arbeid geleverd door een stelsel dan neemt de energie van het stelsel af.

Een onmiddellijk gevolg hieruit is dat energie en arbeid dezelfde dimensie hebben en dus ook energie gemeten wordt in joule.

Vaak wordt onderscheid gemaakt tussen kinetische en potentiële energie.

Kinetische energie (EK) van een deeltje met massa m vindt haar oorsprong in de snelheid v dat het deeltje heeft. Men kan aantonen dat de kinetische energie van translatie gegeven wordt door

$$EK = \frac{m.v^2}{2}$$

Potentiële energie (EP) daarentegen heeft te maken met de toestand of de positie van het beschouwde systeem. Bijvoorbeeld een steen op een zekere hoogte, een gespannen boog, een slinger uit zijn evenwichtspositie, een ion in een elektrisch veld, enz. Het mag duidelijk zijn dat door de verscheidenheid aan toestanden er meerdere expressies voor potentiële energieën bestaan. Nuttig om weten is dat energievormen in elkaar kunnen omgezet worden maar dat hierbij voor een geïsoleerd stelsel op elk ogenblik de totale energie constant is. Men noemt dit de wet van behoud van energie.

Beschouw bij wijze van voorbeeld een wrijvingsloze elastische slinger (een veer met een gekoppelde massa). Brengt men de massa uit zijn evenwichtsstand door de veer uit te rekken, dan moet hiervoor arbeid op het stelsel verricht worden en verkrijgt het potentiële energie ten gevolge van de (terugroepende) veerkracht.

Laat men de massa vanuit dit uiterste punt A (de amplitude) los dan gaat ze bewegen door de spankracht in de veer. Hierbij neemt de spankracht af (EP daalt) en de snelheid toe (EK stijgt) tot in de evenwichtspositie. In het evenwichtspunt is alle EP omgezet in EK. Er is geen spankracht meer, de snelheid is nu maximaal.

$$EK = \frac{m.v^2}{2} \text{ (maximaal) en } EP = 0$$

Voorbij het evenwichtspunt bouwt de spankracht zich opnieuw op (EP stijgt) naarmate de massa haar andere uiterste punt nadert terwijl het deeltje aan snelheid verliest (EK daalt). In het uiterste punt -A (de amplitude) is de EK nul en de EP maximaal. In beide amplitudepunten geldt

$$EP = \frac{k.A^2}{2} \text{ (maximaal) en } EK = 0$$

Indien er geen wrijving was, zou deze beweging blijven doorgaan. Deze geïdealiseerde situatie noemt men een ongedempte trilling.

Bij een gedempte trilling is er wrijving. Wrijving veroorzaakt opwarming van het systeem en zijn omgeving. De trilling gaat na verloop van tijd stilvallen en de mechanische energie is verdwenen. Uit dit eenvoudig voorbeeld blijkt dus dat mechanische energie zich kan omzetten in thermische energie of warmte.