

NATUURKUNDE 6DE JAAR

SEMESTER 1

Inhoudsopgave

0	Inleiding	0.1
0.1	Inleiding	0.1
1	Vectoren	1.1
1.1	Het begrip vector	1.1
1.2	Voorstelling en notatie	1.2
1.3	Bewerkingen met vectoren	1.3
1.3.A	Oefeningen vectoren reeks 1	1.8
1.3.B	Oefeningen vectoren reeks 2	1.10
1.3.C	Oefeningen vectoren reeks 3	1.12
2	Basisbegrippen van de kinematica	2.1
2.1	Inleiding	2.1
2.2	Het referentiestelsel	2.3
2.3	De positie	2.4
2.4	De snelheid	2.9
2.5	De versnelling	2.14
2.6	Oefeningen kinematica	2.18
3	Eendimensionale bewegingen	3.1
3.1	Inleiding	3.1
3.2	Eenparige rechtlijnige beweging	3.2
3.3	Eenparige versnelde rechtlijnige beweging	3.3
3.4	Oplossingsstrategie	3.5
3.5	Verticale worp	3.6
3.6	Oefeningen	3.8
3.6.A	Denkvragen	3.9
3.6.B	Vraagstukken	3.12
3.6.C	Vraagstukken vrije val	3.17
4	Tweedimensionale bewegingen	4.1
4.1	Inleiding	4.1
4.2	Het onafhankelijkheidsbeginsel	4.2
4.3	De eenparig cirkelvormige beweging	4.3

4.3.1	Enkele begrippen	4.3
4.3.2	Kinematica van de cirkelbeweging	4.4
4.4	De horizontale worp	4.7
4.5	Oefeningen tweedimensionale bewegingen	4.9
5	Dynamica: De wetten van Newton	5.1
5.1	Inleiding	5.1
5.2	De eerste wet van Newton	5.2
5.3	De tweede wet van Newton	5.3
5.4	De derde wet van Newton	5.6
5.5	Oefeningen Wetten van Newton	5.8
5.5.A	Denkvragen	5.9
5.5.B	Vraagstukken	5.10
6	Toepassing wetten van Newton	6.1
6.1	Inleiding	6.1
6.2	Algemeen (heuristiek)	6.2
6.3	Verschillende soorten krachten	6.3
1	De magnetische kracht of Lorentzkracht (veldkracht)	6.7
6.4	Dynamica van de ECB	6.11
7	De gravitatiekracht	7.1
7.1	De wetten van Kepler	7.1
7.2	De universele gravitatiekracht	7.2
7.3	Satellietbanen	7.3
7.3.1	Parkeerbaan	7.3
7.3.2	Geostationaire baan	7.3
7.4	Gewicht	7.5
7.5	De zwaartekracht	7.6
7.5.1	De valversnelling	7.6
8	Arbeid en Energie	8.1
8.1	Inleiding	8.1
8.2	Arbeid geleverd door een constante kracht	8.2
8.3	Arbeid geleverd door een niet-constante kracht	8.3
8.4	Het arbeid-energietheorema	8.5
8.5	Elastische potentiële energie	8.7

8.5.1	Elastische potentiële energie	8.7
8.6	Gravitationele potentiële energie	8.9
8.6.1	Gravitationele potentiële energie	8.9
8.7	Gravitationele potentiële energie, algemeen	8.11
8.7.1	Gravitationele potentiële energie, algemeen	8.11
8.8	Referentiepunt van de potentiële energie	8.12
8.8.1	Referentiepunt van de potentiële energie	8.12
8.9	Potentiële energie	8.13
8.9.1	Potentiële energie	8.13
8.10	Het beginsel van behoud van energie	8.14

0.1 Inleiding

0.1 Inleiding

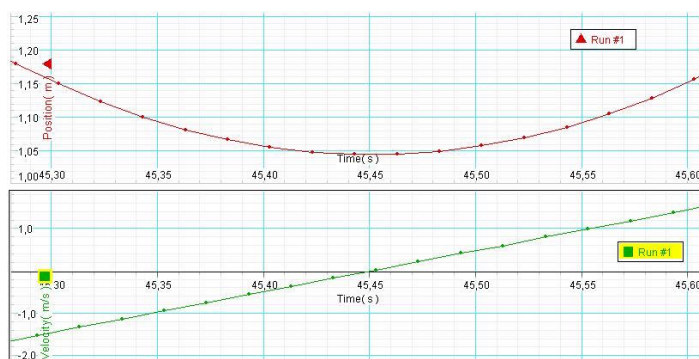
Als je met een keu tegen een biljartbal stoot, vliegt de bal vooruit. We kennen niet zomaar de ervaring waar de bal dat uit zichzelf doet; de stoot is nodig om de bal in beweging te brengen. De overgang van rust naar beweging is m.a.w. het *gevolg* van de stoot of de stoot is te zien als de *oorzaak* van de bewegingsverandering. De ontstane beweging is dan ook te *verklaren* vanuit de stoot.

Voor de moderne wetenschap is deze beschrijving en verklaring echter niet voldoende.¹

Ze is enkel *kwalitatief*. Dat wil zeggen, ze beschrijft het verschijnsel slechts in algemene termen maar niet in meetbare grootheden. Voor de beschrijving willen we niet alleen weten *dát* de bal beweegt maar ook *hóe* ze dat doet. Voor de verklaring is een 'stoot geven' niet genoeg, we willen uit de grootte van de kracht en uit de hoek waaronder dit gebeurt, kunnen berekenen hoe de bal vooruit zal gaan. Willen we dus iets verklaren dan hebben we nood aan een *kwantitatieve* beschrijving en verklaring. De beweging moeten we met meetbare grootheden kunnen uitdrukken en de fysische wetmatigheid die de relatie tussen kracht en de daaruit volgende beweging geeft, moet in formulevorm uit te drukken zijn.²

Als de kracht de oorzaak is van de bewegingsverandering, hoe zit het dan precies met die relatie? Gegeven een kracht, wat is dan de beweging? Om deze vraag deels³ te beantwoorden bekijken we drie voorbeelden.

Als je stopt met trappen op de fiets, bol je uit. Je zou dit kunnen verklaren door te stellen dat voorwerpen naar rust streven. Deze verklaring loopt echter al snel mank wanneer je ze wil toepassen op bijvoorbeeld de Voyager 1. Deze ruimtesonde bevindt zich bijna buiten ons zonnestelsel en vliegt met een duizelingwekkende snelheid van meer dan $61\,000\text{ km h}^{-1}$ de interstellaire ruimte tegemoet. Ze valt niet stil en heeft bovendien geen brandstof nodig om voort te blijven gaan. Het uitbollen met de fiets en het blijven voortgaan van de ruimtesonde verklaren we met de wet van de traagheid. Wanneer je stopt met trappen wil je de verkregen beweging aanhouden maar de wrijvingskracht houdt dit tegen. In de ruimte is er geen wrijving zodat objecten kunnen blijven bewegen, zonder dat daarvoor een kracht nodig is.



Figuur 1: Experimenteel bekomen grafieken van een verticale worp

Als we een appel laten vallen zal de zwaartekracht ervoor zorgen dat de appel naar de aarde valt. Wanneer we bovendien de snelheid meten, zien we dat deze snelheid toeneemt en wel op een constante manier. Dat wilt zeggen dat de *verandering in snelheid* steeds gelijk is. Er komt per tijdseenheid steeds evenveel snelheid bij. De appel valt sneller en sneller, maar de mate waarin dat gebeurt, is constant. Gooien we

¹Voor Aristoteles (384-322 v.C.) waren vier oorzaken nodig om de werkelijkheid te kunnen verklaren. Ten eerste heeft de biljartbal een *materiële oorzaak*. Zonder materie is er geen bal. Ten tweede moet er een *formele* of *vormelijke oorzaak*. De bal is rond of het zou niet over een biljartbal kunnen gaan; de vorm is essentieel om over een bal te kunnen spreken. Bovendien kan materie niet zonder vorm bestaan. Ten derde moet er een *bewerkende oorzaak* zijn; de beweging van de bal is het gevolg van de stoot met de keu. Als laatste oorzaak moet er een *doeloorzaak* zijn. De beweging vindt maar plaats met een bepaald doel, nl. het willen potten van de bal. Het is maar omdat je de bal wilt potten dat de beweging plaatsvindt. Niemand zal met keus in het wilde weg beginnen stoten tegen ballen op biljarttafels. Daarvoor moet bovendien al het spel eerst gemaakt worden met het oog op ontspanning.

²Voor de moderne wetenschap is zeker de doeloorzaak niet meer van toepassing. We verklaren niet in termen van 'waarom' maar eerder met 'waardoor'. Een bijkomend en cruciaal element is ook de vraag naar een kwantitatieve beschrijving.

³Het volledige antwoord is terug te vinden in hoofdstuk ??.

0.1 Inleiding

hem op, dan zien we dat zwaartekracht en snelheid een tegengestelde zin hebben. De zwaartekracht zorgt dus duidelijk niet voor de beweging omhoog (de appel blijft omhoog gaan) maar voor een vertraging van de beweging. De snelheid waarmee de appel omhoog beweegt, neemt af. Ook hier zien we – nadat we meten – dat de snelheid gelijkmatig afneemt. De snelheid waarmee de appel per tijdseenheid afneemt, is steeds gelijk. Of de appel nu snel gaat of traag, de mate van afname is steeds gelijk. We kunnen dus concluderen dat de zwaartekracht voor een verandering van bewegingstoestand zorgt; de snelheid blijft niet hetzelfde. We zien zelfs dat die verandering van de snelheid gelijkmatig is. De constante zwaartekracht zorgt blijkbaar voor een constante verandering van de snelheid.

Als je kijkt naar een koppel schoonschaatsers, dan zie je naast een fantastische prestatie en een mooi schouwspel, dat een kracht niet altijd voor een toename of afname in de grootte van de snelheid hoeft te zorgen.



Figuur 2: Een prachtig schouwspel...

De jongen in de figuur moet duidelijk een kracht uitoefenen om het meisje dat rond hem draait, bij te houden. De kracht die nu wordt uitgeoefend, dient niet zozeer voor het veranderen van de *grootte* van de snelheid dan wel voor het veranderen van de *richting* van de snelheid. Op elk moment verandert de richting van de snelheid, en dit naar de jongen toe – volgens de richting en zin van de kracht.

We kunnen concluderen dat een kracht niet zozeer invloed uitoefent op de snelheid dan wel op de *verandering* van de snelheid. Deze verandering houdt zowel een verandering van grootte en/of een verandering van richting in. Bovendien blijkt uit de laatste twee voorbeelden dat de verandering te associëren is met de kracht; de verandering is in de richting en zin van de kracht. Snelheid is te beschrijven als een vector en verandering van grootte en/of richting vallen beide onder het veranderen van de vector. Als we die verandering versnelling noemen, lijkt er een relatie te zijn tussen de kracht en de versnelling – tussen de oorzaak en het gevolg...

In hoofdstuk 1 bekijken we *vectoren* als voorkennis om fysische objecten te beschrijven. In hoofdstuk 2, 3 en 4 bekijken we het formalisme om bewegingen te *beschrijven*. Dit onderdeel noemen we **kinematica**. In hoofdstuk 5 en 6 behandelen we dan het *verklarende* principe achter de beweging. Dit noemen we **dynamica**. Het geheel – kinematica en dynamica – noemen we **mechanica**.

1.1 Het begrip vector

1.1 Het begrip vector

De natuurkunde beschrijft de niet levende natuur met grootheden die worden opsplijst in twee categorieën: scalaire grootheden (scalars) en vectoriële grootheden (vectoren). Grootheden die de vraag kunnen oproepen: "Naar waar gericht?" zijn vectoren, grootheden waarbij die vraag geen antwoord heeft, zijn scalars. Dit onderscheid en een correcte omgang met beiden zijn ontzettend belangrijk in fysica.

Stel dat *een helikopter vliegt met een snelheid van 40 km h^{-1}* . Vraag: "Naar waar?" Antwoord: "Naar het zuiden, naar Brussel, naar omhoog, schuin naar onderen, ..." Er zijn vele betekenisvolle antwoorden mogelijk. Snelheid is een vector. Als *het zwembadwater een temperatuur van 27°C heeft*, is er geen zinnig antwoord op de vraag *naar waar?*. Temperatuur is een scalar.

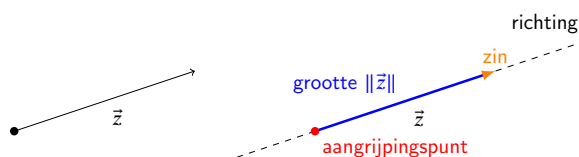
Een vectoriële grootheid heeft drie variabele kenmerken: grootte, richting en zin. Voorbeeld: de helikopter vliegt aan 40 km h^{-1} , horizontaal en naar het zuiden. Een scalaire grootheid heeft slechts één kenmerk: de grootte (waarin soms ook een teken vervat zit). Voorbeeld: een sneeuwbal heeft een temperatuur van -10°C .

De plaats waarop de vector van toepassing is, noemt men het aangrijpingspunt van de vector.

1.2 Voorstelling en notatie

1.2 Voorstelling en notatie

Vectoren worden grafisch voorgesteld met een pijl. Een vectoriële grootheid wordt genoteerd met $\vec{z}$, $\vec{a}$, $\vec{x}$, ... en wordt altijd bij de pijl gezet ter benoeming. Om duidelijk te maken dat het telkens om een vector gaat wordt een pijltje boven de letter geplaatst. Zonder de vector te benoemen stelt de pijl geen vector voor (en kan het dus evengoed een echte pijl afgeschoten door een boog zijn)! De pijl geeft alle kenmerken die een vector vastleggen weer.



Figuur 3: De vector $\vec{z}$ met zijn kenmerken.

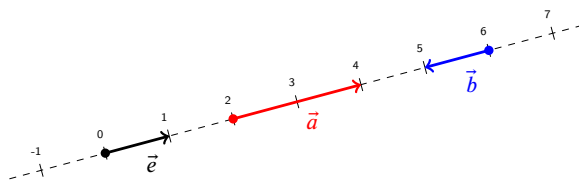
Aan de zin van een vector wordt wiskundig een teken gekoppeld dat afhangt van de gekozen referentie-as. Vectoren in de zin van de gekozen referentie-as worden als positief beschouwd, vectoren tegen de zin van de referentie-as als negatief.

De grootte van een vector $\vec{z}$ wordt aangeduid met de norm $\|\vec{z}\|$ of het absolutewaardeteken $|z|$ en is altijd positief. De grootte komt immers overeen met de lengte van de vector (en een lengte is altijd positief).

De richting van een vector wordt weergegeven met een eenheidsvector $\vec{e}$ waarvoor $\|\vec{e}\| = 1$. Het invoeren van een eenheidsvector blijkt erg nuttig in notaties. Hiermee kunnen alle kenmerken van een vector ook algebraïsch weergegeven worden.

In onderstaande tekening is $\vec{a} = \pm\|\vec{a}\| \cdot \vec{e} = +2 \cdot \vec{e}$ met aangrijpingspunt 2.

Voor de vector $\vec{b}$ geldt dat $\vec{b} = \pm\|\vec{b}\| \cdot \vec{e} = -1 \cdot \vec{e}$ met aangrijpingspunt 6.



Figuur 4: Vectoren en aangrijpingspunten.

Opmerking 1.2.1. Als de grootte van een vector $\vec{c}$ gelijk is aan nul, noemt men dit ook de **nulvector**. Men noteert dit als: $\vec{c} = \vec{0}$ of $\|\vec{c}\|$ of $c = 0$. Men mag niet noteren dat: $\vec{c} = 0$. Linkerlid en rechterlid moeten immers beiden een scalar of beiden een vector zijn!

Vlugge Vraag

Waarom mag je **niet** noteren dat $\vec{c} = 0$?

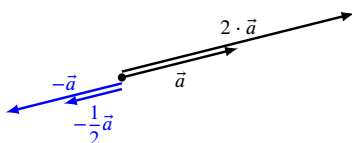
1.3 Bewerkingen met vectoren

1.3 Bewerkingen met vectoren

Scalaire vermenigvuldiging van een reëel getal met een vector

test naar github

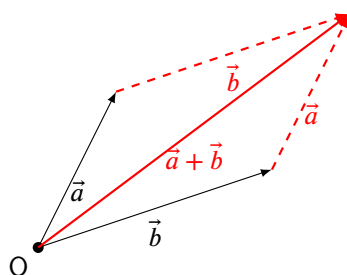
Een vector kan 'herschaald' worden door hem te vermenigvuldigen met een reëel getal (d.w.z. een scalar). De richting blijft op die manier behouden. De grootte en zin kunnen veranderen. De scalaire vermenigvuldiging wordt genoteerd als $\vec{c} = k \cdot \vec{a}$ waarbij $k \in \mathbb{R}$.



Figuur 5: De scalaire vermenigvuldiging van een vector $\vec{a}$

De samenstelling of som van twee (of meer) vectoren

Twee vectoren van dezelfde grootte met hetzelfde aangrijpingspunt kunnen opgeteld worden met als resultaat een nieuwe vector. Deze vector wordt **de resultante** genoemd. Grafisch (kwalitatief) bekomt men de resultante via de kopstaartmethode of parallellogrammethode.



Figuur 6: De optelling van twee vectoren

De **grootte van de resultante** (kwantitatief) kan op verschillende manieren bepaald worden. Erg belangrijk hierbij is om meetkundige samenstelling in het oog te houden en zeker niet blindelings de groottes van de gegeven vectoren op te tellen! In het algemeen wordt de grootte van de resultante berekend met de cosinusregel. In evenwijdige of loodrechte gevallen zijn er efficiënte manieren om de resultante te bepalen (som/verschil of stelling van Pythagoras), de meest algemene methode is echter met de (aangepaste) cosinusregel voor de lengte van $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$:

$$\|\vec{a} + \vec{b}\|^2 = \|\vec{a}\|^2 + \|\vec{b}\|^2 + 2 \cdot \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cdot \cos(\alpha)$$

met α de hoek tussen $\vec{a}$ en $\vec{b}$.

Vlugge Vraag

Hoe vereenvoudigt de cosinusregel als $\vec{a}$ en $\vec{b}$ loodrecht op elkaar staan?

Hoe vereenvoudigt de cosinusregel als $\vec{a}$ en $\vec{b}$ dezelfde richting en dezelfde zin hebben? Hoe vereenvoudigt de cosinusregel als $\vec{a}$ en $\vec{b}$ dezelfde richting en tegengestelde zin hebben?

Eigenschap 1.3.1. ► Twee versies van de cosinusregel ?

De 'klassieke' cosinusregel wordt geformuleerd voor de zijden van een driehoek, en zegt

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \varphi$$

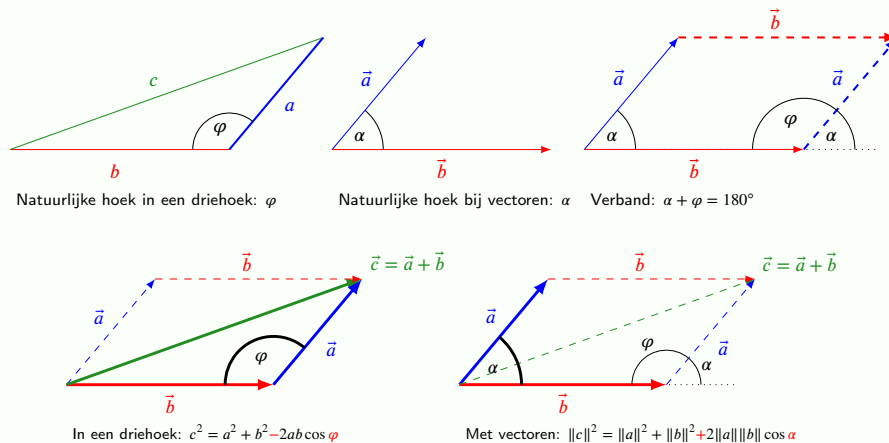
met φ de overstaande hoek van zijde c .

1.3 Bewerkingen met vectoren

Merk op dat het teken van de derde term verschillend is. Waarom is dat zo, en hoe moet je dat onthouden?

In een driehoek gebruik je natuurlijk wijze niet de hoek α tussen de vectoren $\vec{a}$ en $\vec{b}$, maar wel de *complementaire* hoek φ tussen de lijnstukken a en b .

Volgende tekening en redenering geeft het verband tussen beide situaties, en de bijhorende formuleringen. Het enige verschil is een minteken, en dat komt omdat je afhankelijk van de situatie liever met één van de twee complementaire hoeken werkt. En zoals je op de goniometrische cirkel onmiddellijk kan zien, hebben complementaire hoeken tegengestelde cosinussen. Dat precies dat verschil wordt gecompenseerd door het extra minteken.



Figuur 7: Omdat $\alpha + \varphi = 180^\circ$, is $\cos \varphi = -\cos \alpha$.

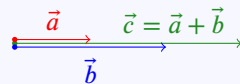
Het verband tussen beide versies van de cosinusregel is nu duidelijk: afhankelijk van welke hoek je neemt tussen de richtingen van $\vec{a}$ en $\vec{b}$ krijg je ofwel een plusteken, ofwel een minteken. Het is niet de moeite om dat teken van buiten te leren, want het teken volgt onmiddellijk uit het speciale geval wanneer $\vec{a}$ en $\vec{b}$ loodrecht op elkaar staan: dan zijn zowel α als φ dus 90° , en de cosinus is dus nul.^a

Als de hoek tussen $\vec{a}$ en $\vec{b}$ *kleiner* wordt, wordt ook $\|\vec{c}\|$ *kleiner* en moet de derde term in de cosinusregel *negatief* zijn. Als de hoek tussen $\vec{a}$ en $\vec{b}$ *groter* wordt, wordt ook $\|\vec{c}\|$ *groter* en moet de derde term in de cosinusregel *positief* zijn. Naargelang je met de hoek α rekent dan wel met de hoek φ wordt het teken van de term met de cosinus dus aangepast.

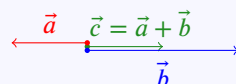
^aGelukkig, want de Stelling van Pythagoras zegt dat bij een rechte hoek $c^2 = a^2 + b^2$, en dat klopt enkel met de cosinusregel als de derde term nul is.

Voorbeeld 1.3.1.

1. Als in onderstaande figuur $\|\vec{a}\| = 3 \text{ N}$ en $\|\vec{b}\| = 5 \text{ N}$, dan is hier $\|\vec{c}\| = \|\vec{a} + \vec{b}\| = \|\vec{a}\| + \|\vec{b}\| = 5 \text{ N} + 3 \text{ N} = 8 \text{ N}$.

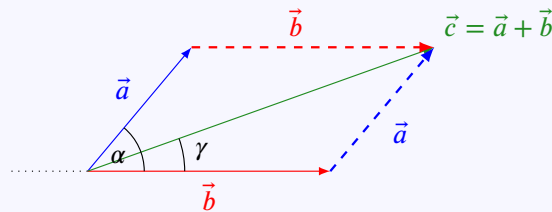


2. Als in onderstaande figuur $\|\vec{a}\| = 3 \text{ N}$ en $\|\vec{b}\| = 5 \text{ N}$, dan is hier $\|\vec{c}\| = \|\vec{a} + \vec{b}\| = \|\vec{a}\| - \|\vec{b}\| = 5 \text{ N} - 3 \text{ N} = 2 \text{ N}$.



3. Als in onderstaande figuur $\|\vec{a}\| = 3 \text{ N}$, $\|\vec{b}\| = 5 \text{ N}$ en $\alpha = 50^\circ$, dan moet $\|\vec{c}\| = \|\vec{a} + \vec{b}\|$ worden berekend met de cosinusregel.

1.3 Bewerkingen met vectoren



De grootte van de resultante $\vec{c}$ wordt bepaald met bovenstaande versie van de cosinusregel:

$$\begin{aligned}\|\vec{c}\| &= \|\vec{a} + \vec{b}\| = \sqrt{\|\vec{a}\|^2 + \|\vec{b}\|^2 + 2\|\vec{a}\|\|\vec{b}\|\cos\alpha} \\ &= \sqrt{3^2 + 5^2 + 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \cos 50^\circ} \approx 7,3 \text{ N.}\end{aligned}$$

Opmerking 1.3.1. In het algemeen geldt dus **niet** dat $\|\vec{a} + \vec{b}\| = \|\vec{a}\| + \|\vec{b}\|$. In welk(e) geval(len) geldt de gelijkheid wel?

De **richting van de resultante** (d.w.z. de hoek γ) kan bepaald worden met de sinusregel:

$$\begin{aligned}\frac{\sin \gamma}{\|\vec{b}\|} &= \frac{\sin \alpha}{\|\vec{c}\|} \implies \sin \gamma = \frac{\|\vec{b}\| \sin \alpha}{\|\vec{c}\|} \\ \gamma &= \arcsin\left(\frac{5 \cdot \sin 50^\circ}{7,3}\right) \approx 18^\circ\end{aligned}$$

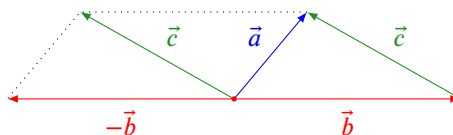
De optelling van vectoren is *associatief*, d.w.z. dat $(\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{c})$. Met deze eigenschap kan je de som berekenen van meerderen vectoren. Indien er dus meer dan twee vectoren worden samengesteld, tel je eerst twee ervan met elkaar op en het resultaat daarvan tel je met de volgende op, enzovoort totdat alle vectoren in de som zitten (zoals ook met de optelling van getallen gebeurt)

Verskil van twee vectoren

Net zoals bij getallen $5 - 3 = 5 + (-3)$, kan je ook bij vectoren een verschil schrijven als een som met de tegengestelde:

$$\vec{c} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$$

Om $\vec{c}$ te vinden moeten $\vec{a}$ en $-\vec{b}$ dus worden samengesteld. Het verschil van de getallen acht en vijf is gelijk aan drie. Drie is dus het getal dat je bij vijf moet optellen om acht te bekomen. Op dezelfde manier is het verschil van vectoren $\vec{a}$ en $\vec{b}$ gelijk aan de vector $\vec{c}$ die je bij $\vec{b}$ moet optellen om $\vec{a}$ te bekomen. $\vec{c}$ is dus inderdaad het verschil of 'onderscheid' tussen $\vec{a}$ en $\vec{b}$.



Figuur 8: Het verschil van de vectoren $\vec{a}$ en $\vec{b}$

Grafisch blijkt dat indien $\vec{a}$ en $\vec{b}$ in hetzelfde punt aangrijpen, $\vec{a} - \vec{b}$ gelijk is aan de vector met als aangrijpingspunt het eindpunt van $\vec{b}$ en als eindpunt het eindpunt van $\vec{a}$.

De loodrechte ontbinding of projectie van een vector in componenten

Een vector is opgebouwd als de samenstelling van zijn componenten volgens de assen. In bepaalde contexten is het vaak erg nuttig om een vector (loodrecht) te ontbinden in zijn componenten. Noteer met $\vec{a}_x$ de

1.3 Bewerkingen met vectoren

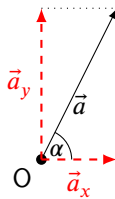
component volgens de x -as en met $\vec{a}_y$ de component volgens de y -as. Voor elke vector geldt dan

$$\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y$$

De grootte van de componenten volgt rechtstreeks uit de goniometrische getallen:

$$\cos(\alpha) = \frac{\|\vec{a}_x\|}{\|\vec{a}\|} \Rightarrow \|\vec{a}_x\| = \|\vec{a}\| \cdot \cos(\alpha)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{\|\vec{a}_y\|}{\|\vec{a}\|} \Rightarrow \|\vec{a}_y\| = \|\vec{a}\| \cdot \sin(\alpha)$$



Figuur 9: De loodrechte projectie van de vector $\vec{a}$

Indien de componenten worden geschreven met behulp van de basisvectoren geeft dit

$$\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y = a_x \cdot \vec{e}_x + a_y \cdot \vec{e}_y$$

Het scalair product van twee vectoren (of inwendig product)

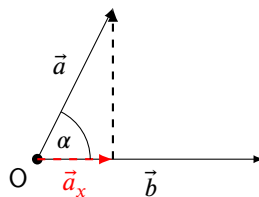
Twee vectoren kan men op twee verschillende manieren met elkaar vermenigvuldigen die een ander resultaat opleveren.

Het scalair product levert een **scalar** (= getal) als resultaat op die per definitie gelijk is aan de grootte van de projectie van de ene vector op de andere vermenigvuldigd met de grootte van diezelfde andere vector. Het scalair product wordt als volgt gedefinieerd:

$$c = \vec{a} \cdot \vec{b} = \|\vec{a}_x\| \cdot \|\vec{b}\| = \|\vec{a}\| \cdot \cos(\alpha) \cdot \|\vec{b}\| = \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cdot \cos(\alpha)$$

Vlugge Vraag

Is de eerste bewerking ' $\cdot$ ' dezelfde als de tweede bewerking ' $\cdot$ '? Verklaar.



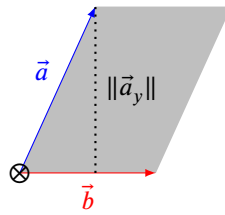
Figuur 10: De projectie van de vector $\vec{a}$ op $\vec{b}$

Het vectorieel product van twee vectoren (of kruisproduct)

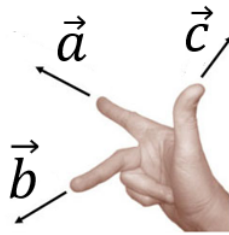
Het vectorieel product levert een **vector** als resultaat op waarvan de grootte gelijk is aan de oppervlakte van de parallelogram ingesloten tussen de twee vectoren. De richting van het vectorproduct is loodrecht op het vlak gevormd door de twee gegeven vectoren en de zin is te bepalen met de rechterhandregel. Het vectorieel product wordt genoteerd als

$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b} = \|\vec{a}_y\| \cdot \|\vec{b}\| = \|\vec{a}\| \cdot \sin(\alpha) \cdot \|\vec{b}\| = \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cdot \sin(\alpha)$$

1.3 Bewerkingen met vectoren



Figuur 11: Het vectorieel product



Figuur 12: De rechterhandregel

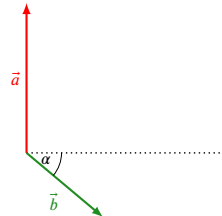
Opmerking 1.3.2. Een vector met zin in het blad wordt genoteerd met $\otimes$. Een vector met zin uit het blad wordt genoteerd met $\odot$.

1.3.A Oefeningen vectoren reeks 1

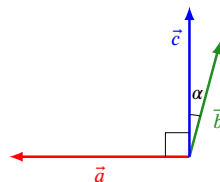
1.3.A Oefeningen vectoren reeks 1

Oefening 1.3.1. Bepaal grafisch en kwantitatief de resultante van de gegeven vectoren.

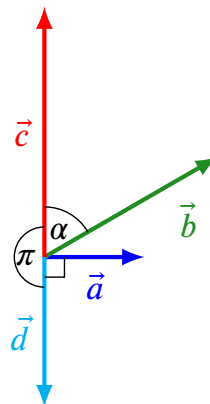
1. $\|\vec{a}\| = 5 \text{ N}$, $\|\vec{b}\| = 4 \text{ N}$, $\alpha = 40^\circ$



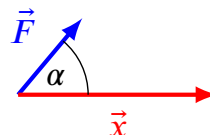
2. $\|\vec{a}\| = 4 \text{ N}$, $\|\vec{b}\| = 2,5 \text{ N}$, $\|\vec{c}\| = 3 \text{ N}$, $\alpha = 15^\circ$



3. $\|\vec{a}\| = 5 \text{ N}$, $\|\vec{b}\| = 8 \text{ N}$, $\|\vec{c}\| = 15 \text{ N}$, $\|\vec{d}\| = 3 \text{ N}$, $\alpha = 60^\circ$



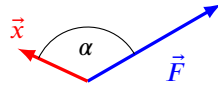
Oefening 1.3.2. Gegeven zijn de vectoren $\vec{F}$ en $\vec{x}$ waarvan geweten is dat $\|\vec{F}\| = 3 \text{ N}$, $\|\vec{x}\| = 4 \text{ m}$ en $\alpha = 50^\circ$. Construeer indien mogelijk en bereken de grootte van:



1. $\vec{F}_x$, zijnde de component van $\vec{F}$ evenwijdig met $\vec{x}$.
2. $\vec{F}_y$, zijnde de component van $\vec{F}$ loodrecht op $\vec{x}$.
3. $\vec{F} \cdot \vec{x}$
4. $\vec{F} \times \vec{x}$

1.3.A Oefeningen vectoren reeks 1

Oefening 1.3.3. Gegeven zijn de vectoren $\vec{F}$ en $\vec{x}$ waarvan geweten is dat $\|\vec{F}\| = 7\text{ N}$, $\|\vec{x}\| = 2\text{ m}$ en $\alpha = 125^\circ$. Construeer indien mogelijk en bereken de grootte van:



1. $\vec{F}_x$, zijnde de component van $\vec{F}$ evenwijdig met $\vec{x}$.
2. $\vec{F}_y$, zijnde de component van $\vec{F}$ loodrecht op $\vec{x}$.
3. $\vec{F} \cdot \vec{x}$
4. $\vec{F} \times \vec{x}$

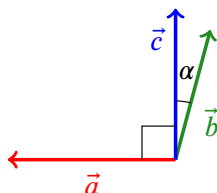
1.3.B Oefeningen vectoren reeks 2

1.3.B Oefeningen vectoren reeks 2

Oefening 1.3.4.

Gegeven de drie waarvoor geldt $\|\vec{a}\| = 4 \text{ N}$, $\|\vec{b}\| = 2,5 \text{ N}$, $\|\vec{c}\| = 3 \text{ N}$, $\alpha = 15^\circ$

Constureer en bepaal de groottes van:



1. $\vec{a} - \vec{b}$
2. $\vec{b} - \vec{a}$
3. $\vec{a} + \vec{b} - \vec{c}$
4. $3\vec{a} - 2\vec{b}$
5. $4\vec{b} + \vec{c}$
6. $\vec{a} - 2\vec{b} + 3\vec{c}$
7. $3\vec{a} - 4\vec{c}$

Oefening 1.3.5. Als $\vec{F} \perp \vec{y}$, welk(e) van onderstaande uitspraken is dan juist? Meerdere antwoorden zijn mogelijk.

1. $\vec{F} \cdot \vec{y} = \vec{0}$
2. $\vec{F} \times \vec{y} = \vec{0}$
3. $\vec{F} \cdot \vec{y} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{y}\|$
4. $\|\vec{F} \times \vec{y}\| = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{y}\|$
5. $\vec{F} \times \vec{y} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{y}\|$
6. $\vec{F} \cdot \vec{y} = 0$
7. $\vec{F} \times \vec{y} = 0$
8. $\|\vec{F} \times \vec{y}\| = 0$

Oefening 1.3.6. Als $\vec{F} \parallel \vec{y}$, welk(e) van onderstaande uitspraken is dan juist? Meerdere antwoorden zijn mogelijk.

1. $\vec{F} \cdot \vec{y} = \vec{0}$
2. $\vec{F} \times \vec{y} = \vec{0}$
3. $\vec{F} \cdot \vec{y} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{y}\|$
4. $\|\vec{F} \times \vec{y}\| = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{y}\|$
5. $\vec{F} \times \vec{y} = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{y}\|$

1.3.B Oefeningen vectoren reeks 2

6. $\vec{F} \cdot \vec{y} = 0$

7. $\vec{F} \times \vec{y} = 0$

8. $\|\vec{F} \times \vec{y}\| = 0$

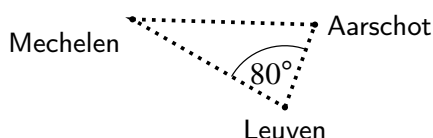
1.3.C Oefeningen vectoren reeks 3

1.3.C Oefeningen vectoren reeks 3

Oefening 1.3.7. Bij de opzet van een aanval loopt een voetballer eerst 15 m evenwijdig met de zijlijn om vervolgens onder een hoek van 45° met de zijlijn 18 m naar binnen te snijden. Hoe ver van het vertrekpunt komt hij uit? Maak een schets met vectoren en voer ook hiermee je berekening uit.

Oefening 1.3.8. Vanop dezelfde middenstip vertrekken twee spelers, één wandelt 9 m evenwijdig met de zijlijn naar het ene doel en de ander wandelt 17 m in een richting die een hoek van 35° maakt met de middellijn, naar het andere doel toe. Hoe ver komen de spelers van elkaar uit? Maak een schets met vectoren en voer ook hiermee je berekening uit.

Oefening 1.3.9. Twee treinen vertrekken gelijktijdig uit Leuven station met constante snelheden van 10 m/s en 20 m/s. De trage trein rijdt recht naar Mechelen en de andere recht naar Aarschot.



1. Bepaal de snelheid van de trage trein ten op zichte van de snelle trein. Werk met vectoren!
2. Heeft de snelheid van de snelle t.o.v. de trage trein dezelfde grootte, richting en/of zin?

Oefening 1.3.10. Toon aan dat $\|\vec{a} - \vec{b}\|^2 = \|\vec{a}\|^2 + \|\vec{b}\|^2 - 2 \cdot \|\vec{a}\| \cdot \|\vec{b}\| \cdot \cos(\alpha)$ met α de hoek tussen $\vec{a}$ en $\vec{b}$.

Oefening 1.3.11. Geldt er algemeen dat $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a}$? Geldt er dat $\vec{a} \times \vec{b} = \vec{b} \times \vec{a}$? Verklaar kort.

Oefening 1.3.12. Kan er gelden dat $\vec{a} \cdot \vec{b} = \|\vec{a} \times \vec{b}\|$? Zoja, geef de nodige voorwaarden en zoniet, verklaar.

2.1 Inleiding

2.1 Inleiding

Kinematica⁴ is het onderdeel van de fysica dat de **bewegingen van voorwerpen beschrijft**, zoals vallende appels, rollende knikkers of rijdende auto's, maar ook de beweging van de maan rond de aarde of de aarde rond de zon. De kinematica beperkt zich tot het *beschrijven* van de beweging, zonder de onderliggende *oorzaak* te onderzoeken. De redenen waarom iets op een bepaalde manier beweegt worden verder behandeld in de *dynamica*.

In dit hoofdstuk worden eerst de **basisbegrippen** en **basisgrootheden** van de kinematica behandeld, namelijk de vectoriële grootheden **positie**, **snelheid** en **versnelling**, hun verbanden onderling en hun afhankelijkheid van de scalaire grootheid **tijd**. Vervolgens gebruiken we die begrippen om enkele concrete soorten bewegingen te bestuderen (rechtlijnige, cirkelvormige, snelle, trage, versnellende en vertragende, enzovoort).

Voorbeeld 2.1.1. Als een appel van een boom valt, kan je allerlei vragen stellen over deze valbeweging:

- Hoe ver valt de appel van de boom?
- Hoe lang duurt het voor de appel de grond raakt?
- Hoe snel valt de appel? Is die snelheid altijd dezelfde, of valt een appel altijd maar sneller?
- Als de snelheid van de appel verandert, hoe groot is ze dan bij het begin van de val? En na één seconde? En op het moment dat de appel de grond raakt?

De kinematica vraagt zich niet af *waarom* een appel naar beneden valt, en bijvoorbeeld niet naar boven. In het latere onderdeel *dynamica* worden *krachten* bestudeerd die de bewegingen beïnvloeden. We zullen zien dat krachten eigenlijk alleen maar de *veranderingen van bewegingen* veroorzaken.

Voorbeeld 2.1.2. Als je een krijtje gooit naar het bord, kan je je daarover allerlei vragen stellen:

- Vliegt dat krijtje in een rechte lijn naar het bord? Of eerder in een cirkelbaan? Of misschien een ellips? Of nog een andere vorm?
- Hoe snel vliegt het krijtje? Vertraagt het tijdens zijn vlucht, of versnelt het eerder omdat het ook wat naar beneden valt?
- Als de leerkracht het laatste stukje van de baan van het krijtje nauwkeurig heeft geregistreerd, kan hij dan weten welke leerling gegooit heeft?
- Vliegen lange en korte krijtjes even snel? Vliegen witte en rode krijtjes even snel? Vliegen krijtjes met een scherpe punt sneller?
- Mag je eigenlijk wel met krijtjes gooien?
- Als je snel genoeg gooit, en opzettelijk het bord mist, is het dan theoretisch mogelijk om het krijtje in een baan om de aarde te krijgen? Hoe snel zou je moeten gooien?

Sommige van deze vragen worden behandeld in de kinematica, andere in de dynamica. Één vraag past natuurlijk beter binnen een cursus zingeving en ethiek, maar dat had je wel door...

⁴Het woord 'kinematica' is net zoals 'cinema' en 'kinesist' afgeleid van het Griekse *κίνημα* dat 'beweging' betekent.

2.1 Inleiding

Om even over na te denken ...

Een buffel tracht loodrecht een 300 m brede rivier over te steken met een snelheid van 1,00 m/s. De stroomsnelheid bedraagt 1,50 m/s.

- (a) In welke tijd bereikt de buffel de overzijde?
- (b) Hoever drijft de buffel af?
- (c) Met welke snelheid beweegt de buffel voor iemand die op de oever staat?
- (d) Waarom is het antwoord op de vorige vraag niet simpelweg $1,00 \text{ m/s} + 1,50 \text{ m/s} = 2,50 \text{ m/s}$?

Om even over na te denken ...

Vanuit de laadbak van een auto gooit een man een zware medicine bal omhoog. Een klein beetje later vangt hij die bal terug op. Zie het volgende filmpje voor de reële situatie:

YouTube link: <https://www.youtube.com/watch?v=j1URC2G2qnc>



- (a) Beschrijf de baan van de bal zoals die eruit ziet voor iemand die naar de rijdende auto kijkt.
- (b) Beschrijf de baan van de bal zoals die eruit ziet voor de werper in de auto.
- (c) Schets de snelheidsvector van de bal voor het moment dat de bal op zijn hoogste punt is, voor een waarnemer die naar de rijdende auto kijkt.
- (d) Doe hetzelfde voor de snelheidsvector van de bal op een moment dat hij voorbij zijn hoogste punt is.

2.2 Het referentiestelsel

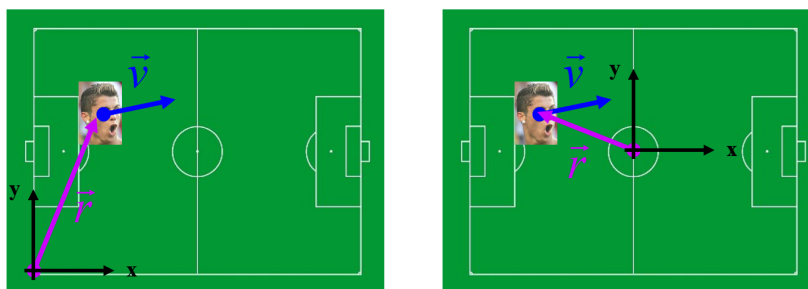
2.2 Het referentiestelsel

Als je een vogel ziet vliegen, kan je deze beweging op verschillende manieren beschrijven: de vogel kan *stijgen* of een *duikvlucht* nemen. De vogel kan *omdraaien* of – indien het een kolibrie is – misschien zelfs op een vaste plaats *blijven fladderen*. Al deze beschrijvingen gebeuren met een referentiepunt in het achterhoofd. Je kan alleen maar stijgen ten opzichte van iets anders.

Elk bewegend systeem wordt sluitend beschreven ten opzichte van een **referentiestelsel**. Dat is een assenstelsel dat als het ware in de ruimte geplaatst wordt en waarin bijvoorbeeld de positie kan worden vastgelegd. Ten opzichte van dit stelsel kan je de plaats met een positievector beschrijven en een snelheidsvector gebruiken om de snelheid te beschrijven.

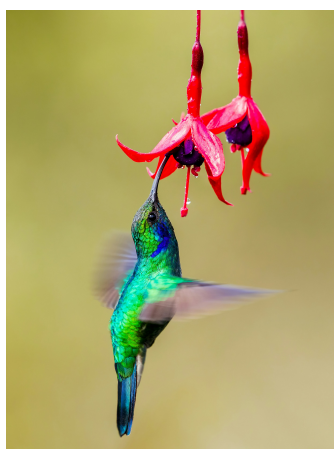
De keuze van het referentiestelsel is altijd *vrij*. Het is belangrijk om die keuze telkens duidelijk te maken. Stel je voor dat je op dit moment gedreven natuurkunde aan het studeren bent aan een bureau en je houdt je pen op *ooghoogte*, hoe 'hoog' bevindt je pen zich dan? Meet je dit vanaf je tafelblad, de vloer, het straatniveau, het aantal meters boven de zeespiegel, ...? In welke eenheid meet je dit? Wat is je eenheidsvector en in welke richting kies je de positieve as?

Meestal wordt geopteerd voor een referentiestelsel dat stilstaat. In onderstaand voorbeeld van het voetbalveld is de positie $\vec{r}$ van de voetballer duidelijk verschillend naargelang het gekozen referentiestelsel.



Figuur 13: Twee verschillende referentiestelsels

Oefening 2.2.1. De kolibrie in onderstaande foto blijft ter plekke in de lucht fladderen onder de bloem. Geef twee referentiestelsels waarin deze vogel **niet** stilstaat.



2.3 De positie

2.3 De positie

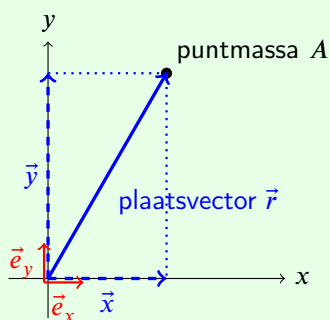
Positie en plaatsfunctie

Met behulp van een referentiestelsel kan elke plaats van een puntmassa in de ruimte worden beschreven met een **positie- of plaatsvector**, algemeen genoteerd door $\vec{r}$. Afhankelijk van het aantal dimensies waarin de beweging beschreven wordt, heeft deze plaatsvector één, twee of drie vectorcomponenten volgens de gekozen assen, doorgaans $\vec{x}$, $\vec{y}$ en $\vec{z}$ genaamd. De getalcomponenten of kortweg componenten van deze vectoren zijn de plaatscoördinaten x, y en z . Dat zijn scalaire grootheden, omdat ze een getalcomponent en een eenheid bevatten.

Definitie 2.3.1. De positie van een puntmassa A wordt vectorieel beschreven met de **plaatsvector** $\vec{r}$. Het is de vector die van de oorsprong wijst naar het punt waar de massa zich bevindt. Een plaatsvector $\vec{r}$ kan ontbonden worden volgens de assen:

$$\vec{r} = \vec{x} + \vec{y} = x \cdot \vec{e}_x + y \cdot \vec{e}_y$$

Hierin is $co(A) = (x, y)$ de coördinaat van het punt en zijn $\vec{e}_x$ en $\vec{e}_y$ eenheidsvectoren volgens de assen.



Figuur 14: De plaatsvector $\vec{r}$

Als een puntmassa beweegt, verandert haar plaatsvector $\vec{r}$. De componenten ervan hangen dus af van de tijd. Elke coördinaatfunctie geeft voor elk moment t de coördinaat van de puntmassa volgens een welbepaalde-as. Al deze componentfuncties samen beschrijven op een equivalent manier de volledige beweging van de puntmassa.

Opmerking 2.3.1. ► Over vectorfuncties

De beweging van een puntmassa wordt beschreven door een *functie* die de **plaats** $\vec{r}$ weergeeft in functie van de **tijd**. De **plaatsfunctie** $\vec{r} = \vec{r}(t)$ geeft voor elk tijdstip t de positie $\vec{r}$ waar de puntmassa zich bevindt. In het algemeen is een dergelijke vectorfunctie ingewikkeld om te hanteren, daarom wordt er gewerkt met de tijdsafhankelijke getalcomponenten $x(t), y(t)$ en $z(t)$.

Bij eindimensionale bewegingen is er slechts één as nodig om de beweging te beschrijven. Het is dan handig om met de componenten te werken, die tijdsafhankelijk kunnen zijn.⁵

De positie op een welbepaald tijdstip t_1 wordt genoteerd als ⁶

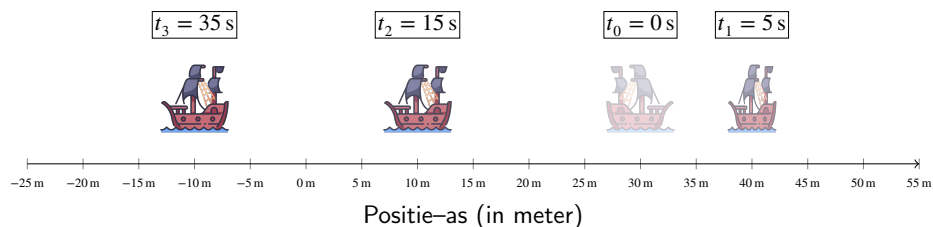
$$x_1 = x(t_1).$$

⁵In fysica gebruiken we wiskunde als 'taal' om de wetmatigheden van de natuur uit te drukken. Wiskundige variabelen en objecten zoals functies krijgen nu een fysische betekenis. $x(t)$ is dus niets anders dan een functie $f(x)$ of $y(x)$ zoals je die in wiskunde kent. Alleen nemen wij nu niet voor de onafhankelijke variabele het symbool x , maar het symbool t . En voor het symbool f gebruiken wij nu het symbool x omdat die de beeldwaarden zijn van de functie f , x is afhankelijk van t .

⁶Natuurlijk kan de index 1 ook vervangen worden door andere indices. Voorbeelden zijn $x_0 = x(t_0)$ en $x_2 = x(t_2)$.

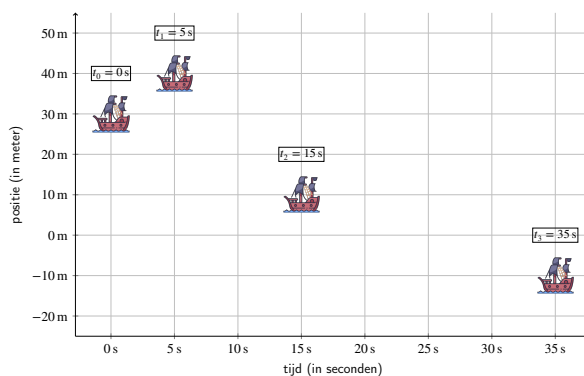
2.3 De positie

In onderstaande figuur zie je de rechtlijnige tocht van een zeilschip. Op verschillende tijdstippen $t_0, t_1, t_2, \dots$ wordt weergegeven waar het schip zich bevindt.



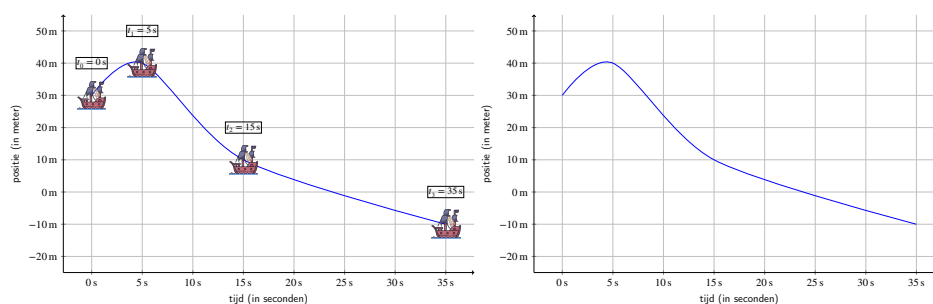
Figuur 15: De positie van de zeilboot voor elke tijd t

In de natuurkunde is **tijd een dimensie**.⁷ In bovenstaande figuur wordt boven elke zeilboot aangegeven op welk tijdstip de boot daar werd waargenomen. Zo bevindt de boot zich op $t_1 = 5$ s op de positie 40 m, dus $x_1 = 40$ m. De startpositie van de zeilboot x_0 is gelijk aan 30 m, want voor $t_0 = 0$ s geldt $x(0) = 30$ m. In plaats van de tijd boven elke zeilboot te noteren, is het ook mogelijk om de tocht op een tijd-as uit te zetten.



Figuur 16: De positie van de zeilboot met een tijd-as

De positie van de zeilboot is enkel weergegeven voor een aantal specifieke momenten t_0, t_1, t_2, t_3 en t_4 . De boot heeft natuurlijk ook op *elk moment hiertussen* een positie ...



Figuur 17: De plaatsfunctie van de zeilboot voor elke $t \in [0, 35]$

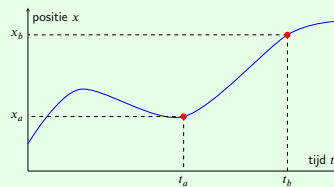
Definitie 2.3.2. De plaatsfunctie $x(t)$ geeft voor elk moment t de component x van de positie van het voorwerp. $x(t)$ geeft de plaatsfunctie die je kan uitzetten in een grafiek met verticale x -as en

⁷Einstein gaf een beschrijving voor de zwaartekracht in de 4-dimensionale ruimte-tijd.

2.3 De positie

horizontale t -as. De positie op een welbepaald tijdstip t_a wordt genoteerd als

$$x_a = x(t_a)$$

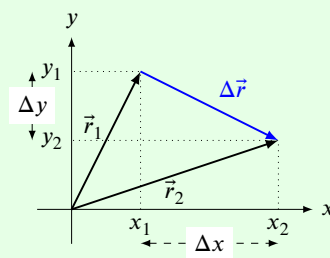


Figuur 18: De grafiek van een plaatsfunctie $x(t)$

De **verplaatsing** tussen t_1 en t_2 is het verschil in positie tussen de twee tijdstippen t_1 en t_2 , genoteerd met een $\Delta \vec{r}$ (Delta, een Griekse hoofdletter D van het Engelse 'displacement' of het Franse 'déplacement').

Definitie 2.3.3. De **verplaatsing** $\Delta \vec{r}$ is het verschil tussen twee posities:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

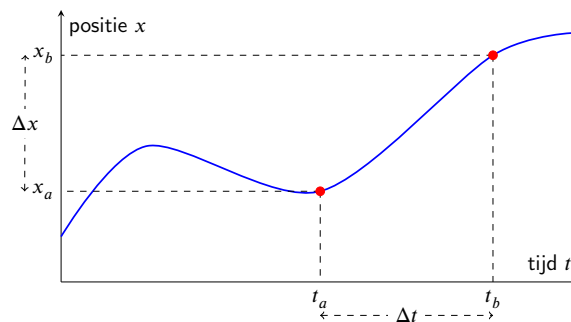


Zoals aangegeven in de figuur kan ook de verplaatsingsvector $\Delta \vec{r}$ ontbonden worden.

$$\begin{aligned} \Delta \vec{r} &= \vec{r}_2 - \vec{r}_1 \\ &= (x_2 \cdot \vec{e}_x + y_2 \cdot \vec{e}_y) - (x_1 \cdot \vec{e}_x + y_1 \cdot \vec{e}_y) \\ &= (x_2 - x_1) \cdot \vec{e}_x + (y_2 - y_1) \cdot \vec{e}_y \\ &= \Delta x \cdot \vec{e}_x + \Delta y \cdot \vec{e}_y \end{aligned}$$

Voor ééndimensionale bewegingen is de verplaatsing eenvoudig scalair te berekenen met: $\Delta x = x_{\text{eind}} - x_{\text{begin}}$. De verplaatsing van de zeilboot tussen de tijdstippen t_0 en t_1 is gelijk aan $\Delta x = x_1 - x_0 = 40 \text{ m} - 30 \text{ m} = 10 \text{ m}$. Tussen t_2 en t_3 is de verplaatsing gelijk aan $\Delta x = x_3 - x_2 = -10 \text{ m} - 10 \text{ m} = -20 \text{ m}$. Deze laatste verplaatsing is negatief, wat aangeeft dat de zeilboot netto naar achteren is bewogen – tegengesteld aan de zin van de gekozen as. Op de plaatsfunctie kan de verplaatsing eenvoudig afgelezen worden:

2.3 De positie



Figuur 19: De verplaatsing op de plaatsfunctie

Vlugge Vraag

Bereken de verplaatsing $\Delta x = x_4 - x_1$ van de zeilboot en duid deze verplaatsing aan op de grafiek.

Wanneer een voorwerp beweegt, doorloopt het meerdere posities. De verbindinglijn van al deze gepasseerde posities, noemt men de **baan** van de beweging. Een ééndimensionale beweging heeft een rechte baan. Een tweedimensionale is doorgaans krom en kan meerdere vormen hebben (willekeurig, cirkelvormig, parabolvormig, ellipsvormig, ...). Soms is men geïnteresseerd in een **baanvergelijking** waarin men de afhankelijkheid tussen x en y wiskundig neerschrijft. Indien de functies $x(t)$ en $y(t)$ gekend zijn, kan soms een (expliciete) baanvergelijking bekomen worden door één voorschrift uit te werken naar t en dit vervolgens te substitueren in de andere vergelijking.

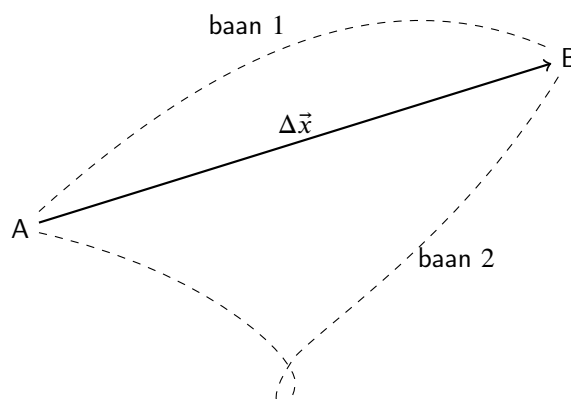
Voorbeeld 2.3.1. De positie van puntmassa A in het xy -vlak wordt gegeven door

$$\begin{cases} x = t^7 \\ y = -t^2 - 3t \end{cases}$$

Een rechtstreekse berekening levert $x = t^7 \Rightarrow t = \sqrt[7]{x}$. Dit substitueren in het voorschrift $y(t)$ geeft de baanvergelijking $y(x)$:

$$y = -t^2 - 3t \Rightarrow y(x) = -(\sqrt[7]{x})^2 - 3\sqrt[7]{x}$$

Let op: de *verplaatsing* is niet hetzelfde als de *afgelegde weg* tussen de twee bijbehorende tijdstippen. Als je een rondje hebt gelopen op de atletiekpiste en terug aan start staat is je (netto) verplaatsing nul, maar je hebt wel degelijk afstand afgelegd. De verplaatsing geeft enkel het verschil (in vogelvlucht) tussen begin- en eindpunt, terwijl de afgelegde weg s gaat over de afstand die het bewegende voorwerp over zijn baan aflegt.



2.3 De positie

Figuur 20: Verplaatsing en afgelegde weg

2.4 De snelheid

2.4 De snelheid

Een voorwerp in beweging heeft een snelheid. De ervaring leert dat hoe groter de snelheid, hoe groter de verplaatsing in een bepaald tijdsinterval. Als je fietst aan 30 km/h, leg je op één uur tijd 30 km af. Als je wandelt aan 5 km/h, leg je op één uur tijd slechts 5 km af. De snelheid van een voorwerp kan volledig bepaald worden met behulp van de plaatsfunctie. Een voorwerp heeft immers snelheid als de plaats of positie verandert.

We behandelen eerst de snelheid in één dimensie. Daarna kijken we naar de snelheid in twee dimensies, die wordt opgebouwd als samenstelling van twee (eendimensionale) snelheidscomponenten.

Snelheid bij eendimensionale bewegingen

De tijd nodig voor een bepaalde verplaatsing geeft aanleiding tot de *gemiddelde snelheid*.

Definitie 2.4.1. In één dimensie wordt de gemiddelde snelheid $\bar{v}$ van een voorwerp tussen twee tijdstippen gedefinieerd als

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

De eenheid van snelheid is meter per seconde $[v] = \text{m/s}$.

In het traject van de zeilboot is de gemiddelde snelheid van de boot tussen de tijdstippen t_1 en t_2 gelijk aan $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{10 \text{ m} - 40 \text{ m}}{15 \text{ s} - 5 \text{ s}} = \frac{-30 \text{ m}}{10 \text{ s}} = -3 \text{ m/s}$. Deze gemiddelde snelheid is negatief, wat betekent dat de zeilboot tegen de zin van de referentie-as is bewogen.

Vlugge Vraag

Hoe je op de plaatsgrafiek van de zeilboot de gemiddelde snelheid tussen t_1 en t_2 aanduiden?

Ogenblikkelijke snelheid bij eendimensionale bewegingen

De gemiddelde snelheid $\bar{v}$ is enkel gedefinieerd *tussen* twee posities x_1 en x_2 . De plaatsfunctie $x(t)$ kent voor elk tijdstip t een positie x toe aan een puntmassa. Op dezelfde manier zou je op elk tijdstip de snelheid willen kennen.

De eenheid van snelheid is m/s, het gaat dus over het aantal meter dat in een bepaald tijdsinterval wordt afgelegd. Op één bepaald moment t , één ogenblik, is er helemaal geen tijdsverloop en bijgevolg kan er ook geen verplaatsing zijn ...! Er is immers geen tijd verstreken om afstand te kunnen afleggen.

Om even over na te denken ...

Als een raket opstijgt vanuit stilstand is de snelheid duidelijk groter dan nul. **Wat is volgens jou de snelheid op het eerste moment dat een opstijgende raket de grond niet meer raakt?**

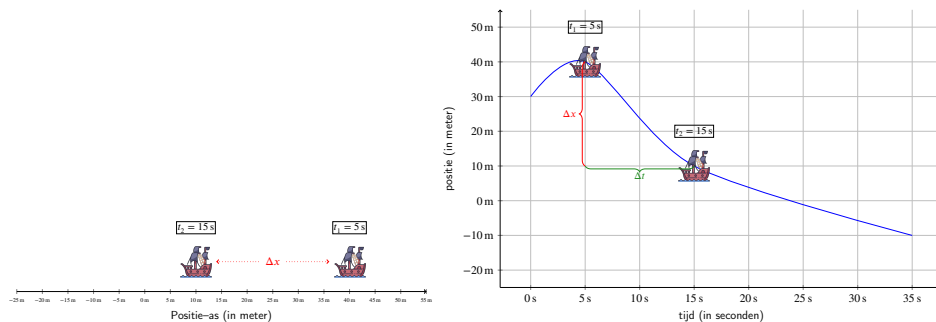
‘Ja, maar’, ga je zeggen, ‘de snelheidsmeter van mijn fiets zegt toch hoe hard ik ga?!’ Dat *lijkt* inderdaad een ogenblikkelijke snelheid te zijn, maar in werkelijkheid is dat steeds de gemiddelde snelheid over het tijdsinterval dat het sensortje op je wiel nodig heeft om één omwenteling te maken. Je snelheidsmeter berekent dus de gemiddelde snelheid door je wielomtrek⁸ te delen door de tijd van één omwenteling. Als je plots remt gaat je snelheid afnemen, maar je metertje gaat dit niet ogenblikkelijk kunnen aangeven. Het moet wachten totdat het sensortje weer rond is geweest om de tijd te kennen en zo de nieuwe snelheid te kunnen registreren.

Hoe kan dit probleem opgelost worden? Om de ogenblikkelijke snelheid op $t_1 = 5 \text{ s}$ te kennen, lijkt het eerste (en misschien wel enige...) idee om te vertrekken van de gemiddelde snelheid tussen t_1 en t_2 die hierboven werd berekend. Deze gemiddelde snelheid kan je beschouwen als een erg ruwe schatting van de snelheid op $t_1 = 5$.

⁸Die je hebt moeten ingeven...

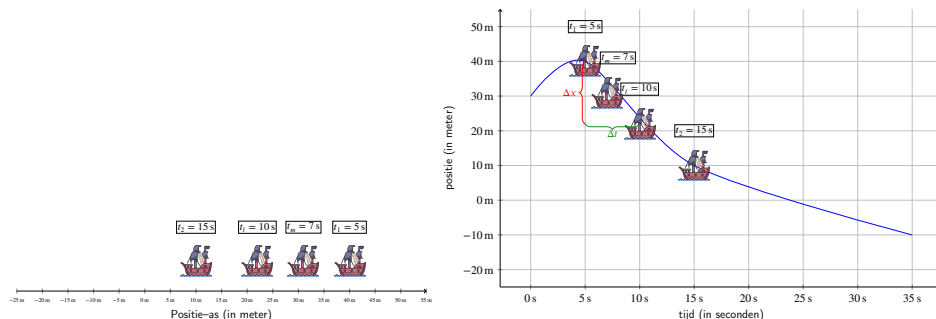
2.4 De snelheid

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{10 \text{ m} - 40 \text{ m}}{15 \text{ s} - 5 \text{ s}} = \frac{-30 \text{ m}}{10 \text{ s}} = -3 \text{ m/s}$$

Figuur 21: De gemiddelde snelheid voor $t_1 = 5$ en $t_2 = 15$

Indien niet met $t_2 = 15 \text{ m}$ de gemiddelde snelheid wordt berekend, maar bijvoorbeeld met $t_1 = 10 \text{ s}$, zal deze gemiddelde snelheid vermoedelijk beter de ogenblikkelijke snelheid op t_1 benaderen.

Op de plaatsgrafiek schuift de zeilboot naar t_1 . De gemiddelde snelheid $\bar{v} = \frac{x_l - x_1}{t_l - t_1}$ is vermoedelijk een *beter* benadering voor de ogenblikkelijke snelheid op t_1 . Maar het is nog steeds een gemiddelde snelheid! Door de gemiddelde snelheid te berekenen voor $t_m = 7$ wordt de benadering voor de ogenblikkelijke snelheid op t_1 nog beter... Op de grafiek komen de twee schepen nu wel erg dicht bij elkaar...

Figuur 22: De gemiddelde snelheid voor $t_1 = 5$ en $t_l = 10$

De ogenblikkelijke snelheid wordt dus beter en beter benaderd door het tijdsinterval kleiner en kleiner en kleiner en kleiner... te nemen. De ogenblikkelijke snelheid gedefinieerd als de **limiet van de gemiddelde snelheid** over een tijdsinterval waarbij we dat interval naar nul laten gaan.

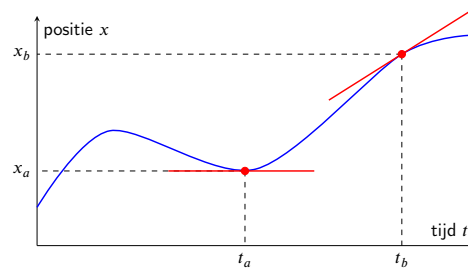
Definitie 2.4.2. De **ogenblikkelijke snelheid** in één dimensie is de afgeleide van de plaatsfunctie:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{x(t) - x(t_0)}{t - t_0} = \frac{dx}{dt}$$

De notatie met een accent $v(t) = x'(t)$ of $v = x'$ wordt op dezelfde manier in de wiskunde gebruikt. De functie $v(t)$ geeft op elk moment t de snelheid v .

Grafisch kan je de afgeleide interpreteren als de richtingscoëfficiënt van de raaklijn. In een $x - t$ grafiek (de grafiek van de functie $x(t)$, x in functie van t) vind je de snelheid als de richtingscoëfficiënt van de raaklijn in het beschouwde punt.

2.4 De snelheid

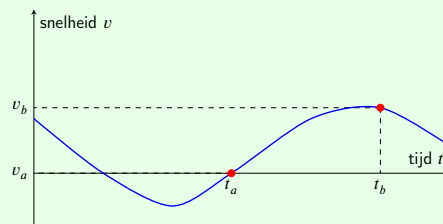


Figuur 23: De snelheid als richtingscoëfficiënt aan de raaklijn

Definitie 2.4.3. De snelheidsfunctie $v(t)$ geeft de component van de snelheid in functie van de tijd. De snelheid op een welbepaald tijdstip t_a wordt genoteerd als

$$v_a = v(t_a).$$

In een grafiek van de functie wordt op de horizontale as de tijd weergegeven en op de verticale de snelheidscomponent.



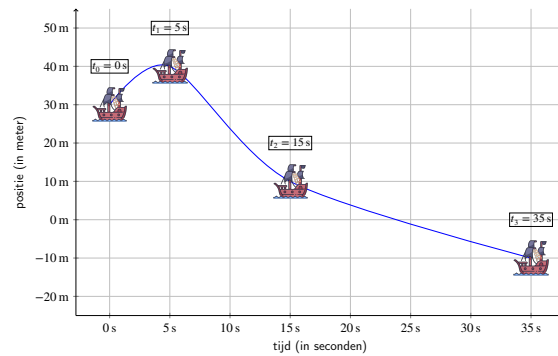
Figuur 24: Een snelheidsfunctie voor een ééndimensionale beweging.

Opmerking 2.4.1. Het woord 'ogenblikkelijk' mag je weglaten. Wanneer we het over snelheid hebben, bedoelen we vanaf nu steeds de ogenblikkelijke snelheid.

Oefening 2.4.1. Hieronder staat opnieuw de plaatsfunctie $x(t)$ van de zeilboot. Bepaal enkel met de grafiek en zonder te rekenen:

1. Waar is de snelheid 0?
2. Waar heeft de zeilboot een positieve snelheid?
3. Waar is de snelheid negatief?
4. Op welk moment beweegt de zeilboot het snelst?

2.4 De snelheid



Figuur 25: De positie van de zeilboot met een tijd-as

Snelheid bij tweedimensionale bewegingen

Bij voorwerpen die in twee dimensies bewegen, splitst men de beweging op in loodrechte x- en y-componenten. Op die manier bekomt men gelijkaardige formules zoals in het 1D geval.

Definitie 2.4.4. De **snelheidsvector** $\vec{v}$ van een lichaam wordt gedefinieerd als de afgeleide van de plaatsvector naar de tijd:

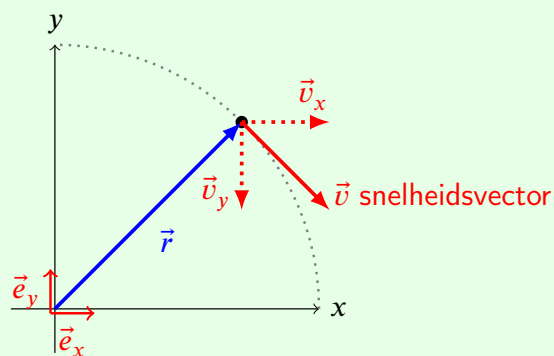
$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt},$$

en kan worden opgesplitst in snelheidscomponenten v_x en v_y :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d}{dt}(x \cdot \vec{e}_x + y \cdot \vec{e}_y) = \frac{dx}{dt} \cdot \vec{e}_x + \frac{dy}{dt} \cdot \vec{e}_y = v_x \cdot \vec{e}_x + v_y \cdot \vec{e}_y$$

De grootte van de totale snelheid wordt genoteerd met het symbool v en is gelijk aan

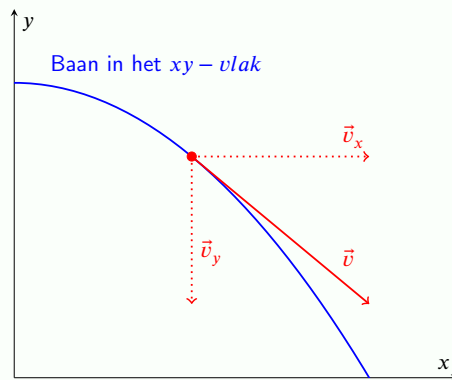
$$v = \|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$



Figuur 26: De snelheidsvector $\vec{v}$

Stelling 2.4.1. De snelheidsvector is altijd rakend aan de baan.

2.4 De snelheid



Figuur 27: De snelheidsvector is rakend aan de baan.

Bewijs ➤

We kunnen dit bewijzen met de kettingregel, toegepast op de functie $y(t) = y(x(t))$.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} \Leftrightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = \frac{v_y}{v_x}$$

Inderdaad, $\frac{dy}{dx}$ is de helling van de baan en deze valt samen met de helling die de snelheidsvector maakt $\frac{v_y}{v_x}$. ■

2.5 De versnelling

2.5 De versnelling

Wanneer de snelheid van een voorwerp verandert in de tijd, heeft het een *versnelling*. Een synoniem voor het woord versnelling is *acceleratie*, dat het symbool $\vec{a}$ van deze grootheid verklaart. Acceleratie is soms handiger om te gebruiken, dat vermijdt verwarring met het begrip snelheid, wat helemaal niet hetzelfde is!

$\vec{v}$ = velocity = vitesse = snelheid

$\vec{a}$ = acceleration = acceleratie = versnelling = snelheidsverandering

De vector $\vec{a}$ grijpt aan op het versnellend voorwerp en beschrijft de bewegingsverandering.

Definitie 2.5.1. De gemiddelde versnelling $\vec{a}$ tussen twee tijdstippen wordt gedefinieerd als

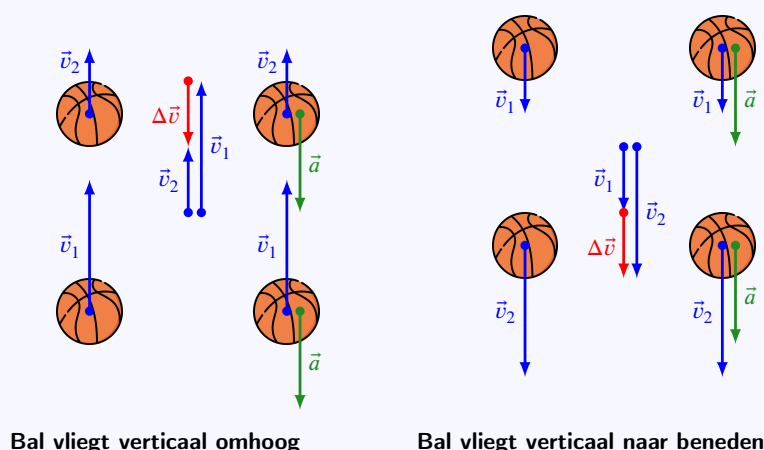
$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1}$$

De eenheid van versnelling is meter per seconde, per seconde – wat meter per seconde in het kwadraat geeft $[a] = \text{m/s}^2$.

Als de snelheid van een voorwerp wijzigt, dan wijzigt ook de snelheidsvector. Afhankelijk van welk kenmerk van de snelheidsvector (en dus ook van de beweging) verandert, maakt men een onderscheid tussen twee verschillende soorten versnellingen:

Definitie 2.5.2. (Werkdefinitie). Als enkel de *grootte* van de snelheidsvector verandert, spreekt men over een **tangentiële versnelling** $\vec{a}_t$. In dit geval is de versnellingsvector tangenteel of evenwijdig met de snelheidsvector. Dit komt voor bij eendimensionale bewegingen. Hierbij blijft de richting van de beweging onveranderd.

Voorbeeld 2.5.1. Een verticaal omhoog geworpen basketbal versnelt tangenteel, de bal gaat eerst trager en trager en na het hoogste punt sneller en sneller. Enkel de grootte van de snelheid verandert. De richting niet, want de bal blijft verticaal bewegen. De versnellingsvector staat evenwijdig met de snelheidsvector, dit volgt uit de constructie van $\Delta \vec{v}$. Wegens de definitie van de gemiddelde versnelling staan $\vec{a}$ en $\Delta \vec{v}$ in deze situatie in dezelfde richting en zin.



Figuur 28: Snelheid en versnelling bij een verticale worp

2.5 De versnelling

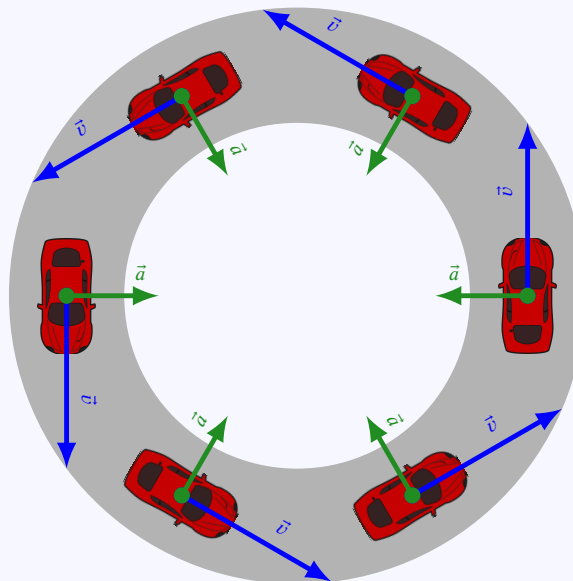
Voorbeeld 2.5.2. Een auto trekt op een rechte weg op met een versnelling van 3 m/s^2 . Dit wil zeggen dat per seconde de grootte van zijn snelheid met 3 m s^{-1} verandert (of in dit geval toeneemt).

Oefening 2.5.1.

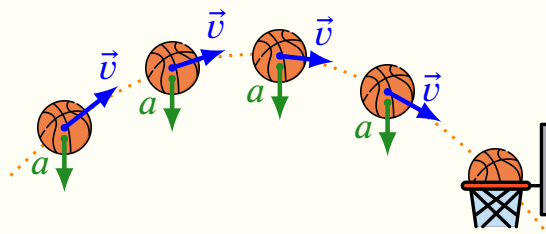
1. Als een basketbal botst op de grond verandert de snelheidsvector ook van *zin*. Maak een tekening met vectoren net voor en na de bots.
2. Waarom is dit een tangentiële versnelling?

Definitie 2.5.3. (Werkdefinitie). Als enkel de *richting* van de snelheidsvector verandert, spreekt men over een **normale versnelling** $\vec{a}_n$. In dit geval staat de versnellingsvector normaal of loodrecht op de snelheidsvector. Dit komt voor bij tweedimensionale cirkelbewegingen waarbij de grootte van de snelheid onveranderd blijft.

Voorbeeld 2.5.3. De auto in onderstaande afbeeldingen rijdt op een rotonde. De grootte van de snelheid is constant, maar de richting van de snelheid wijzigt. De auto ondergaat een normale versnelling.



Opmerking 2.5.1. Een combinatie van de twee types versnelling is ook mogelijk, bijvoorbeeld bij een schuin geworpen basketbal. Ze worden dan gegeven door de vectorcomponenten van de versnelling volgens de snelheid en loodrecht op de snelheid.



2.5 De versnelling

Gemiddelde versnelling bij eendimensionale bewegingen

Definitie 2.5.4. Bij eendimensionale bewegingen wordt de gemiddelde versnelling $\bar{a}$ gedefinieerd als

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Ogenblikkelijke versnelling bij eendimensionale bewegingen

De gemiddelde versnelling $\bar{a}$ geeft de verandering in snelheid *tussen* twee tijdstippen t_1 en t_2 . Om de ogenblikkelijke versnelling a op één tijdstip t te bepalen wordt – net zoals bij de ogenblikkelijke snelheid – gebruik gemaakt van de afgeleide.

Definitie 2.5.5. De ogenblikkelijke versnelling wordt gedefinieerd als de afgeleide van de snelheidsfunctie $v(t)$:

$$a = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{v(t) - v(t_0)}{t - t_0} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

De notatie met een accent $a(t) = v'(t)$ of $a = v'$ wordt op dezelfde manier als in de wiskunde gebruikt. $a(t)$ is een functie die op elk moment de versnelling geeft.

Ogenblikkelijke versnelling bij tweedimensionale bewegingen

In twee dimensies kan de snelheid naast een verandering van grootte ook een verandering van richting hebben. Om die te beschrijven is een vector het aangewezen object.

Definitie 2.5.6. De **versnellingsvector** $\vec{a}$ van een lichaam wordt gedefinieerd als de afgeleide van de snelheidsvector naar de tijd:

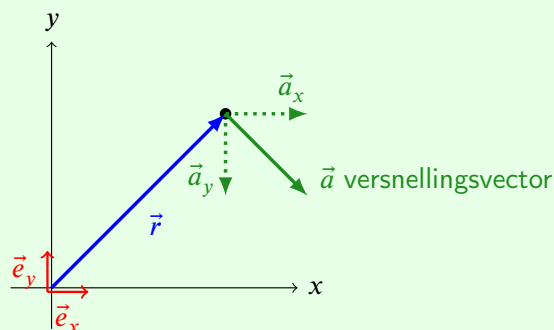
$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt},$$

en kan worden opgesplitst in versnellingscomponenten a_x en a_y :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(v_x \cdot \vec{e}_x + v_y \cdot \vec{e}_y) = \frac{dv_x}{dt} \cdot \vec{e}_x + \frac{dv_y}{dt} \cdot \vec{e}_y = a_x \cdot \vec{e}_x + a_y \cdot \vec{e}_y$$

De grootte van de versnelling wordt genoteerd met het symbool a en is gelijk aan

$$a = \|\vec{a}\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$



Figuur 29: Een versnellingsvector $\vec{a}$

2.5 De versnelling

Opmerking 2.5.2. Het begrip versnelling in de fysica heeft niet altijd dezelfde betekenis als in de volksmond.

In de volksmond:

versnelling = vergroten van snelheid

vertraging = verkleinen van de snelheid

bocht maken = richtingsverandering van de snelheid

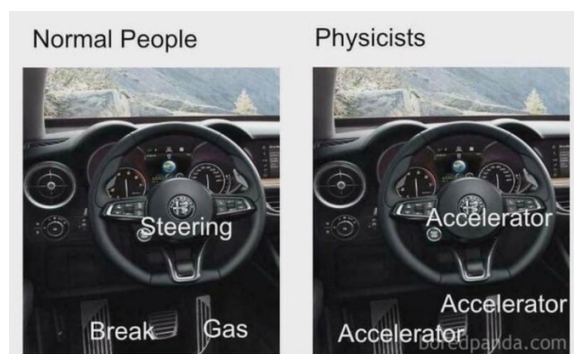
In de fysica:

versnelling = verandering van snelheid in eender welk opzicht

De versnelling in de fysica is de grootte $\vec{a}$ zoals die hierboven gedefinieerd is. We spreken van een vertraging wanneer de grootte van de snelheid afneemt. Dat kan voorkomen wanneer de snelheid (wat een vector is) en de versnelling (wat dus ook een vector is) een tegengestelde zin hebben. Hebben ze dezelfde zin, dan versnelt het voorwerp.

Opmerking 2.5.3. Wagens en fietsen hebben ook versnellingen. Weet dat deze versnellingen nauwelijks iets te maken hebben met het fysisch begrip versnelling. Een auto die in derde versnelling met een constante snelheid van 50 km/h rechtdoor rijdt, versnelt bijvoorbeeld helemaal niet. Zijn versnelling is 0 m/s². Een juistere naam om de standen van de versnellingspook of de ketting weer te geven had eigenlijk "snelheid" geweest omdat de versnelling waarin je rijdt veel meer zegt over welke snelheid je hebt. Kleine versnellingen gebruik je voor kleine snelheden en grote versnellingen voor grote snelheden. Onze Franstalige zuiderburen hebben daar een logischere naam voor, namelijk: "vitesse" (= snelheid). Probeer dus de begrippen snelheid en versnelling niet door elkaar te gooien, want ze hebben een heel andere betekenis! Het is alsof je zou zeggen dat positie en snelheid hetzelfde is!

Oefening 2.5.2. Verklaar onderstaande meme.



2.6 Oefeningen kinematica

2.6 Oefeningen kinematica

Oefening 2.6.1. Kan de snelheid van een voorwerp gelijk zijn aan nul, terwijl de versnelling verschillend is van nul? Motiveer je antwoord.

Oefening 2.6.2. Kan een voorwerp dat een positieve versnelling heeft een negatieve snelheid hebben? Kan het omgekeerde ook? Licht je antwoord toe.

Oefening 2.6.3. Een puntmassa beweegt volgens de plaatsfunctie

$$x(t) = t^3 - 3t^2 - 10t$$

Bereken haar snelheidscomponent telkens als ze het vertrekpunt passeert. Hoe groot is dan de versnellingscomponent?

Oefening 2.6.4. Een veerman tracht een stromende rivier loodrecht over te roeien. Hij slaagt erin ten opzichte van het water een snelheid van 2,00 m/s te ontwikkelen – de stroomsnelheid is 1,25 m/s. De rivier is 150 m breed.

1. Onder welke hoek ten opzichte van de loodlijn op de oever moet hij steeds blijven roeien?
2. Hoeveel tijd heeft de veerman nodig om de overzijde te bereiken?

Oefening 2.6.5. De coördinaten van een deeltje worden als functie van de tijd gegeven door

$$\begin{cases} x = t^2 \\ y = t^2 \end{cases}$$

Meerkeuze:

- | | |
|---|---|
| (a) Dan is de versnelling steeds evenwijdig aan de x -as. | (c) Dan maakt de versnelling steeds een hoek van 45° met de x -as. |
| (b) Dan is de versnelling steeds evenwijdig aan de y -as. | (d) Dan wordt het deeltje niet versneld |

Oefening 2.6.6. De positie van een deeltje als functie van de tijd wordt beschreven door

$$\vec{r} = bt\vec{e}_x + (c - dt^2)\vec{e}_y$$

met $b = 2,00 \text{ m s}^{-1}$, $c = 5,00 \text{ m}$ en $d = 1,00 \text{ m s}^{-2}$.

1. Druk y uit in functie van x . Hoe ziet de baan eruit?
2. Bepaal de snelheidsvector.
3. Op welk tijdstip ($t > 0$) staat de snelheid loodrecht op de plaatsvector?

Oefening 2.6.7. Een voorwerp maakt een beweging met volgende plaatscoördinaten:

$$x = 8t^3, \quad y = t^6 - 2,$$

met x, y in m en t in s.

2.6 Oefeningen kinematica

1. Bepaal de verplaatsing tussen $t = 0$ s en $t = 1$ s.
2. Bepaal de snelheidsvector en de versnellingsvector op tijdstip $t = 1$ s.
3. Is er op $t = 1$ s een tangentiële versnelling, een normale versnelling, of beide?
4. Bepaal de baanvergelijking van de baan van het voorwerp.

Oefening 2.6.8. Vergelijk de begrippen *verplaatsing* en *afgelegde weg* met elkaar. Geef dus enkele gelijkenissen en enkele verschillen.

Oefening 2.6.9. De plaatsvector van een deeltje wordt (voor $t \geq 0$) gegeven door

$$\vec{r} = -t\vec{e}_x + (t-1)^2\vec{e}_y$$

- (a) Geef de baanvergelijking.
- (b) Wanneer is één van de snelheidscomponenten nul?
- (c) Hoe groot is dan de snelheid?
- (d) Waar is het deeltje dan?
- (e) Geef de versnellingsvector.
- (f) Raakt de versnellingsvector aan de baan? Licht toe.

Oefening 2.6.10. De coördinaten van een puntmassa veranderen als volgt:

$$x(t) = 3t^2 \quad y(t) = 2t^4$$

- (a) Bepaal de positie van het voorwerp na 2,0 s.
- (b) Bepaal de vergelijking van de baan van het deeltje.
- (c) Op welk ogenblik bedraagt de grootte van de snelheid 10 m/s?
- (d) Teken de snelheidsvector op de baan op dat ogenblik. Welke hoek maakt ze met de x -as?

Oefening 2.6.11. De beweging van een voorwerp wordt beschreven door volgende coördinaatfuncties:

$$x(t) = 5t + 3 \quad y(t) = -4t^2 + t$$

- (a) Geef de verplaatsing tussen 2,0 s en 4,0 s en bereken haar grootte.
- (b) Geef de ogenblikkelijke snelheid op 2,0 s.
- (c) Geef de baanvergelijking.

Oefening 2.6.12. Als $a_x = 0$, wat weet je dan over de snelheid?

3.1 Inleiding

3.1 Inleiding

Beweging beschrijven is niet zo simpel als het in eerste instantie lijkt. Zo is bijvoorbeeld de beweging van een wolk eerder complex. Wat reken je al dan niet tot de wolk? Ook de bewegingen van de afzonderlijke moleculen in kaart brengen is een onmogelijke opgave omdat het aantal moleculen eerder groot is. Om toch vooruitgang te kunnen boeken, beginnen we met voorwerpen die we als een punt kunnen voorstellen. We maken dan abstractie van de ruimtelijke vorm van het object dat we beschrijven en doen alsof we het kunnen reduceren tot één enkele plaats in de ruimte. Zo zouden we het vliegen van een vlieg doorheen de kamer kunnen bekijken als een stipje. Het bewegen van de vleugels of de oriëntatie van de kop van de vlieg laten we dan buiten beschouwing. Ook deze beschrijving kunnen we inperken; we gaan in eerste instantie enkel bewegingen beschrijven die voor te stellen zijn op een rechte lijn. Dit noemen we eendimensionale bewegingen. Als we de beschrijving hiervan eenmaal kennen, kunnen we later dit later gemakkelijk uitbreiden naar een beschrijving van bewegingen in twee of drie dimensies.

Om het ons gemakkelijk te maken, zullen we in dit hoofdstuk enkel werken met de getalcomponenten van de vectoren. Dat gaat omdat we steeds in één dimensie werken en de eenheidsvector dan steeds gelijk blijft. Als we v_x kennen, vinden we direct de vectorcomponent volgens de x -as met $\vec{v}_x = v_x \cdot \vec{e}_x$. Bovendien kunnen we de index x ook weglaten. We weten dat het steeds over de x -as gaat.

9

⁹In de fysica gebruiken we de wiskunde als 'taal' om de wetmatigheden van de natuur in uit te drukken. Wiskundige variabelen en objecten zoals functies krijgen nu een fysische betekenis. $x(t)$ is dus niets anders dan een functie $f(x)$ of $y(x)$ zoals je die in wiskunde kent. Alleen nemen wij nu niet voor de onafhankelijke variabele het symbool x maar het symbool t omdat het symbool moet staan voor de tijd. En voor het symbool f of y gebruiken wij nu het symbool x omdat de beeldwaarden van de functie nu als betekenis een positie op een coördinaatsas hebben.

3.2 Eenparige rechtlijnige beweging

3.2 Eenparige rechtlijnige beweging

Een eenvoudige beweging om te bestuderen is de *eenparig rechtlijnige beweging* (afgekort ERB). De snelheid van de beweging is eenparig¹⁰ of gelijkmatig verdeeld wat betekent dat de snelheid steeds gelijk blijft. De snelheid is m.a.w. constant en dus de versnelling gelijk aan nul. Aangezien de snelheid niet verandert is de ogenblikkelijke snelheid gelijk aan de gemiddelde snelheid. Met deze observatie kan je eenvoudig een functie opstellen voor de plaatsfunctie van deze beweging:

$$\begin{aligned} v &= \frac{\Delta x}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta x = v \Delta t \\ &\Leftrightarrow x - x_0 = v(t - t_0) \\ &\Leftrightarrow x = x_0 + v(t - t_0) \end{aligned}$$

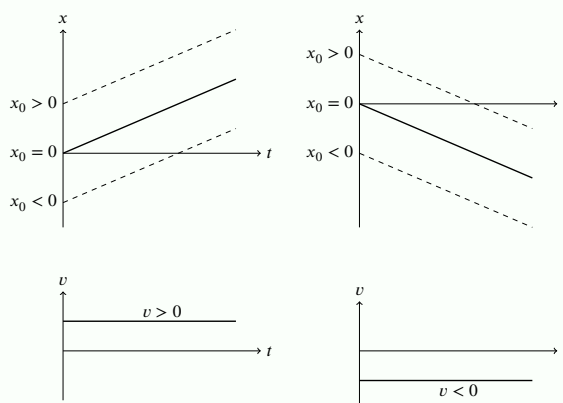
Stelling 3.2.1. De plaatsfunctie $x(t)$ van een ERB met snelheid v is gegeven door:

$$x(t) = x_0 + v(t - t_0)$$

waarbij $x_0 = x(t_0)$ de coördinaat op het tijdstip t_0 is. Als $t_0 = 0$ dan vereenvoudigt de plaatsfunctie tot

$$x(t) = x_0 + vt \quad (1)$$

De snelheid v is gelijk aan de beginsnelheid $v_0 = v(t_0)$ omdat in een ERB de snelheid constant is. De snelheidsfunctie is $v(t) = v$ en de versnellingsfunctie is $a(t) = 0$.



Figuur 30: Grafieken van de ERB

¹⁰Van Dale: zonder onderling verschil; gelijk

3.3 Eenparige versnelde rechtlijnige beweging

3.3 Eenparige versnelde rechtlijnige beweging

De ééndimensionale beweging met een constante versnelling wordt de *eenparig veranderlijke rechtlijnige beweging* genoemd (EVRB). Eenparig betekent gelijkmatig; bij een constante versnelling is de *verandering* van de snelheid steeds gelijk. De grafiek van $a(t) = a$ is een constante met a een reëel getal is. Ook voor deze beweging kan je de plaatsfunctie en snelheidsfunctie bepalen en zo het verloop van de plaats en snelheid in functie van de tijd kennen.

De versnelling is de afgeleide van de snelheid. Voor een constante versnelling is de snelheid in functie van de tijd een lineaire functie (in de tijd).

Opmerking 3.3.1. Strikt genomen wordt hier iets over het hoofd gezien. A priori zou het immers kunnen dat er nog andere functies dan lineaire functies zijn waarvoor de afgeleide een constante functie is. Dat is echter niet het geval. Het bewijs hiervan zie je later dit jaar in het vak wiskunde. Je bewijst dat alle mogelijke functies die in aanmerking komen slechts op een constante na aan elkaar gelijk zijn.

Uit het snelheidsverloop kan je de plaats afleiden. De snelheid is de afgeleide van de plaatsfunctie. Voor een lineaire snelheidsfunctie is de positie bijgevolg een kwadratische functie (in de tijd). De afgeleide van een kwadratische functie is immers een lineaire functie.¹¹

Dat de positie in functie van de tijd een tweedegraadsveeltermfunctie is, geeft in symbolen:

$$x(t) = pt^2 + qt + r$$

De constanten p , q en r is deze formule hebben een fysische betekenis. De snelheid is de afgeleide van deze plaatsfunctie en de versnelling komt overeen met de tweede afgeleide. Dit levert:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = 2pt + q$$

$$a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = 2p$$

Voor de EVRB is de versnelling constant en bijgevolg volgt uit de laatste regel dat $a(t) = a = 2p \Leftrightarrow p = \frac{a}{2}$.

Noteer met $v_0 = v(0)$ de snelheid op tijdstip $t = 0$. In de eerste vergelijking $t = 0$ invullen levert dan $q = v_0$. De constante q stelt de beginsnelheid voor.

Noteer met $x_0 = x(0)$ de positie op tijdstip $t = 0$. In de plaatsfunctie $t = 0$ invullen levert dan $r = x_0$. De constante r stelt dus de beginpositie voor.

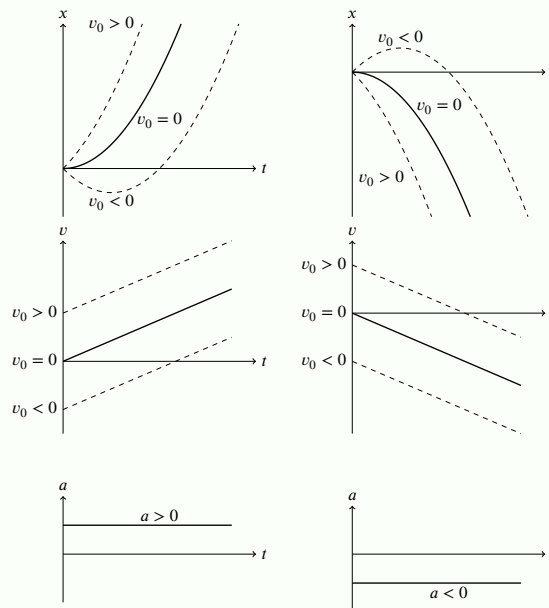
Stelling 3.3.1. De plaatsfunctie $x(t)$ en de snelheidsfunctie $v(t)$ van een EVRB met versnelling a worden gegeven door:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \\ v(t) &= v_0 + at \end{aligned}$$

Hierin is x_0 de *beginpositie* en v_0 de *beginsnelheid*. Ze worden bepaald door de *beginvoorwaarden* of *randvoorwaarden*.

¹¹Hier geldt een gelijkaardige opmerking.

3.3 Eenparige versnelde rechtlijnige beweging



Figuur 31: Grafieken van de EVRB

Indien de beschrijving van de beweging niet op $t = 0$ start, maar op een gegeven tijdstip t_0 , dan wordt in de beschrijving t vervangen door $\Delta t = t - t_0$, de verstreken tijd vanaf het begintijdstip t_0 . De plaatsfunctie en zijn afgeleide worden dan een klein beetje ingewikkelder:

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

$$v(t) = v_0 + a(t - t_0)$$

Met de functies kan je de volgende formule voor de gemiddelde snelheid van een EVRB aantonen:

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$$

Oefening 3.3.1. Bewijs bovenstaande formule.

3.4 Oplossingsstrategie

3.4 Oplossingsstrategie

Vraagstukken in de kinematica kan je vaak op dezelfde manier benaderen. Elke opgave blijft echter anders, creativiteit is dus noodzakelijk.

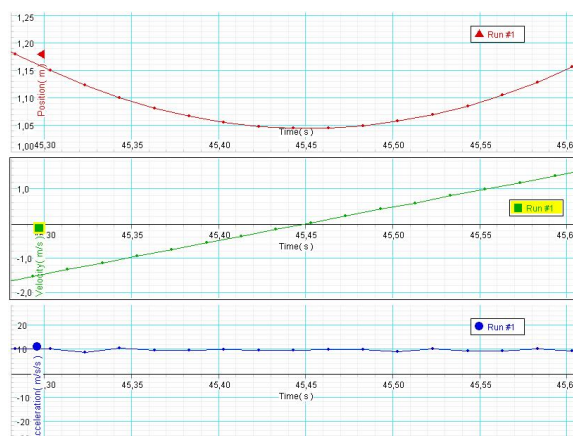
- (a) Lees het vraagstuk aandachtig. Zorg dat je duidelijk weet wat er gevraagd wordt.
 - als je correct de snelheid op t_3 berekent, maar de snelheid op t_2 was gevraagd, is dat een jammere fout ...
 - als je correct de positie op t_1 berekent, maar de positie op t_0 was gevraagd, is dat een jammere fout ...
 - ...
- (b) Kies het systeem (object, lichaam, massa, geheel van lichamen) waarvan je een onbekende positie, snelheid of versnelling wil berekenen.
- (c) Maak een tekening van dit systeem. Teken een coördinaatsas.
- (d) Bepaal de gegevens uit het vraagstuk. Welke heb je nodig om de oplossing te bepalen?
- (e) Gebruik de bewegingsvergelijkingen voor positie, snelheid en versnelling en eventueel ook de geziene definitie- en hulpformules om het gevraagde te berekenen.
- (f) Heeft je oplossing de juiste eenheden en grootteorde? De snelheid van een tennisbal in de eenheid $\frac{s}{m^2}$ is waarschijnlijk fout. Als het enkele minuten duurt voordat de bowlingbal de kegels raakt, heb je waarschijnlijk ergens een (reken)fout gemaakt ...

3.5 Verticale worp

3.5 Verticale worp

Onze perceptie leert dat zwaardere lichamen sneller vallen dan lichtere. Een pluim en een steen komen in regel niet op hetzelfde moment op de grond terecht. Toch blijkt deze intuïtie niet te kloppen. In het jaar 1586 stond een wetenschapper uit Brugge op de Nieuwe Kerk van Delft. [Simon Stevin](#)¹²

liet vanop de kerktoeren twee loden bollen met een verschillende massa vallen en stelde vast dat ze op hetzelfde moment de grond raakten.



Figuur 32: Experimenteel bekomen grafieken van een verticale worp waarbij de as naar beneden is georiënteerd.

In vacuüm – waar voorwerpen geen luchtweerstand ondervinden – blijkt de massa geen rol te spelen bij de constante versnelling die de voorwerpen krijgen: alle voorwerpen vallen met dezelfde versnelling! Met lode bollen kon Simon Stevin het effect van de luchtweerstand uitschakelen. De theoretische verklaring voor dit experiment hoort thuis in de dynamica. In de kinematica wordt enkel de beweging beschreven. Omdat de valversnelling constant is, heb je hier simpelweg met een EVRB te maken.

Strikt genomen verschilt de valversnelling van plaats tot plaats op de aarde, maar voor het gemak nemen wij in vraagstukken de waarde

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

Omdat de verticale worp een EVRB is, kunnen we de formules voor de plaatsfunctie en snelheidsfunctie gebruiken om een valbeweging te beschrijven. Voor de versnelling a nemen we dan $a = g$ of $a = -g$ al naargelang de oriëntatie van de coördinaatsas.

Vlugge Vraag

Als je een tennisbal in de lucht gooit, op welk(e) moment(en) is de versnelling 0? Op welk(e) moment(en) is de snelheid 0?

Vlugge Vraag

Leg de fysische betekenis uit indien de zin van de snelheidsvector en versnellingsvector tegengesteld zijn. Wat indien ze dezelfde zin hebben?

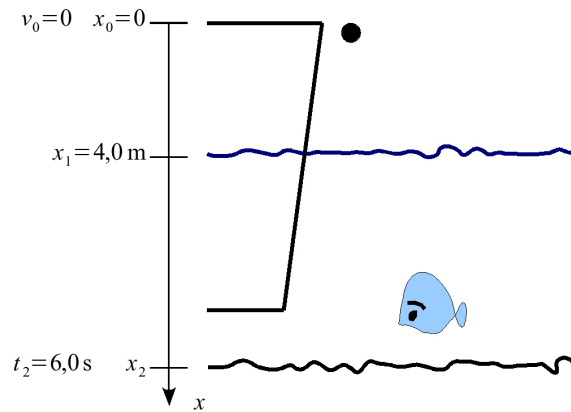
¹²Het woord *mathematica* vindt zijn etymologische stam in het Griekse *μαθηματική*, wat in ons alfabet overeenkomt met *mathēmatiké*. Vandaag merk je deze invloed in het Franse *mathématiques*, het Spaanse *matemáticas*, het Turkse *matematik* of het Zweedse *matte*. Dat men in het Nederlandse taalgebied over *wiskunde* spreekt, komt door Simon Stevin.¹³

¹³Het Griekse *φυσική*, wat in ons alfabet overeenkomt met *physiké*, is de ethomologische stam van het woord *fysica*. Vandaag merk je deze invloed in het Franse *physique*, het Spaanse *física*, het Turkse *fizik* of het Zweedse *fysik*. Dat men in het Nederlandse taalgebied over de *natuurkunde* spreekt, komt door Simon Stevin.¹⁴

¹⁴Voor de kunst van het scheiden vervolledigt de lezer deze voetnoot zelf... (*khēmíā*, chimie, química, kimya, kemi)

3.5 Verticale worp

Oefening 3.5.1. Simon Stevin laat van de boord van een schip een loden bol in het water vallen. De boord bevindt zich 4 m boven het wateroppervlak. De loden bol zinkt vervolgens met de snelheid waarmee hij het water raakte. Er zijn 6 s tussen het loslaten van de bol en het raken van de bodem.



1. Hoe diep is het water?
2. Wat is de gemiddelde snelheid van de bol over het hele traject?

3.6 Oefeningen**3.6 Oefeningen**

De oefeningen zijn opgedeeld in denkvragen en vraagstukken. Zie daarvoor de hierbij horende onderdelen.

De denkvragen bevatten conceptuele oefeningen, oefeningen die zuiver op algebraïsche manipulaties focus-
sen, grafische oefeningen, vragen die op theoretische aspecten ingaan . . .

3.6.A Denkvragen

3.6.A Denkvragen

Oefening 3.6.1. Als de grootte van de snelheid van een voorwerp toeneemt, neemt de versnelling dan noodzakelijkerwijs ook toe? Motiveer je antwoord.

Oefening 3.6.2. Kan de gemiddelde snelheid van een deeltje over een gegeven tijdsinterval gelijk zijn aan nul, terwijl de grootte van de snelheid over een kortere tijdsduur binnen dat tijdsinterval verschillend is van nul? Verklaar je antwoord.

Oefening 3.6.3. Geef een voorbeeld waarin zowel de snelheids- als de versnellingscomponent negatief zijn.

Oefening 3.6.4. Wanneer een voorwerp zich met een constante snelheid verplaatst, verschilt de gemiddelde snelheid over een willekeurig tijdsinterval dan van de ogenblikkelijke snelheid op een willekeurig moment?

Oefening 3.6.5. Een puntmassa voert een eenparig veranderlijke rechtlijnige beweging uit over het tijdsinterval $[0, 2\text{ s}]$ met beginsnelheid en beginpositie van respectievelijk 0 m/s en 0 m . De versnelling is 3 m/s^2 . Waarom kan je onmiddellijk stellen dat als in het tijdsinterval de tijd half om is, de puntmassa nog niet halfweg is?

1. Leg in woorden uit op welke manier je onmiddellijk kan inzien dat het te bewijzen juist is.
2. Controleer het te bewijzen via de numerieke waarden van dit vraagstuk.
3. Geef nu het bewijs.

Oefening 3.6.6. Een massa vertrekt vanuit rust om een eenparig versnelde rechtlijnige beweging uit te voeren. Als haar beginpositie 0 m is, welke van de volgende betrekkingen is dan juist?

Meerkeuze:

(a) $t = \frac{x}{2v}$

(c) $t = \frac{v}{2x}$

(b) $t = \frac{2x}{v}$

(d) $t = \frac{2v}{x}$

Oefening 3.6.7. De snelheid van een lichaam dat vanuit rust vrij valt, bedraagt na een valafstand x :

Meerkeuze:

(a) $v = 2gx$

(c) $v = gx$

(b) $v = \sqrt{2gx}$

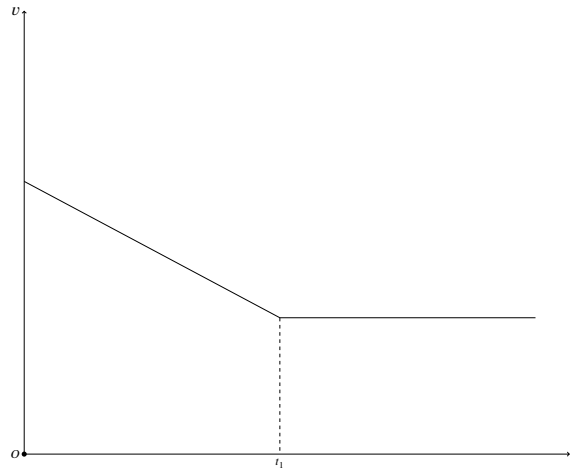
(d) $v = \sqrt{\frac{gx}{2}}$

Oefening 3.6.8. Laat zien dat voor een EVRB volgende formule geldt:

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$$

3.6.A Denkvragen

Oefening 3.6.9. Teken de overeenkomstige $x(t)$ - en $a(t)$ -grafiek bij de gegeven $v(t)$ -grafiek. Ga ervan uit dat $x_0 = 0$ m.

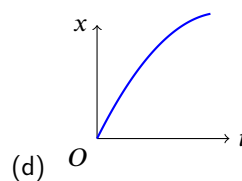
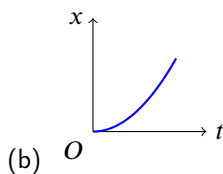
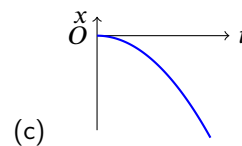
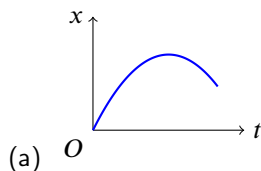


Figuur 33: Snelheidsverloop in functie van de tijd

Oefening 3.6.10. De snelheid van een deeltje voldoet aan $v = at$ waarin a constant en negatief is. De plaats van het deeltje wordt voorgesteld door x . Aangenomen wordt dat $x = 0$ m op het ogenblik $t = 0$ s.

Welke grafiek geeft het juiste verloop van $x(t)$?

Meerkeuze:



Oefening 3.6.11. Beargumenteer het gebruik van het model van een eenparig versnelde rechtlijnige beweging (EVRB) voor de vrije beweging van een wagentje op een helling. Denk daarbij aan een proefneming die we in de klas deden. De notie kracht moet je hier even buiten beschouwing laten.

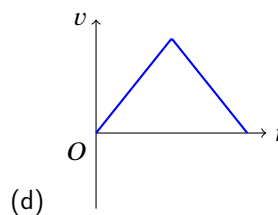
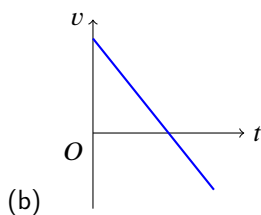
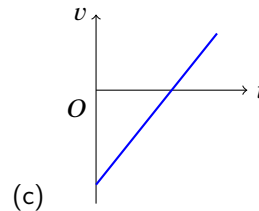
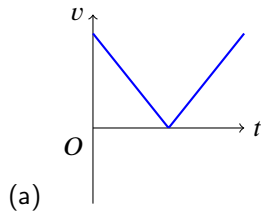
Oefening 3.6.12. Kan de bewegingszin van een voorwerp omkeren terwijl de versnelling gelijk blijft? Zo ja, geef dan een voorbeeld. Zo nee, leg uit waarom dat niet kan.

Oefening 3.6.13. Kan een voorwerp dat een positieve versnelling heeft een negatieve snelheid hebben? Kan het omgekeerde ook?

3.6.A Denkvragen

Oefening 3.6.14. Een lichaam wordt verticaal omhoog geworpen. De referentieas is omhoog gericht. Welke van de volgende $v(t)$ -diagrammen geeft dan het juiste verloop van de snelheid weer?

Meerkeuze:



Oefening 3.6.15. Vanaf een klif laat men vanop dezelfde hoogte twee identieke bollen vallen. Men laat de tweede bol één seconde later vallen dan de eerste. De luchtwrijving is *niet* te verwaarlozen. Dan

Meerkeuze:

- | | |
|--|--|
| (a) zal de tweede bol iets later dan één seconde na de eerste neerkomen. | (c) zal de tweede bol exact één seconde na de eerste neerkomen. |
| (b) zal de tweede bol iets vroeger dan één seconde na de eerste neerkomen. | (d) kunnen we hieromtrent geen uitspraak doen bij gebrek aan gegevens. |

Oefening 3.6.16. Vanop een grote hoogte laat men achtereenvolgens twee stenen vallen met een tussentijd van 2 seconden. Op welke wijze verandert de afstand tussen beide stenen in de tijdsduur dat beide vallen? Geef een tijdsafhankelijk voorschrift voor die afstand.

Oefening 3.6.17. Aan de rand van een afgrond laat men een steen vallen. Op hetzelfde ogenblik werpt men een steen op. Zou het kunnen dat, als de afgrond diep genoeg is, beide stenen elkaar nog ontmoeten?

Oefening 3.6.18. Op de maan is de valversnelling slechts een zesde van die op de aarde. Als een voorwerp op de maan verticaal omhoog wordt gegooid, hoeveel maal hoger komt het dan een voorwerp dat met dezelfde beginsnelheid vanaf de aarde wordt opgeworpen?

3.6.B Vraagstukken**3.6.B Vraagstukken**

Oefening 3.6.19. Een automobilist rijdt op een rechte baan gedurende 1,5 h aan 80 km h^{-1} en daarna gedurende dezelfde tijdsduur aan 70 km h^{-1} in dezelfde zin.

1. Wat is zijn gemiddelde snelheid?
2. Met welke snelheid had hij moeten rijden om met een constante snelheid hetzelfde traject in dezelfde tijd af te leggen?

Oefening 3.6.20. Een fietser legt een bepaalde afstand af over een zekere tijd. Gedurende de eerste helft van de tijd houdt hij constant een snelheid v_1 aan, gedurende de tweede helft een snelheid v_2 . Wat is zijn gemiddelde snelheid over het totale tijdsinterval?

Oefening 3.6.21. Een automobilist legt 120 km af. De eerste helft van de weg legt hij af aan 90 km h^{-1} , de tweede helft aan 120 km h^{-1} . Wat is zijn gemiddelde snelheid?

Oefening 3.6.22. Een fietser legt een bepaalde afstand af over een zekere tijd. Gedurende de eerste helft van de af te leggen afstand houdt hij constant een snelheid v_1 aan, gedurende de tweede helft een snelheid v_2 . Wat is zijn gemiddelde snelheid over het totale tijdsinterval?

Oefening 3.6.23. Als je met de fiets heen en terug naar school rijdt en in het heengaan tegenwind en in het terugkeren rugwind hebt, compenseert dat dan mekaar precies?

Stel om dit op te lossen dat de weg rechtlijnig is. Bereken je gemiddelde snelheid over het traject heen en terug en vergelijk die met de snelheid die je zonder wind zou halen. Neem aan dat je normaal 20 km h^{-1} zou fietsen, maar door de wind win of verlies je 2 km h^{-1} .

Meerkeuze:

- | | |
|---|--|
| (a) Nee, je hebt netto een nadeel vanwege de tegenwind. | (c) Ja, de afstand heen is de afstand terug, dus het is net alsof je helemaal geen wind had. |
| (b) Nee, je hebt netto een voordeel vanwege de | |

Oefening 3.6.24. Een bowlingbal die met een constante snelheid voortrolt, raakt de kegels aan het einde van een kegelbaan van 16,5 m lengte. De werper hoorde het geluid waarmee de bal op de kegels botst 2,5 s nadat hij de bal losliet. Welke snelheid had de bal? De snelheid van het geluid is 343 m/s .

Oefening 3.6.25. Een vliegtuig moet minstens een snelheid van 108 km h^{-1} hebben om te kunnen opstijgen. Indien de propellers aan het toestel een versnelling van $1,50 \text{ m/s}^2$ geven, hoe lang moet de startbaan dan minstens zijn?

Oefening 3.6.26. Een trein rijdt aan een snelheid van 72 km h^{-1} en remt met een versnelling waarvan de grootte $1,0 \text{ m/s}^2$ bedraagt. Na hoeveel tijd komt de trein tot stilstand en welke afstand wordt er tijdens dit afremmen afgelegd?

Oefening 3.6.27. Op een bevroren meer komt een glijdende hockeyschijf na 200 m tot stilstand. Als zijn initiële snelheid $3,00 \text{ m/s}$ was, bepaal dan

1. Bepaal de versnelling in de veronderstelling dat deze constant is.

3.6.B Vraagstukken

2. Bepaal de tijd die de schijf nodig heeft om tot stilstand te komen.

Oefening 3.6.28. Een bootje vaart met een snelheid van $36,0 \text{ km h}^{-1}$ een eerste tijdopnemer voorbij en drijft daarna eenparig zijn snelheid op. Na $20,0 \text{ s}$ komt het voorbij een tweede tijdopnemer met een snelheid van $90,0 \text{ km h}^{-1}$. Bereken de versnelling van het bootje en de afstand tussen beide tijdopnemers.

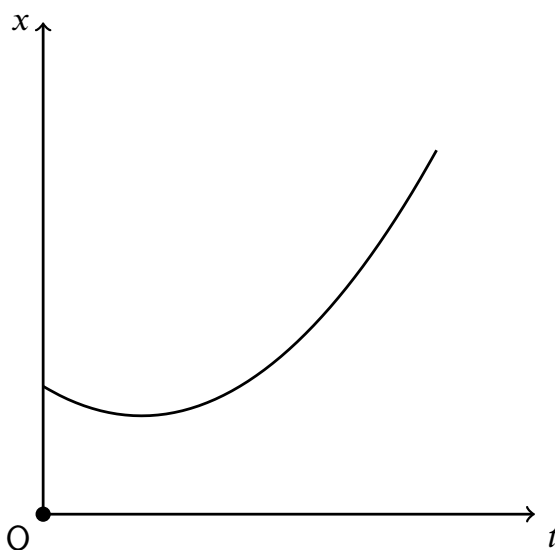
Oefening 3.6.29. Een auto vertrekt vanuit rust en bereikt na $3,0 \text{ km}$ een snelheid van 450 km h^{-1} . We onderstellen de versnelling constant en de baan recht. Bereken de versnelling en de tijd, nodig om die $3,0 \text{ km}$ af te leggen.

Oefening 3.6.30. Een auto begint te remmen als hij zich 35 m van een stilstaande hindernis bevindt. Zijn snelheid op dat moment is 54 km h^{-1} . Na $4,0 \text{ s}$ botst hij tegen de hindernis. Bereken de snelheid waarmee hij de hindernis raakt en zijn constante versnelling gedurende de remweg.

Oefening 3.6.31. Twee fietsers vertrekken gelijktijdig om een afstand van 200 m af te leggen. De eerste rijdt met een constante snelheid van $4,0 \text{ m/s}$, terwijl de tweede vertrekt met een snelheid van $1,00 \text{ m/s}$ en de afstand van 200 m met een EVRB met een versnelling van $0,20 \text{ m/s}^2$ aflegt. Waar zal de tweede fietser de eerste inhalen en wanneer?

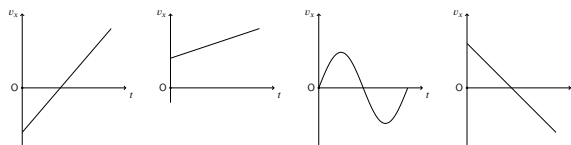
Oefening 3.6.32. Een trein vertrekt om 12u00 in het station a en rijdt naar het station b, op 15 km van a gelegen. De eerste 1000 m worden afgelegd met een EVRB en de verkregen snelheid is 72 km h^{-1} . Die snelheid blijft constant tot op 250 m van b. Hier begint de trein te vertragen. Om hoe laat komt de trein in station b toe? Maak de $v(t)$ -grafiek.

Oefening 3.6.33. Een deeltje beschrijft een eendimensionale beweging op de x -as. De positie als functie van de tijd is hiernaast weergegeven in een $x(t)$ -diagram. Duid de onderstaande grafiek aan die het best het verloop weergeeft van de snelheidscomponent v van dat deeltje als functie van de tijd.

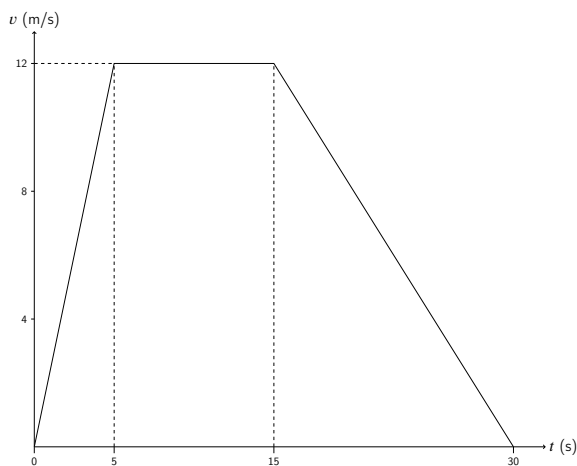


Figuur 34: De grafiek van de plaatsfunctie $x(t)$ -diagram

3.6.B Vraagstukken



Oefening 3.6.34. Een deeltje beweegt in de zin van de x -as. De onderstaande grafiek geeft aan hoe de grootte van de snelheid verandert als functie van de tijd.

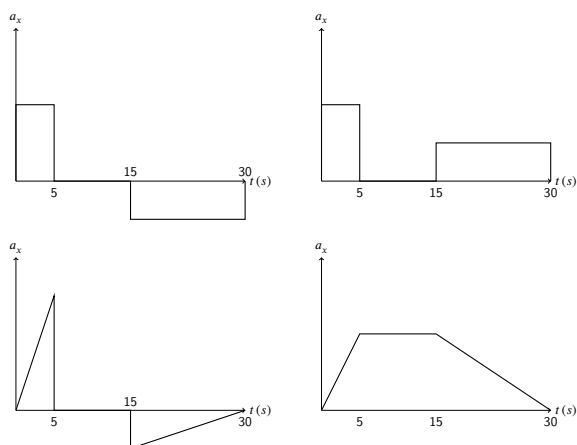


Figuur 35: snelheidsfunctie

- De afstand afgelegd na 15 s bedraagt:

30 m	120 m	150 m	240 m
------	-------	-------	-------
- Na 30 s heeft het deeltje een welbepaalde afstand afgelegd. Hoe groot zou de constante snelheid van het deeltje moeten zijn om in 30 s dezelfde afstand af te leggen?

$0,0 \text{ m s}^{-1}$	$6,0 \text{ m s}^{-1}$	$8,0 \text{ m s}^{-1}$	12 m s^{-1}
------------------------	------------------------	------------------------	-----------------------
- Welke figuur geeft kwalitatief het verloop van de versnellingscompent van het deeltje weer?



3.6.B Vraagstukken

Oefening 3.6.35. (***) Maggie en Jennifer lopen de 100 m. Beiden doen ze er exact 10,2 s over. Met een eenparige versnelling bereikt Maggie na 2 s haar maximale snelheid, Jennifer doet dat na 3 s. Hun maximale snelheden houden ze aan voor de rest van de wedstrijd.

1. Wat zijn hun maximale snelheden?
2. Wat is de versnelling van iedere sprinter?
3. Wie heeft er voorsprong na 6 s, en hoeveel?

Oefening 3.6.36. Een auto die 90 km h^{-1} rijdt, ligt 100 m achter op een vrachtwagen die 75 km h^{-1} rijdt. Hoeveel tijd kost het de auto om de vrachtwagen in te halen?

Oefening 3.6.37. De snelheid van een trein verandert eenparig in 2 minuten van 20 km h^{-1} tot 30 km h^{-1} . De trein rijdt gedurende die tijd over een rechte spoorlijn.

1. Bepaal de versnelling.
2. Bepaal de afstand die de trein heeft afgelegd gedurende deze 2 minuten.

Oefening 3.6.38. Een auto trekt in 5,0 s op van 10 m/s naar 25 m/s. Wat was de versnelling in de veronderstelling dat de auto een EVRB ondergaat? Welke afstand legde de auto in deze periode af?

Oefening 3.6.39. Op een vliegdekschip worden vliegtuigen gekatapulteerd op een startbaan van 25 m. Een opstijgend vliegtuig doorloopt dat traject vanuit rust op 1 s tijd en dat op eenparig versnelde manier.

Zoek zijn versnelling en de snelheid waarmee het de baan verlaat.

Oefening 3.6.40. Een auto trekt vanuit rust op tot 100 km h^{-1} in 6,0 s. Als hij dat doet op een rechte baan met constante versnelling, welke afstand is er dan hiervoor nodig?

Oefening 3.6.41. Een vliegtuig landt met een snelheid van 100 m/s. Op de landingsbaan heeft het een vertraging van $5,0 \text{ m/s}^2$. Welke afstand heeft het vliegtuig nodig om tot stilstand te komen?

Oefening 3.6.42. Een trein vertrekt uit een station en rijdt op een recht spoor met een eenparig versnelde beweging waarvan de versnelling $0,50 \text{ m/s}^2$ bedraagt. Hoe groot is de afstand die de trein heeft afgelegd als zijn snelheid $72,0 \text{ km h}^{-1}$ bedraagt?

Oefening 3.6.43. Twee personen A en B voeren op dezelfde rechte en vanuit dezelfde beginstand een eenparige beweging uit. A vertrekt 100 s eerder dan B. Met een snelheid die dubbel zo groot is als die van A haalt B, op 400 m van het vertrekpunt, A in. Bereken beide snelheden en stel ze grafisch voor.

Oefening 3.6.44. Aan het begin van een rechte landingsbaan, start een vliegtuig vanuit rust en versnelt met een constante versnelling langs de grond alvorens op te stijgen. Het legt 600 m af in 12 s. Bepaal de versnelling, de snelheid na 12 s en de afstand afgelegd gedurende de twaalfde seconde.

3.6.B Vraagstukken

Oefening 3.6.45. Een auto die 60 km/h rijdt, raakt een boom; de voorkant van de auto wordt in elkaar gedrukt en de bestuurder komt na 70 cm tot stilstand. Welke gemiddelde vertraging onderging de bestuurder tijdens de botsing?

3.6.C Vraagstukken vrije val**3.6.C Vraagstukken vrije val**

Oefening 3.6.46. Welke afstand wordt er door een bungeejumper na een vrije val van 2,5 s afgelegd?

Oefening 3.6.47. Uit een punt op 28,0 m boven de grond wordt een bal verticaal omhoog geworpen met een snelheid van 12 m/s.

1. Bepaal de door de bal bereikte hoogte boven de grond;
2. Bepaal de tijd nodig om de grond te bereiken;
3. Bepaal de snelheid bij het bereiken van de grond.

Oefening 3.6.48. Een pijl wordt verticaal van de grond omhooggeschoten en bereikt na 2,8 s het hoogste punt. Bepaal deze hoogte.

Oefening 3.6.49. Een parachutist in vrije val bereikt een uiteindelijke valsnelheid van 50 m/s. Neem aan dat een geopende parachute voor een constante vertraging van 30 m/s^2 zorgt.^a Wil er bij het neerkomen geen kans op letsel bestaan, dan mag de landingssnelheid niet groter dan 5,0 m/s zijn.

Wat is de minimumhoogte voor het openen van de parachute?

^aDit is een heel ruwe benadering. In feite hangt de vertraging door de parachute namelijk af van de snelheid en is die afhankelijkheid bovendien voor grote snelheden sterker dan voor kleine.

Oefening 3.6.50. Iemand laat een meloen vallen vanop een hoogte van 20 m. Op hetzelfde moment schiet je een pijl verticaal omhoog vanop de grond. De pijl treft de meloen na 1,0 s.

1. Geef in één assenstelsel een verzorgde schets van de grafiek van de plaats in functie van de tijd voor beide objecten.
2. Met welke snelheid heb je de pijl afgeschoten?

Oefening 3.6.51. (***) Wanneer de pelikaan naar vis duikt, trekt hij zijn vleugels in om als een steen verticaal naar beneden te vallen.

Stel een pelikaan duikt vanaf 25 m hoogte en verandert onderweg dus niet meer van koers. Als het een vis 0,15 s kost om te vluchten, wat is dan de hoogte waarop de vis de pelikaan minstens moet opmerken, wil de vis nog kans maken te ontsnappen?

Neem aan dat de vis zich aan het wateroppervlak bevindt.

Oefening 3.6.52. (***) Een verticaal vallende steen legt in de laatste seconde, voor hij de grond bereikt, 100 m af. Men veronderstelt dat hij vanuit rust vertrok.

1. Bepaal de snelheid op het ogenblik dat hij de grond bereikt.
2. Bepaal de hoogte vanwaar de steen viel en de tijd die hij daarvoor nodig had.

Oefening 3.6.53. (***) Van de Empire State Building in New York komt op 250 m een ijskegel los en valt naar beneden.

1. Na hoeveel tijd en met welke snelheid bereikt het ijskegeltje uiteindelijk de grond?
2. Hoelang en over welke afstand moet de ijskegel al gevallen zijn om in de daaropvolgende 2 s een afstand te kunnen afleggen van 100 m?

3.6.C Vraagstukken vrije val

Oefening 3.6.54. (***) Een zieke man zit voor een raam dat 2,0 m hoog is. Een steen wordt vanop de grond opgeworpen en passeert het raam een keer opwaarts en een keer neerwaarts. De man ziet de steen in totaal voor exact één seconde.

1. Bepaal de snelheid waarmee de steen de onderkant van het raam bereikt in zijn opwaartse beweging en in zijn neerwaartse beweging.
2. Toon aan dat het met deze gegevens niet mogelijk is te berekenen hoe hoog het raam boven de grond is gelegen.

Oefening 3.6.55. (***) Een student gooit een sleutelbos verticaal omhoog naar een medebewoonster in een raam 4,00 m hoger. De sleutels worden 1,50 s later opgevangen.

1. Wat was de snelheid waarmee de sleutels omhoog werden gegooit?
2. Welke snelheid had de sleutelbos vlak voordat hij werd opgevangen?

Oefening 3.6.56. (***) Een voorwerp wordt verticaal omhoog geworpen en bereikt na een tijd t een hoogte h . Toon aan dat de maximale hoogte $h_{\max}$ die het voorwerp bereikt, wordt gegeven door:

$$h_{\max} = \frac{(gt^2 + 2h)^2}{8gt^2}.$$

4.1 Inleiding

4.1 Inleiding

Als we in een vlak bewegen, hebben we te maken met een tweedimensionale beweging. Ten opzichte van een referentiestelsel met twee assen, kunnen we de beweging beschrijven.



Figuur 36: Sterrentrajecten aan de hemel

We behandelen twee concrete bewegingen in dit hoofdstuk, de horizontale worp en de eenparig cirkelvormige beweging.

4.2 Het onafhankelijkheidsbeginsel

4.2 Het onafhankelijkheidsbeginsel

Om even over na te denken ...

In onderstaand filmpje wordt een bal verticaal opgeworpen vanuit de laadbak van een horizontaal bewegende pick up truck. Heeft de horizontale beweging van de bal een invloed op de verticale beweging van de bal?

YouTube link: <https://www.youtube.com/watch?v=j1URC2G2qnc>



Definitie 4.2.1. Het **onafhankelijkheidsbeginsel** stelt dat een beweging in een bepaalde richting geen invloed heeft op de beweging in een andere richting.

Als gevolg kunnen we een tweedimensionale beweging beschrijven als een samenstelling van een horizontale en een verticale beweging, onafhankelijk van elkaar.

4.3 De eenparig cirkelvormige beweging

4.3 De eenparig cirkelvormige beweging

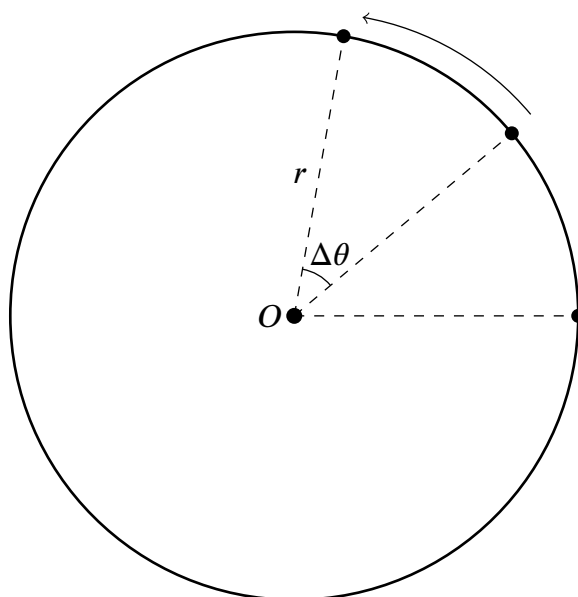
De cirkelbeweging is op het eerste zicht misschien een zeer eenvoudige beweging maar wel alom tegenwoordig. Denk maar aan een kermisattractie zoals een carrousel, wielen, planeetbanen of aan het nemen van een bocht met de auto of de fiets. Vandaar dat het een toch een zeer belangrijke beweging is. Wij bestuderen een eenparige cirkelvormige beweging (ECB). Dat betekent dat de baan van het object een cirkel is en dat de grootte van de snelheid waarmee de baan wordt doorlopen, constant is.

4.3.1 Enkele begrippen

Om een cirkelbeweging te beschrijven, hebben we enkele begrippen nodig die je eventueel nog onbekend zijn. Zo is er de *frequentie*. Het is algemeen het aantal cyclussen van een periodieke beweging die per seconde worden doorlopen. Specifiek voor de cirkelbeweging is de frequentie dan het aantal keren dat de cirkel doorlopen wordt per tijdseenheid. De frequentie krijgt het symbool f en heeft als eenheid de Hertz, $[f] = \text{Hz} = \text{s}^{-1}$. Het begrip *periode* gebruiken we voor de tijdsduur die nodig is voor het doorlopen van één cyclus. Het symbool is T en de eenheid seconde, $[T] = \text{s}$. Het aantal cyclussen dat in de periode wordt doorlopen is één zodat de volgende relatie tussen de frequentie en de periode bestaat.

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

Als laatste hebben we nog het begrip *hoeksnelheid*.



Verschillende punten op je fietswiel hebben verschillende snelheden als hun afstand tot het centrum verschilt. Het ventieldopje moet immers in eenzelfde tijd meer afstand afleggen dan een reflector op een spaak. Toch bestaat het wiel uit één geheel. Als je naar de omwentelingshoek kijkt die een straal door een punt op het wiel maakt, dan is die voor alle punten gelijk. Daarom definiëren we de hoeksnelheid ω als de verandering van de omwentelingshoek tot de benodigde tijd.¹⁵

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

De eenheid is radialen per seconde, $[\omega] = \text{rad/s}$. Aangezien een volledige omwentelingshoek 2π bedraagt en de tijd nodig om rond te gaan de periode is, geldt

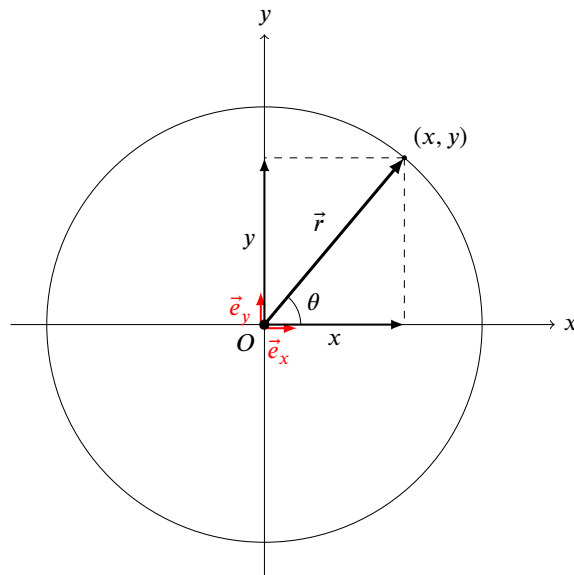
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2)$$

¹⁵De letter ω is de kleine letter van Ω en de laatste letter in het Griekse alfabet. Spreek ω uit als omega. Een ω is geen w , zoals ook een w geen ω is. O wee (ω ?) als je je op het examen in juni vergist ...

4.3 De eenparig cirkelvormige beweging

4.3.2 Kinematica van de cirkelbeweging

We beschouwen een punt dat een cirkelbeweging maakt met straal r . We voeren een assenstelsel in met de oorsprong in het middelpunt van de cirkel.



Als we de omwentelingshoek θ meten vanaf de positieve x -as en en het tijdstip $t_0 = 0$ nemen, kunnen we de doorlopen omwentelingshoek als volgt in functie van de tijd schrijven.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta - \theta_0}{t - t_0}$$

Als we $t_0 = 0$ nemen, komt θ_0 overeen met de starthoek. De formule herschrijven geeft dan voor de ECB een gelijkaardige formule als voor de eenparige rechtlijnige beweging (ERB).

$$\theta = \theta_0 + \omega t$$

Voor de eenvoud nemen we meestal $\theta_0 = 0$ zodat $\theta = \omega t$.

De coördinaatfuncties vinden we dan als projecties op de x - en y -as.

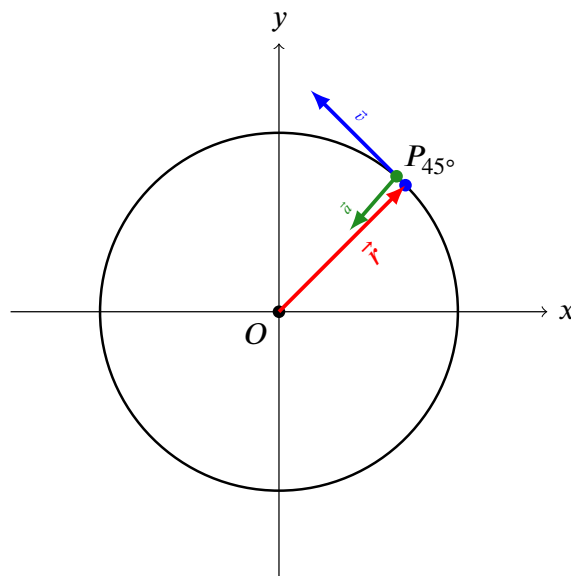
$$\begin{aligned} x(t) &= r \cos \omega t \\ y(t) &= r \sin \omega t \end{aligned}$$

4.3 De eenparig cirkelvormige beweging

We krijgen dan voor de plaatsvector, de snelheid en de versnelling:

$$\begin{aligned}
 \vec{r} &= r \cos \omega t \cdot \vec{e}_x + r \sin \omega t \cdot \vec{e}_y \\
 \Downarrow \quad \begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = -\omega r \sin \omega t \\ v_y = \frac{dy}{dt} = \omega r \cos \omega t \end{cases} \\
 \vec{v} &= -\omega r \sin \omega t \cdot \vec{e}_x + \omega r \cos \omega t \cdot \vec{e}_y \\
 \Downarrow \quad \begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega^2 r \cos \omega t \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = -\omega^2 r \sin \omega t \end{cases} \\
 \vec{a} &= -\omega^2 r \cos \omega t \cdot \vec{e}_x - \omega^2 r \sin \omega t \cdot \vec{e}_y \\
 &= -\omega^2 (r \cos \omega t \cdot \vec{e}_x + r \sin \omega t \cdot \vec{e}_y) \\
 &\Downarrow \\
 \vec{a} &= -\omega^2 \vec{r}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Deze laatste gelijkheid is zeer belangrijk. We vinden dat de versnelling steeds naar het middelpunt van de cirkel is geïënteerd ...! We noemen het bijgevolg een centripetale¹⁶ of middelpuntzoekende versnelling.



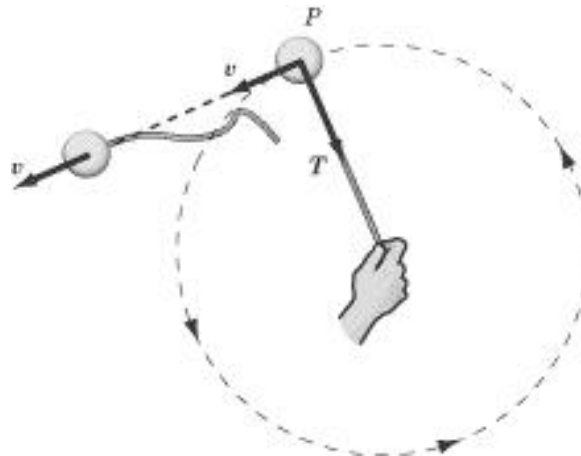
Je zou dit resultaat opmerkelijk kunnen noemen aangezien de snelheid een constante grootte heeft. Maar tegelijk ook niet omdat we hier te maken hebben met een richtingsveranderende versnelling, de normale versnelling uit het hoofdstuk basisbegrippen.

$$\begin{aligned}
 v = \|\vec{v}\| &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\
 &= \sqrt{(-\omega r \sin \omega t)^2 + (\omega r \cos \omega t)^2} \\
 &= \sqrt{r^2 \omega^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t)} \\
 &\Downarrow \\
 v &= r\omega
 \end{aligned} \tag{4}$$

¹⁶Dit is niet hetzelfde als centrifugaal.

4.3 De eenparig cirkelvormige beweging

Verandert de richting van de snelheid en aangezien versnelling de verandering van de snelheid is, moet er een versnelling zijn. Deze is naar het centrum geïoriënteerd omdat een fractie van een seconde later het object – in vergelijking met de rechte baan die het zou afleggen moest het volgens de snelheid die het op een bepaald moment heeft, voortbewegen – iets dichterbij het centrum moet zijn gekomen. De snelheidsvector is in grootte niet veranderd maar wel gedraaid, in de richting van het centrum. Moest bovendien de versnelling niet loodrecht op de snelheid staan, dan zou de versnelling een component volgens de snelheid hebben wat zou betekenen dat de snelheid in die richting zou moeten veranderen van grootte.



Toelichting figuur: Moest er geen versnelling naar het centrum zijn – bv. in het geval dat een touwtje met een ronddraaiend object aan, knapt – dan zou de snelheid niet veranderen en het object op een rechte baan in het verlengde van de snelheid met een constante snelheid voortbewegen.

Uit (2), (3) en (4) vinden we nog:

$$a = r\omega^2 = v\omega = \frac{v^2}{r} \quad (5)$$

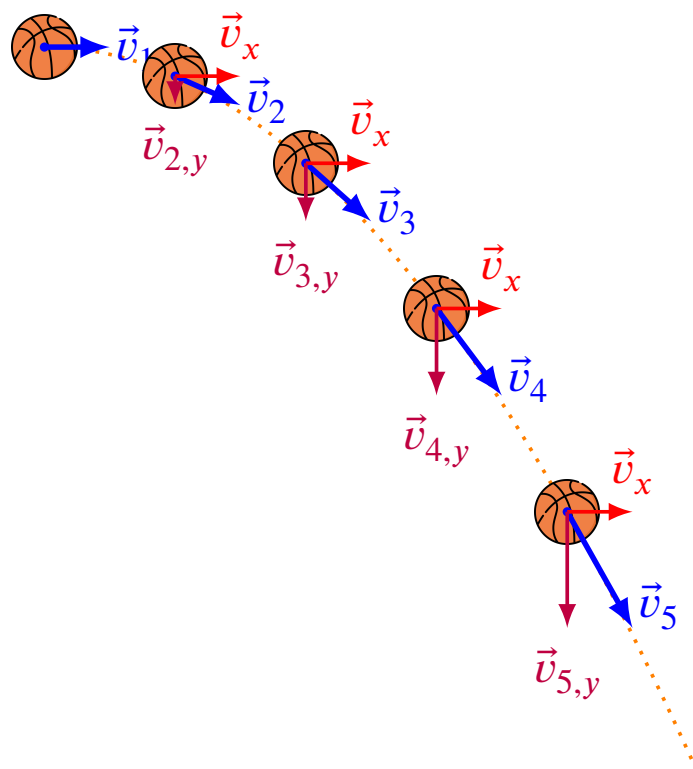
Merk op dat de snelheid een kwadratische invloed op de grootte van de versnelling heeft.

4.4 De horizontale worp

4.4 De horizontale worp

Wanneer een object horizontaal met een bepaalde beginsnelheid wordt gekatapulteerd, noemen we die beweging een horizontale worp.

Wij beschouwen de worp in het luchtledige.



Figuur 37: De snelheid in horizontale richting verandert niet, die in de verticale richting neemt lineair toe in de tijd

In de beschrijving kunnen we de x -as horizontaal en de y -as verticaal naar beneden nemen. Omdat er volgens de x -as geen versnelling is het lichaam volgens de y -as valt met de valversnelling g , kunnen we de formules voor een ERB en een EVRB op de afzonderlijke assen toepassen en zo de volledige beweging beschrijven.

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = g \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = gt \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = v_0 t \\ y = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

De baanvergelijking vinden we zoals eerder vermeld, door t in functie van x te schrijven $x = v_0 t \Leftrightarrow t = \frac{x}{v_0}$ en dit in $y(t)$ te substitueren:

$$y = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0} \right)^2 = \frac{g}{2v_0^2} x^2$$

De baan is dus (een stuk van) een parabool.

Voorbeeld 4.4.1. Een vliegtuig vliegt met een snelheid van 450 km/h op een hoogte van 920 m.

1. Hoever voor het doel moeten de voedselpakketten gelost worden om op het doel terecht te komen?

Uitwerking: De afstand waarover de voedselpakketten in horizontale richting zijn vooruit gegaan, kunnen

4.4 De horizontale worp

we vinden met de baanvergelijking. We weten namelijk hoever de pakketten naar beneden zijn gevallen en wat hun beginsnelheid is:

$$\begin{aligned}y &= \frac{g}{2v_0^2}x^2 \\ \Downarrow \\ x &= v_0\sqrt{\frac{2y}{g}} = 1712 \text{ m}\end{aligned}$$

2. Hoeveel tijd hebben de pakketten nodig om het doel te bereiken?

Uitwerking: De valtijd voor de pakketten vinden we o.a. door naar de verticale valbeweging te kijken. Deze gebeurt onafhankelijk van wat er in de horizontale richting gebeurt, zodat:

$$\begin{aligned}y &= \frac{1}{2}gt^2 \\ \Downarrow \\ t &= \sqrt{\frac{2y}{g}} = 13,7 \text{ s}\end{aligned}$$

4.5 Oefeningen tweedimensionale bewegingen

4.5 Oefeningen tweedimensionale bewegingen

Oefening 4.5.1. Welk punt heeft de grootste versnelling: een punt op de buitenrand van een rond-draaiende cd, of een punt op de helft van de straal van een cd die met een tweemaal zo grote hoeksnelheid ronddraait? Toon je antwoord aan.

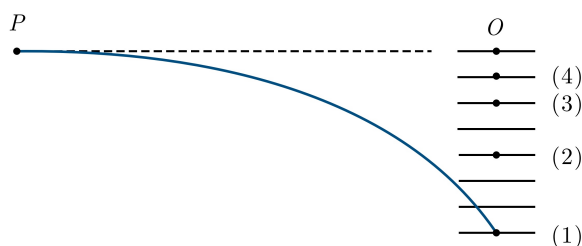
Oefening 4.5.2. Een bal wordt in een horizontale richting van de rand van een rotswand gegooid, met beginsnelheid v_0 . De hoek die de bewegingsrichting van de bal op een willekeurig moment met de horizontaal maakt, noemen we θ . Leid een formule af die voor de periode dat de bal onderweg is de hoek θ als functie van t geeft.

Oefening 4.5.3. Een tennisspeler, die 9,0 m voor het net staat, slaat een bal in horizontale richting met een snelheid van 25 m s^{-1} . Het racket raakt de bal 1,8 m boven de grond. De bovenkant van het net is 1,0 m boven de grond. Vliegt de bal over het net, of er tegenaan?

Oefening 4.5.4. Een pijl, die horizontaal wordt afgeschoten in het punt P treft een verticale wand in punt (1). Verdubbelt men de vertreksnelheid van de pijl in het punt P , dan zal de pijl dezelfde wand treffen:

Meerkeuze:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| (a) in het punt (1) | (c) in het punt (3) |
| (b) in het punt (2) | (d) in het punt (4) |



Oefening 4.5.5. Een puntmassa beschrijft een cirkel met een straal van 5,0 cm en een periode van 0,33 s. Welke afstand op de cirkel legt deze puntmassa in 7,0 s af?

Oefening 4.5.6. Bereken de hoeksnelheid van de aarde om haar as. Bereken de snelheid van een punt van het aardoppervlak:

- (a) aan de evenaar,
(b) op 51° noorderbreedte.

Oefening 4.5.7. Een auto rijdt door een bocht met een constante snelheid van 50 km h^{-1} . Heeft de auto een andere versnelling wanneer hij diezelfde bocht neemt met een constante snelheid van 70 km h^{-1} ? Licht je antwoord toe.

Oefening 4.5.8. Als een auto met 60 km h^{-1} een scherpe bocht neemt, en daarna met dezelfde snelheid een flauwe bocht, is de versnelling dan in beide gevallen gelijk? Leg uit.

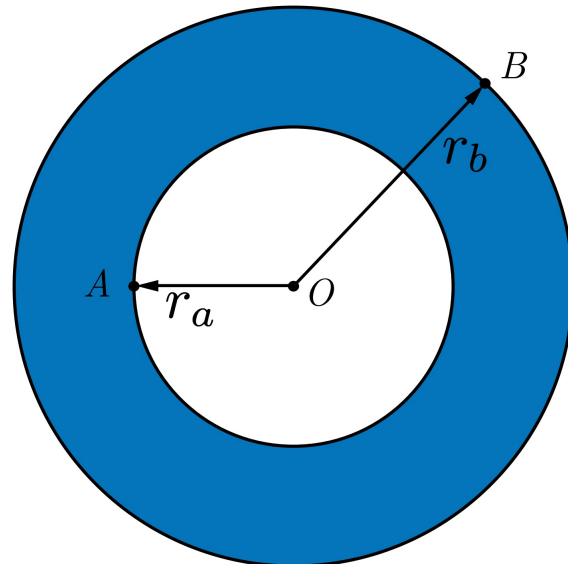
Oefening 4.5.9. Tijdens het trainen van een ruimtevaarder wordt deze in een cirkelvormige beweging gebracht met een zetel, die zich aan het uiteinde van een horizontale arm van 5,00 m lengte bevindt. Indien hij versnellingen tot $10g$ kan verdragen, wat is dan de toegelaten maximale snelheid, en het maximale toegelaten toerental?

4.5 Oefeningen tweedimensionale bewegingen

Oefening 4.5.10. Alle punten van een ring voeren een eenparige cirkelbeweging uit. De grootte van de snelheid in punt A is v_a en in punt B , v_b . Dan is

Meerkeuze:

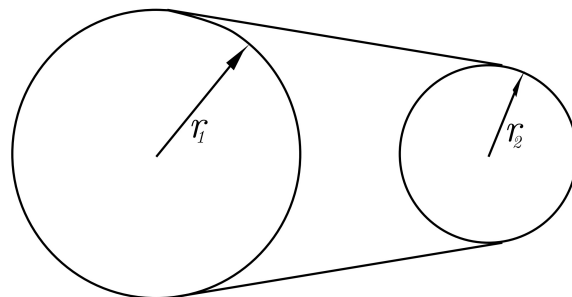
- (a) $v_a r_a = v_b r_b$ (c) $v_a v_b = r_a r_b$
 (b) $v_b r_a = v_a r_b$ (d) $v_a = v_b$



Oefening 4.5.11. Bij een fiets zijn het grootste en het kleinste kamwiel door middel van een ketting met elkaar verbonden. Tussen de hoeksnelheid ω_1 van het grootste kamwiel en ω_2 van het kleinste kamwiel bestaat de volgende relatie:

Meerkeuze:

- (a) $\omega_1 = \omega_2$ (c) $r_1 \omega_1 = r_2 \omega_2$
 (b) $r_1 \omega_2 = r_2 \omega_1$ (d) $r_1 r_2 = \omega_1 \omega_2$



Oefening 4.5.12. Een auto rijdt door een brugleuning en komt 5,2 m lager in het water terecht. De horizontale afstand tussen de plaats waar hij door de leuning ging en waar hij in het water terechtkwam, is 22 m. Kan de politie hieruit afleiden met welke snelheid hij ongeveer reed? Was zijn werkelijke snelheid groter of kleiner?

Oefening 4.5.13. Een kogel wordt met een snelheid van 800 m s^{-1} horizontaal afgeschoten op een doel dat zich op een horizontale afstand van 100 m bevindt. Over welke afstand is de kogel afgezaakt?

Oefening 4.5.14. Een vliegwiel doet 450 omwentelingen per minuut. Zoek de hoeksnelheid van het wiel en de snelheid van een punt op 1,70 m van het middelpunt.

Oefening 4.5.15. In een bocht met straal 160 m verlaagt een autorenner zijn snelheid eenparig van 90 m s^{-1} tot 75 m s^{-1} in 2 s. Bereken de grootte van de versnelling van de wagen op het ogenblik dat de snelheid 80 m s^{-1} .

4.5 Oefeningen tweedimensionale bewegingen

Meerkeuze:

(a) $40,7 \text{ m s}^{-2}$

(c) 15 m s^{-2}

(b) 40 m s^{-2}

(d) $7,5 \text{ m s}^{-2}$

Oefening 4.5.16. In de figuur is de versnelling en de snelheid van een puntmassa gegeven op een bepaald tijdstip. De grootte van de versnelling is $15,0 \text{ m s}^{-2}$ en de vector maakt een hoek van 30° met de straal van de cirkel. De straal van de cirkel is $2,50 \text{ m}$. Bepaal de grootte van de normaalversnelling, de grootte van de tangentiële versnelling en de grootte van de baansnelheid.

5.1 Inleiding

5.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken hebben we in de kinematica enkel bewegingen beschreven, door o.a. de fysische grootheden positie, snelheid en versnelling te gebruiken. Nu willen we die bewegingen ook kunnen verklaren; waardoor bewegen voorwerpen en hoe doen ze dat, gegeven de oorzaken? In de dynamica wordt het concept kracht als oorzaak van beweging gegeven en geeft de tweede wet van Newton het verband tussen de kracht de beweging.

De drie beginselen van Newton vormen, samen met enkele krachten, de fundamenteen waarop de klassieke mechanica is gebouwd.

We focussen hier op de dynamische uitwerking van een kracht, de statische laten we voornamelijk achterwege. Dat doen we door de lichamen te beschouwen als puntmassa's.

VOORBEELD VOOR VINCENT IN dynamica INTRO

5.2 De eerste wet van Newton

5.2 De eerste wet van Newton

Om een boek met een constante snelheid over de tafel te duwen, is een zekere kracht nodig. Met een smeermiddel tussen boek en tafel is al minder kracht nodig. In de praktijk geen wrijving realiseren is niet mogelijk maar duidelijk is dat hoe minder wrijving hoe minder kracht nodig is om het boek met een constante snelheid te laten bewegen. Eenmaal in beweging gebracht, nadert de benodigde kracht tot nul, en dat terwijl het boek met constante snelheid blijft bewegen.

Door aan te nemen dat er geen kracht nodig is om in beweging te blijven, valt deze opeenvolging van waarnemingen te verklaren.

Deze aanname zit vervat in de eerste wet van Newton.

Definitie 5.2.1. De eerste wet van Newton

Een voorwerp behoudt zijn toestand van rust of van eenparige rechte beweging, tenzij er een resulterende kracht op werkt.

Opmerking 5.2.1. De eerste wet van Newton wordt ook wel de traagheidswet genoemd. De eigenschap dat een lichaam zijn rust of constante snelheid op een rechte lijn behoudt, wordt inertie of traagheid genoemd. Vandaar de alternatieve naam voor de wet.

Om even over na te denken ...

Als je tegen een van 300 km/h in de Thalys richting Parijs zit, voel je de zetel dan harder tegen jou duwen dan dat ze dat doet wanneer je nog stilstaat in Brussel-Zuid?

Om even over na te denken ...

- (a) Hoe kunnen de broers Staf en Mathias Coppens in het filmpje gemaakt voor het programma Het Lichaam van Coppens blijven bewegen door de lucht terwijl de zetel toch niet meer duwt?
- (b) Waarom wrijven de broers bruine zeep op de plank?

YouTube link: <https://www.youtube.com/watch?v=1-X8sG1JV6Q>



Oefening 5.2.1. Wanneer je met de fiets fietst, rechtdoor en met een constante snelheid, dan is de kracht die je voorwaarts uitoefent

groter dan	kleiner dan	gelijk aan
------------	-------------	------------

 de weerstandskracht die achterwaarts is gericht?

Met andere woorden: de resulterende kracht op jouw fiets is dan

naar voren gericht	nul	naar achteren gericht
--------------------	-----	-----------------------

.

Oefening 5.2.2. Als je plots remt met je fiets kan je over je stuur vliegen. Hoe komt dat?

5.3 De tweede wet van Newton

5.3 De tweede wet van Newton

De eerste wet vertelt ons niet volledig wat er gebeurt wanneer op een lichaam een kracht werkt. Ze vertelt ons niet wat de relatie tussen kracht en beweging is. Dat doet de tweede wet.

Een bal waar je harder tegen schopt, krijgt een grotere snelheid mee en een pingpongballetje vliegt gemakkelijker weg dan een basketbal wanneer je er een tik tegen geeft. Als je het nader onderzoekt, door bijvoorbeeld verschillende krachten op een wagentje met eventueel steeds andere massa's te laten inwerken en de bijbehorende versnellingen te meten, merk je dat de versnelling recht evenredig is met de resulterende kracht en dat massa en versnelling omgekeerd evenredig zijn. M.a.w. $a \sim F/m$. Als bovendien een kracht zijdelings inwerkt op een bewegend voorwerp, dan merk je dat de baan afbuigt, in de richting van de kracht.

De eenheid van de grootte kracht is de newton (symbool N). Eén newton wordt gedefinieerd als de grootte van de kracht die een massa van één kilogram een versnelling van één meter per seconde kwadraat geeft.

Bovenstaande observaties, samen met de definitie van de eenheid van kracht, zitten vervat in de tweede wet van Newton, die een kwantitatieve relatie tussen kracht en versnelling poneert.

Definitie 5.3.1. De tweede wet van Newton

De versnelling van een voorwerp is recht evenredig met de erop inwerkende resulterende kracht en omgekeerd evenredig met de massa van het voorwerp. In symbolen:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Opmerking 5.3.1. De wet spreekt over de *resulterende* kracht. Het is de resulterende kracht die gelijk is aan $m\vec{a}$, niet zomaar een van de inwerkende krachten.

Opmerking 5.3.2. Het gaat over de resulterende kracht die *op* het voorwerp met massa m wordt uitgeoefend en over de versnelling a *van* het voorwerp. De krachten worden door andere voorwerpen op het voorwerp uitgeoefend. Het is niet dat het voorwerp een kracht 'bezit' of een kracht op zichzelf kan uitoefenen.

Opmerking 5.3.3. De formulevorm is een vectorvergelijking. Zoals de kracht is, is ook de versnelling. Omdat de formule een vectorvergelijking is, is de gegeven formule equivalent met de componentsvergelijkingen:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} F_x = ma_x \\ F_y = ma_y \end{cases}$$

De componentsvergelijkingen zijn in de praktijk handiger, er valt algebraïsch mee te rekenen.

De tweede bewegingswet geeft een verband tussen de oorzaak van een beweging (de resulterende kracht) en de versnelling van de beweging.

De formulevorm van de tweede wet ziet er misschien gemakkelijk uit maar is in al haar eenvoud *immens* krachtig. De wetmatigheid verklaart alle mechanische bewegingen; als we de krachten kennen, kennen we de versnelling van het voorwerp en kunnen we (althans op zijn minst in theorie) de baan van het voorwerp bepalen.

In feite zit de eerste wet vervat in de tweede. Toch blijven we hem gebruiken, vooral om het concept traagheid te benadrukken.

5.3 De tweede wet van Newton

Om even over na te denken ...

Waar en hoe in het filmpje van Wile E. Coyote en de Road Runner wordt de tweede wet van Newton met de voeten getreden?

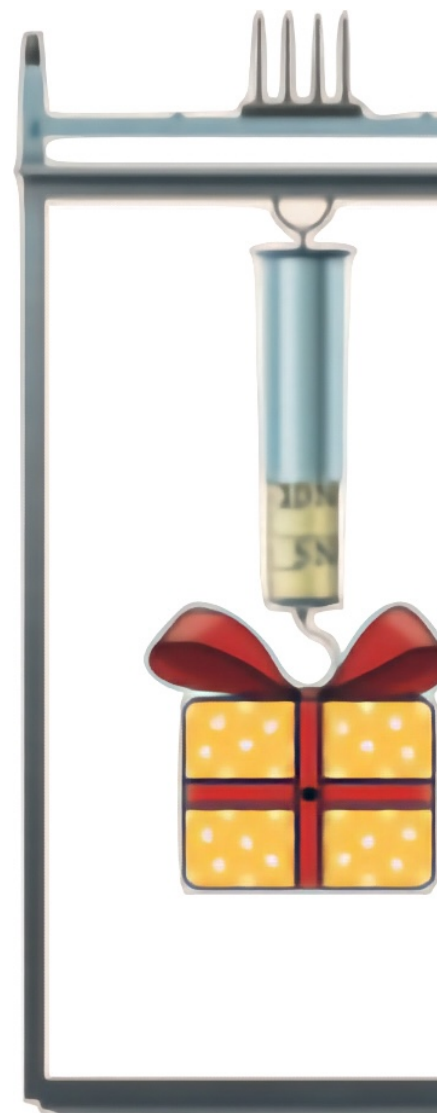
YouTube link: <https://www.youtube.com/watch?v=hvjAr6cHUVm>



Oefening 5.3.1. Een massa van 2,0 kg bevindt zich in een lift aan een dynamometer. Die laatste duidt een kracht van 10 N aan. Welke beweging voert de lift uit?

Meerkeuze:

- | | |
|---|---|
| (a) De lift beweegt naar omlaag met een versnelling van $5,0 \text{ m/s}^2$. | (c) De lift beweegt naar omlaag met een constante snelheid. |
| (b) De lift beweegt naar omhoog met een versnelling van $5,0 \text{ m/s}^2$. | (d) De lift beweegt naar omhoog met een constante snelheid. |



Oefening 5.3.2. Op een luchthaven trekt een vrouw haar koffer met een constante snelheid voort. Het handvat maakt een hoek θ met de horizontale. De massa van de koffer is 10,5 kg. De vrouw trekt volgens de richting van het handvat met een kracht van 25,0 N terwijl de grootte van de wrijvingskracht op de valies 11,0 N bedraagt.

5.3 De tweede wet van Newton

- (a) Teken het krachtdiagram van de koffer.
- (b) Bepaal de hoek θ tussen het handvat en de horizontale.
- (c) Bepaal de normaalkracht die de grond op de koffer uitoefent.



Oefening 5.3.3. In de laadruimte van een vrachtwagen hangt een slinger aan het plafond vast. Doordat de vrachtwagen met een constante versnelling optrekt, maakt het touw van de slinger een hoek van 37° met de verticale.

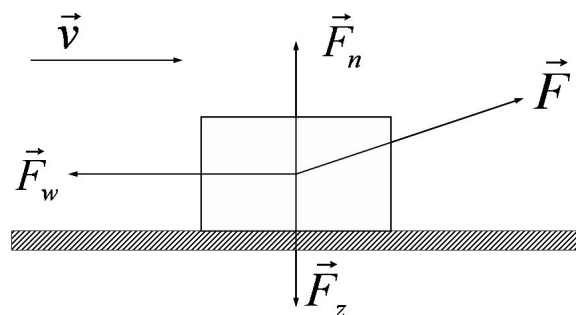


Bepaal de grootte van de versnelling van de vrachtwagen.

Oefening 5.3.4. Onder invloed van een kracht $\vec{F}$ beweegt een blok met constante snelheid over een ruw horizontaal oppervlak. De krachten op de figuur hebben de juiste oriëntatie maar niet noodzakelijk de juiste grootte. Welke van de volgende relaties tussen $\vec{F}$, $\vec{F}_w$, $\vec{F}_z$ en $\vec{F}_n$ moet in ieder geval waar zijn?

Meerkeuze:

- (a) $F_w = F$ en $F_n = F_z$ (c) $F_w = F$ en $F_n > F_z$
- (b) $F_w < F$ en $F_n < F_z$ (d) $F_w < F$ en $F_n = F_z$



5.4 De derde wet van Newton

5.4 De derde wet van Newton

Krachten komen niet uit het niets, ze worden altijd door een ander voorwerp uitgeoefend. Zo is het de hamer die de spijker in de muur drijft en is het de voet die een trap tegen de bal geeft. In deze voorbeelden oefent het ene voorwerp een kracht uit en ondergaat het andere voorwerp die kracht. Maar, is het zo eenzijdig ...? Het volgende voorbeeld geeft aan van niet. Het geeft aan dat er naast een 'actie'kracht ook altijd een 'reactie'kracht optreedt.

Meestal plooi je vingers naar de handpalm toe. De praktijk leert dat het andersom toch iets moeilijker gaat, misschien vandaar. Als de andere hand echter wat helpt door te duwen (dus een kracht uitoefent op de vingers), plooi je de vingers al iets verder naar achter; uit zichzelf geraken ze niet zo ver. Als je nu – ter vergelijking – met gestrekte vingers tegen de tafel duwt, plooi je vingers eveneens meer naar achteren dan dat ze uit zichzelf zouden kunnen. Omdat de vingers zonder een extern uitgeoefende kracht niet zo ver kunnen doorbuigen, valt te concluderen dat naast de kracht die door de vingers op de tafel wordt uitgeoefend, de tafel op zijn beurt een kracht uitoefent op de vingers.

De derde bewegingswet van Newton – ook wel de wet van actie en reactie genoemd – geeft de relatie tussen de krachten die lichamen onderling op elkaar uitoefenen.

Definitie 5.4.1 (De wet van actie en reactie).

Wanneer lichaam A op lichaam B een kracht uitoefent, oefent lichaam B op lichaam A een even grote maar tegengestelde kracht uit. In symbolen:

$$\vec{F}_{a,b} = -\vec{F}_{b,a}$$

Opmerking 5.4.1. ► De actie- en reactiekracht zijn altijd even groot.

Het even groot zijn van die krachten is misschien opmerkelijk. Het is toch de appel die naar de aarde valt en niet andersom?! Of, als de kracht die de aarde op de appel uitoefent even groot is als die de appel op de aarde uitoefent, waarom gaan ze dan niet naar mekaar toe? Het antwoord is dat de *uitwerking* van een kracht niet hetzelfde is als de kracht zelf. De massa van de aarde is gigantisch veel groter dan die van de appel zodat die, volgens de tweede wet van Newton, een veel kleinere versnelling krijgt. En het is de versnelling die we zien, niet de kracht.

Opmerking 5.4.2. ► Van het krachtenpaar grijpen de krachten op verschillende lichamen aan.

Er is altijd een voorwerp *waardoor* de kracht wordt uitgeoefend en een voorwerp *waarop* de kracht wordt uitgeoefend.

Om even over na te denken ...

De ezel van boer Teun, Donkey, wil de kar met waar voor de markt niet trekken. Hij maakt namelijk de volgende redenering: 'Voor elke poging die ik doe om de wagen vooruit te trekken, oefent de kar een even grote maar achterwaartse kracht uit. De nettokracht zal dan ook onvermijdelijk altijd nul zijn, zodat ik niet in beweging zal geraken. Ik doe geen moeite.'

Waar loopt de redenering van de ezel mis?

Opmerking 5.4.3. ► Actie- en reactiekracht zijn niet eenduidig.

Omdat de twee krachten van het krachtenpaar tegelijk optreden, is het in feite niet mogelijk aan te geven wie nu de actiekracht en wie de reactiekracht is.

Met deze derde wet kunnen we verschillende verschijnselen verklaren. Hier volgen enkele voorbeelden.

Voorbeeld 5.4.1 (Hoe kunnen we eigenlijk lopen?).

Zo is de wet van actie en reactie van toepassing op wandelen. Wij kunnen vanuit rust in beweging komen door ons af te zetten. Wij oefenen een kracht op de grond uit waarbij deze laatste op zijn beurt een even grote en tegengestelde kracht op ons uitoefent. Zo krijgen wij een versnelling.

5.4 De derde wet van Newton

Voorbeeld 5.4.2 (Hoe stuwt een raket zich voort?).

Een vliegtuig met straalmotoren of een raket doen hetzelfde. Door het uitoefenen van een kracht op de naar achter uitgeworpen gassen, oefenen de uitgeworpen gassen een kracht uit op het vliegtuig of de raket. Maar dan voorwaarts. (Een vliegtuig of raket duwt zich dus niet af tegen de (eventuele) lucht.)

Oefening 5.4.1. Een grote magneet oefent op een ijzeren spijkertje een kracht uit. Welke van de volgende uitspraken is dan juist?

Meerkeuze:

- | | |
|--|--|
| (a) Het spijkertje zelf oefent op de magneet geen kracht uit. | (c) De kracht die het spijkertje op de magneet uitoefent is even groot als deze door de magneet op het spijkertje uitgeoefend. |
| (b) De kracht die het spijkertje op de magneet uitoefent is veel kleiner dan deze door de magneet op het spijkertje uitgeoefend. | (d) Over de grootte van de kracht die het spijkertje op de magneet uitoefent, kan niets met zekerheid gezegd worden. |

Oefening 5.4.2. Je springt vanuit een roeibootje naar de oever. Verklaar wat er kan gebeuren als het roeibootje niet of wel vastgemeerd is. Wanneer je nu vanaf een groot binnenschip naar de oever springt, wat zou het resultaat dan zijn? Verklaar!

Oefening 5.4.3. Twee ploegen zijn aan het touwtrekken. Volgens het derde beginsel van Newton oefenen de twee ploegen steeds even grote maar tegengestelde krachten op elkaar uit. Hoe is het dan mogelijk dat er toch een winnende ploeg is?

Oefening 5.4.4. Een eekhoortje glijdt over een gladde tafel met een heleboel nootjes tussen zijn voorpoten. Wat zou het moeten doen om te verhinderen dat het van de tafel valt? Leg uit.

5.5 Oefeningen Wetten van Newton

5.5 Oefeningen Wetten van Newton

5.5.A Denkvragen**5.5.A Denkvragen**

Oefening 5.5.1. Kan een voorwerp bewegen zonder dat er een kracht op werkt?

Oefening 5.5.2. Waarom is een met boomstammen geladen vrachtwagen voor de bestuurder zo gevaarlijk, als hij bruusk moet remmen, of bij een botsing betrokken raakt?

Oefening 5.5.3. Hoe komt het dat een vrachtwagen binnen een veel kortere afstand kan stoppen dan een trein die dezelfde snelheid heeft?

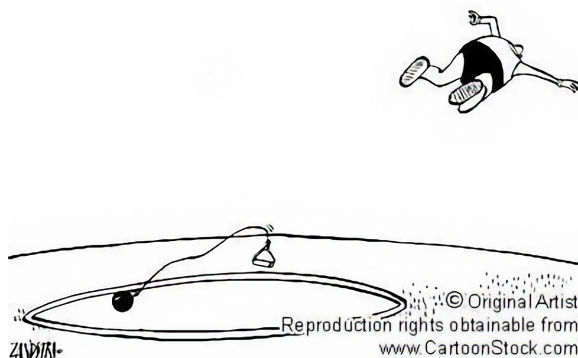
Oefening 5.5.4. Wat word je gewaar als je met een wapen een kogel afvuurt? Waarom druk je best de kolf stevig tegen de schouder aan?

Oefening 5.5.5. Hoe komt het dat je gemakkelijk vaststelt dat de aarde een kracht uitoefent op een appel, maar dat je niets merkt van de kracht door de appel op de aarde uitgeoefend?

Oefening 5.5.6. Wat gebeurt er met een roeiboot als men snel van de voor- naar de achterkant loopt?

Oefening 5.5.7. Op een bierglas ligt een plastic plaat met daarop een appel. Als Els de plaat snel wegtrekt valt de appel in het glas. Bij Lien die de plaat langzaam wegtrekt, niet. Verklaar het verschil tussen beide verschijnselen.

Oefening 5.5.8. Wat klopt er fysisch niet aan wat er gebeurt in de cartoon?



Oefening 5.5.9. Waarom valt in het luchtledige een massa van 2 kg niet twee keer zo snel als een massa van 1 kg?

5.5.B Vraagstukken

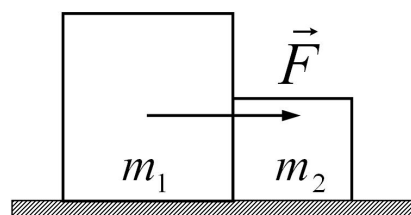
5.5.B Vraagstukken

Oefening 5.5.10. Hoe groot is de snelheid die een slee met een massa van 5,0 kg krijgt, als er gedurende 6,0 s een kracht van 0,20 N horizontaal op inwerkt?

Oefening 5.5.11. Twee blokken met respectievelijke massa's m_1 en m_2 rusten op een horizontaal vlak. De wrijving tussen de blokken en het horizontale vlak mag verwaarloosd worden. Op één van de blokken wordt een horizontale kracht $\vec{F}$ uitgeoefend zoals op de figuur is weergegeven. De kracht die blok 1 op blok 2 uitoefent is dan:

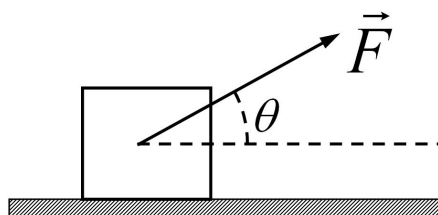
Meerkeuze:

- (a) $\frac{m_1}{m_2} \vec{F}$ (c) $\frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{F}$
 (b) $\frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{F}$ (d) $\vec{F}$

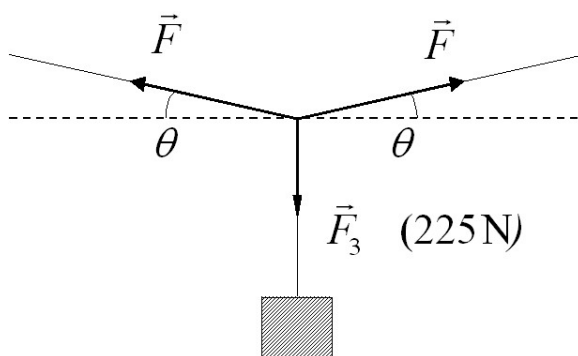


Oefening 5.5.12. Een doos van 10 kg wordt met een kracht van 40 N over een glad tafeloppervlak getrokken. De uitgeoefende kracht maakt een hoek van 30° met de horizontaal. Als de wrijving mag worden verwaarloosd, bepaal dan

- (a) de versnelling van de doos,
 (b) de grootte van de normaalkracht, die de tafel op de doos uitoefent.

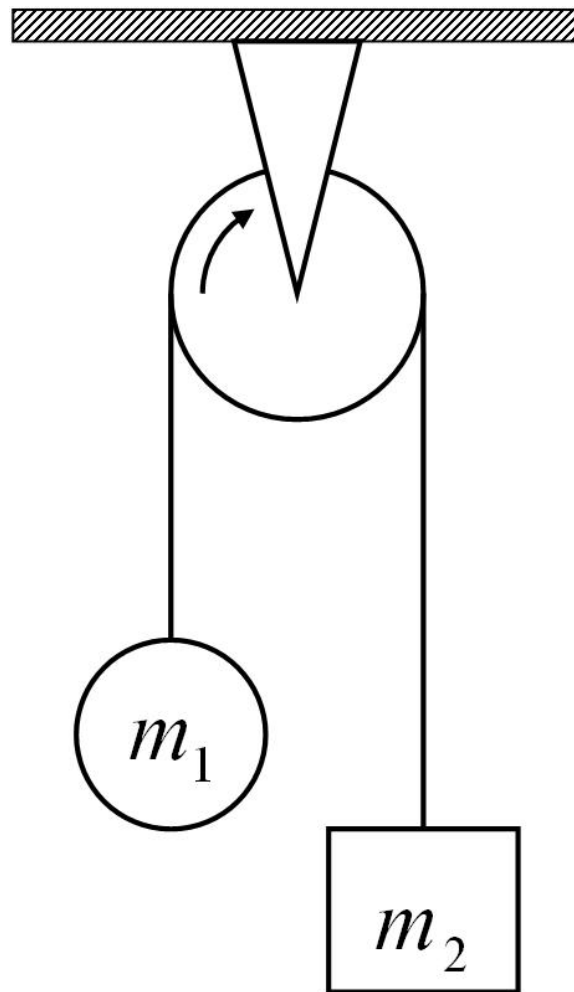


Oefening 5.5.13. Een gewicht van 225 N is bevestigd in het midden van een sterk touw. Door aan beide kanten een even grote kracht uit te oefenen wordt het gewicht opgetild. Bepaal de grootte van die krachten opdat het gewicht zoals in de figuur met $\theta = 10^\circ$ komt te hangen.



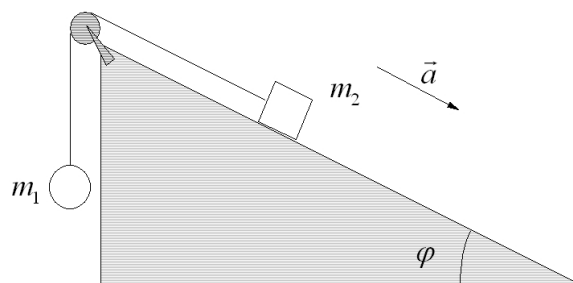
Oefening 5.5.14. (Toestel van Atwood) Twee verschillende massa's zijn via een katrol van te verwaarlozen massa met elkaar verbonden zoals in de figuur. De wrijving is eveneens te verwaarlozen.

5.5.B Vraagstukken



Bepaal de grootte van de versnelling van beide massa's en de spankracht in het touw.

Oefening 5.5.15. Twee massa's m_1 en m_2 zijn via een touwtje en een katrol van te verwaarlozen massa met elkaar verbonden zoals in de figuur. Er is geen wrijving aanwezig. De massa's hebben een versnelling zoals aangegeven.



Bepaal de grootte van de versnelling van beide massa's en de grootte van de spankracht in het touw.

5.5.B Vraagstukken

Oefening 5.5.16. Hoe kan een man die 686 N weegt langs een touw naar beneden glijden, dat slechts 600 N kan dragen zonder te breken?

Stel dat de man inschat dat hij, zonder zijn botten te breken, in staat is te springen van toch wel 3,0 m hoog. Van hoe hoog zou hij dan met een dergelijk touw kunnen ontsnappen?

Oefening 5.5.17. Een jager (massa 70 kg) heeft een ijsbeer (massa 350 kg) geschoten met een harpoen en wil die nu naar zich toe trekken met het touw. Jager en ijsbeer zijn oorspronkelijk allebei in rust op het ijsoppervlak en op 30 m van elkaar. Verwaarloos de wrijving met het ijs. Bepaal de afstand waarover de ijsbeer is verschoven als de jager de ijsbeer binnenhaalt.

6.1 Inleiding

6.1 Inleiding

6.2 Algemeen (heuristiek)

6.2 Algemeen (heuristiek)

6.3 Verschillende soorten krachten

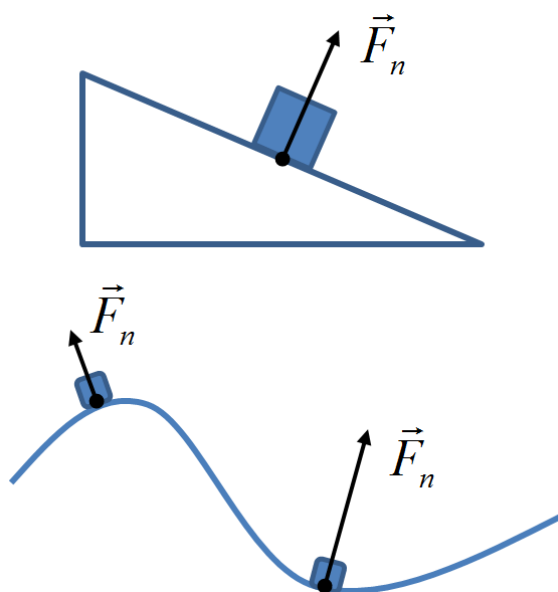
6.3 Verschillende soorten krachten

Herhaling en uitbreiding soorten krachten

Een kracht is een interactie tussen twee voorwerpen. Wanneer een eerste voorwerp A een kracht uitoefent op een ander voorwerp B, dan is een bepaalde uitwerking het mogelijk gevolg. Deze uitwerking kan **statisch (elastisch en/of plastisch)** zijn (vervorming), maar ook **dynamisch** (verandering van bewegingstoestand, in één woord: versnelling).

De meeste krachten zijn **contactkrachten**, dan is er rechtstreeks contact tussen de twee voorwerpen. Bij **veldkrachten** is geen rechtstreeks contact nodig en is er sprake van een krachtveld. De veldkrachten zijn: gravitatiekracht (of zwaartekracht) tussen massa's, elektromagnetische kracht tussen ladingen (Coulomb- en Lorentzkracht), sterke kernkrachten tussen quarks en de zwakke wisselwerking die in theorie mogelijk is tussen alle fundamentele deeltjes. Alle andere krachten zijn bijgevolg contactkrachten.

De grootte kracht is een vector, ze heeft een richting, zin en grootte. De grootte van de kracht heeft als eenheid de Newton N. Bij een contactkracht grijpt de kracht aan op de plaats(en) waar er contact is. Bij een veldkracht grijpen er in feite vele kleine veldkrachten aan op de betrokken deeltjes van gans het voorwerp. Voor de eenvoud vatten we die samen tot één kracht. Tenslotte laten we voor het gebruiksgemak meestal **alle krachten op een voorwerp aangrijpen in het zwaartepunt van het voorwerp**.



Hoek kan je achterhalen welke krachten op een voorwerp aangrijpen? Stel jezelf de vraag: "Wat duwt of trekt eraan?" Bepaal de contactkrachten door na te gaan met welke voorwerpen er contact is en overloop dan de eventuele veldkrachten.

De normaalkracht (contactkracht)

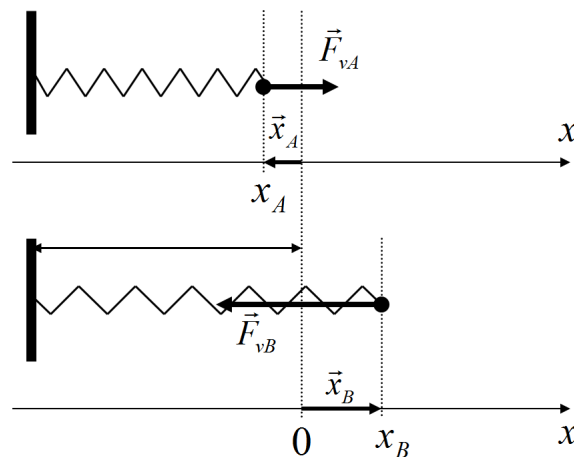
De normaalkracht is een kracht van een (meestal vlakke, maar soms ook gebogen) ondergrond op een voorwerp, meestal met de bedoeling het voorwerp te ondersteunen. De normaalkracht $\vec{F}_n$ staat altijd loodrecht op het grondvlak (net zoals de normale versnelling loodrecht staat op de snelheidsvector; "normaal" betekent in deze context nu eenmaal "loodrecht"). Er is geen formule om de grootte van de normaalkracht uit te rekenen. De grootte ervan dient altijd bepaald te worden uit de toepassing van en het redeneren

6.3 Verschillende soorten krachten

met de wetten van Newton. In sommige eenvoudige situaties kan het zijn dat $F_n = F_z$, **maar dit is zeker niet altijd het geval! Enkel met behulp van de wetten van Newton is er uitsluit!**

De veerkracht (contactkracht)

De veerkracht is een kracht die een uitgerekte of ingedrukte veer uitoefent op een voorwerp die met één van de uiteindes verbonden is. Wanneer de veer onbelast is (m.a.w. niet uitgerekt of ingedrukt, maar gewoon ontspannen) dan heeft ze een rustlengte r . Bij belasting is de lengte verschillend van rustlengte r en is er een uitrekking/indrukking, hetgeen met $\Delta = -r$ wordt weergegeven. Bij zuiver elastische vervormingen (dit zijn niet al te grote vervormingen zodat bij ontspanning de veer uit zichzelf terug tot aan de rustlengte ontspant) geldt de wet van Hooke als formule voor de grootte van de veerkracht: $F_v = k \cdot |\Delta|$. Hierin is k de veerconstante uitgedrukt in $\frac{N}{m}$. De waarde ervan is specifiek voor elke veer en is ook constant indien de veer enkel elastisch vervormt. Ze drukt uit hoeveel Newton kracht de veer zet per meter dat de veer is verlengd/verkort t.o.v. de rustlengte. Ze zegt dus iets over de soepelheid of stijfheid van een veer.

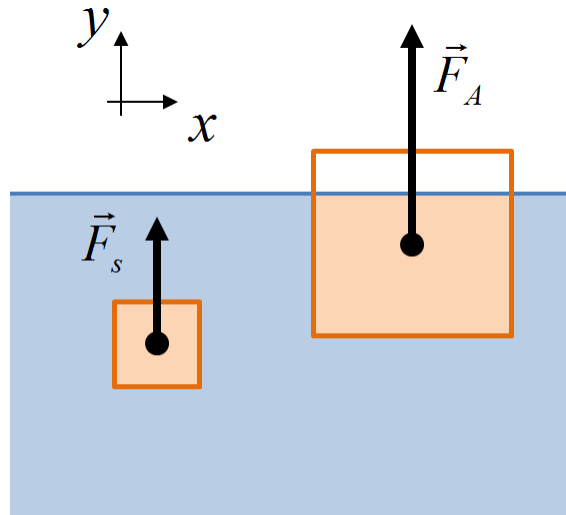


Het gebeurt dat voor het symbool Δ het symbool x gebruikt wordt. Dit is korter en dus eenvoudiger omdat de lengte van de veer ons meestal niet interesseert, enkel het verschil met de rustlengte. Dit zal in het vervolg van de cursus ook zo zijn. Meer nog, men kan voor de veerkracht ook een vectoriële formule opstellen indien men de uitrekking/indrukking van de veer als een uitwijkingsvector $\vec{x}$ ziet die aangrijpt op de plaats van de rustlengte. Bijgevoegde figuren tonen dit voor een ingedrukte en uitgerekte veer. Er valt op dat de veerkracht telkens de tegengestelde zin heeft van de uitwijkingsvector, waardoor de vectoriële formule wordt: $\vec{F}_v = -k \cdot \vec{x}$. Descalare getalcomponent (waarin met behulp van een gekozen x -as rekening wordt gehouden met de zin van de kracht) wordt dan: $F_v = -k \cdot x$.

r

6.3 Verschillende soorten krachten

De opwaartse stuwkracht in een vloeistof of Archimedeskracht



Eenvoorwerp dat volledig of gedeeltelijk ondergedompeld is in een vloeistof ondervindt vanwege de vloeistof een opwaartse stuwkracht verticaal omhoog. Deze kracht (van vloeistof op voorwerp) noemt men ook de Archimedeskracht. De verklaring ligt in het feit dat de hydrostatische druk onder het voorwerp groter is dan de druk boven het voorwerp. In feite is de Archimedeskracht dus de nettokracht van alle drukkrachten die de vloeistof op het voorwerp zet. Er kan proefondervindelijk en theoretisch aangetoond worden dat de grootte van deze kracht gelijk is aan die van de zwaartekracht op de verplaatste vloeistof (= wet van Archimedes). Dit komt neer op:

$$F_s = F_A = m_{vl} \cdot g = \rho_{vl} \cdot V_{verplaatst} \cdot g$$

Omdat de verplaatste vloeistof gelijk is aan het volume van het stuk voorwerp dat zich onder het vloeistofoppervlak bevindt, kan eveneens gezegd worden dat:

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_A = \rho_{vl} \cdot \mathbf{V}_{ond} \cdot \mathbf{g} \quad \text{met } V_{ond} \text{ het ondergedompeld deel van het voorwerp.}$$

Om de grootte, richting en zin van de versnelling van een ondergedompeld voorwerp te bepalen, dient men de wetten van Newton toe te passen. Hierin onderscheidt men een aantal gevallen:

- Zinken: $\vec{a}_y$ is naar beneden gericht (en $\vec{F}_{ry}$ ook, de neerwaartse krachten zijn samen sterker dan de opwaartse)
- Stijgen: $\vec{a}_y$ is naar boven gericht (en $\vec{F}_{ry}$ ook, de opwaartse krachten zijn samen sterker dan de neerwaartse)
- Zweven: voorwerp volledig ondergedompeld en $a_y = 0$ (en dus is $F_{ry} = 0$)
- Drijven: voorwerp gedeeltelijk ondergedompeld en $a_y = 0$ (en dus is $F_{ry} = 0$)

Speciaal geval: Heel vaak werken op een ondergedompeld voorwerp slechts twee krachten, de Archimedeskracht (naar boven) en de zwaartekracht (naar onder) met bijbehorende formules:

$$F_A = \rho_{vl} \cdot V_{ond} \cdot g$$

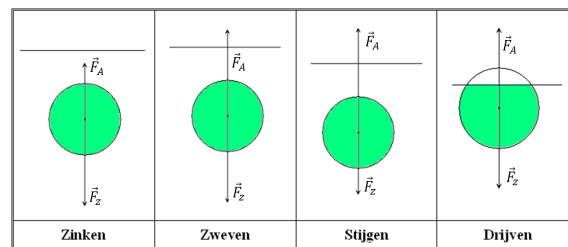
$$F_z = m_{vw} \cdot g = \rho_{vw} \cdot V_{vw} \cdot g$$

6.3 Verschillende soorten krachten

- Indien in dit geval het voorwerp volledig ondergedompeld is, is $V_{ond} = V_{vw}$ waardoor enkel de massadichtheden een verschil in grootte tussen de twee krachten kunnen opleveren, met als gevolg:

$$\rho_{vw} > \rho_{vl} \Rightarrow \text{zinken} \quad \rho_{vw} = \rho_{vl} \Rightarrow \text{zweven} \quad \rho_{vw} < \rho_{vl} \Rightarrow \text{stijgen (om nadien vermoedelijk te gaan drijven)}$$

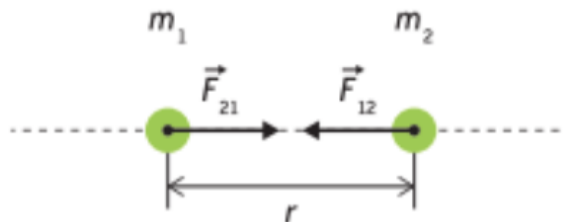
- Als het voorwerp gedeeltelijk ondergedompeld is, dan is $V_{ond} < V_{vw}$ en moet men ook met de volumes rekening houden om het gedrag te bepalen. Merk op dat in deze situatie bij drijven (= rustsituatie waarbij slechts een gedeelte van het voorwerp ondergedompeld is) moet gelden dat $F_A = F_z$.



Speciaal geval: ondergedompeld voorwerp ondervindt enkel $\vec{F}_A$ en $\vec{F}_z$. Het ondergedompeld volume is ingekleurd.

De gravitatiekracht of zwaartekracht (veldkracht)

= aantrekkingskracht tussen massa's



De **grootte** van de gravitatiekracht $\vec{F}_G$ tussen twee puntmassa's m_1 en m_2 met een afstand r tussenbeiden is gelijk is aan:

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \text{ met } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} = \text{gravitatieconstante}$$

In realistische situaties bij voorwerpen met afmetingen is r de afstand tussen de zwaartepunten van die voorwerpen. Vaak valt het zwaartepunt samen met het midden van het voorwerp (zeker bij voorwerpen met homogene massaverdeling).

In de context van hemellichamen wordt gravitatiekracht vaak zwaartekracht genoemd. Dit verschilt enkel in benaming, maar beide benamingen weerspiegelen identiek hetzelfde krachtfenomeen. In het Engels of Frans bestaat er geen woord voor "zwaartekracht", zij kennen enkel *gravity* of *gravité*.

In een gravitatieveld $\vec{g}$ is er een eenvoudigere formule: $\vec{F}_G = \vec{F}_z = m \cdot \vec{g}$

Rond een hemellichaam met massa M geldt: $g = \frac{G \cdot M}{r^2}$ Op het aardoppervlak, levert dit: $g_A = 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \approx 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$

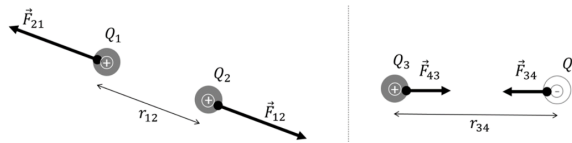
1 DE MAGNETISCHE KRACHT OF LORENTZKRACHT (VELDKRACHT)

De elektrische kracht of Coulombkracht (veldkracht)

= aantrekking- of afstotingskracht tussen elektrische ladingen

De **grootte** van de Coulombkracht $\vec{F}_C$ (of elektrische kracht $\vec{F}_e$) tussen twee puntladingen q_1 en q_2 met een afstand r tussenbeiden is gelijk is aan:

$$F_C = F_e = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \text{ met } k = 8,99 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} \approx 9,0 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$



In realistische situaties bij ladingen met afmetingen is r de afstand tussen de middelpunten van die ladingen.

In een elektrisch veld $\vec{E}$ is er een eenvoudigere formule: $\vec{F}_C = \vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$. De grootte van $\vec{E}$ kan in verschillende situaties bepaald worden naargelang het type veld. Meer details: zie leerstof 5^{de} jaar.

1 De magnetische kracht of Lorentzkracht (veldkracht)

= kracht op bewegende lading in een magnetisch veld (dat veroorzaakt wordt door andere bewegende ladingen)

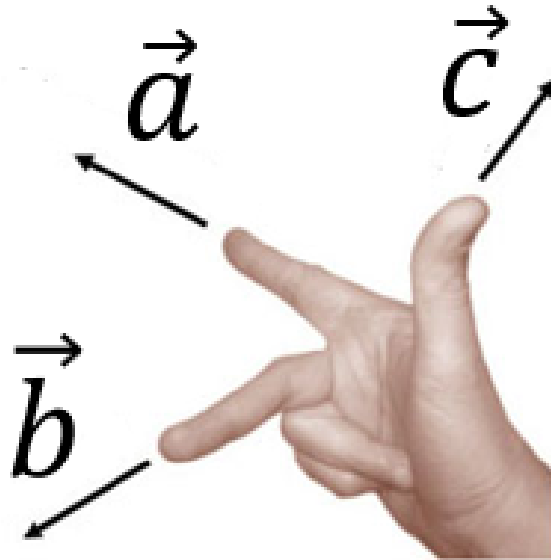
De **grootte** van de Lorentzkracht $\vec{F}_L$ (of magnetische kracht $\vec{F}_m$) op een lading q met snelheid $\vec{v}$ die een hoek α maakt met de magnetische veldsterkte $\vec{B}$ waar de lading door vliegt is te berekenen met:

$$F_L = F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin \alpha \text{ met } \alpha = \text{hoek tussen } \vec{B} \text{ en } \vec{v}$$

Als vele ladingen samen een gemeenschappelijke driftsnelheid hebben door een magneetveld hebben (vaak door een geleidende draad met lengte L) beschouwt men dit als een stroom I in een magneetveld $\vec{B}$. Dan wordt de formule:

$$F_L = F_m = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \alpha \text{ met } \alpha = \text{hoek tussen } \vec{B} \text{ en } I \text{ (ook Laplacekracht genoemd)}$$

1 DE MAGNETISCHE KRACHT OF LORENTZKRACHT (VELDKRACHT)



De richting en zin van $\vec{F}_L$ kan bepaald worden met de derde rechterhandregel waarin geredeneerd wordt met de conventionele stroomzin van de ladingen.

Uitbreiding: De Coulombkracht en de Lorentzkracht kunnen samengevat worden tot één elektromagnetische kracht, want beide gevallen gaan over kracht op een lading.

$$\vec{F}_{em} = \vec{F}_C + \vec{F}_L = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

($\times$ is het symbool voor vectorieel product, zie externe cursussen)

De sterke kernkracht en zwakke wisselwerking (veldkrachten)

De sterke kernkrachten tussen quarks zijn heel relevant voor de stabiliteit en samenhang van nucleonen in atoomkernen. Ze hebben echter geen relevantie in de stabiele macroscopische wereld. Enkel bij zeer kleine afstand tussen nucleonen (orde femtometer = 10^{-15} m) is deze kernkracht niet te verwaarlozen, binnen één atoomkern dus. De sterke kernkracht neemt met de afstand veel feller af in vergelijking met andere veldkrachten.

Bij de zwakke wisselwerking (of kernkracht) tussen fundamentele deeltjes is er een andere uitwerking dan gebruikelijk (niet statisch of dynamisch). In dit geval veranderen de deeltjes van aard. Ook dit fenomeen is in onze stabiele macroscopische wereld irrelevant omdat het net enkel gebeurt bij onstabiele deeltjes of atoomkernen.

De wrijvingskracht (contactkracht) (zie uitgebreid verhaal in boek FV p113-115)

= weerstandskracht $\vec{F}_w$ op een voorwerp van een medium of middenstof waarin of waartegen het zich bevindt

= weerstandskracht van een vlakke ondergrond op een voorwerp dat erop steunt, evenwijdig met het vlak (en vaak tegen de zin van de beweging)

Verklaring schuifwrijving: een vlakke ondergrond is nooit perfect vlak! Zie figuur.

1 DE MAGNETISCHE KRACHT OF LORENTZKRACHT (VELDKRACHT)

Voor de schuifwrijvingskracht $\vec{F}_w$ wordt vastgesteld dat...

- (a) ... indien het voorwerp in rust is: $\vec{F}_w$ heeft die grootte en zin zodat $F_r = 0$
- (b) ... indien het voorwerp een rechtlijnige beweging maakt:

De zin van $\vec{F}_w$ is tegen de zin van de beweging en de grootte van $\vec{F}_w$ is recht evenredig is met de grootte van de normaalkracht en tegelijk afhankelijk van hoe goed of slecht de materialen van het voorwerp en vlakke ondergrond over mekaar schuiven.

Er geldt dan: $F_w = \mu \cdot F_n$ met μ de schuifwrijvingsfactor of schuifwrijvingscoëfficiënt (op te zoeken in tabellen)

Bovenstaande omkaderde formule is dus de maximale waarde van de schuifwrijvingskracht, waardoor de formule beter te schrijven is als: $F_{w,max} = \mu \cdot F_n$. Men kan overigens aantonen dat deze laatste formule ook klopt bij bewegingen die niet rechtlijnig zijn (zie verder voor voorbeelden). (zie ook animatie Hans Bekaert: "wrijving")

- c) ... indien het voorwerp een ECB maakt: $\vec{F}_w$ heeft die grootte zodat $F_r = m \cdot a = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$

Bij het maken van een bocht (bijvoorbeeld ECB) is er in sommige gevallen schuifwrijvingskracht die bijdraagt tot de middelpuntzoekende kracht. Bij bijna alle vervoerswijzen over een vlakke weg doet dit zich voor (zoals met de wagen, met de fiets en zelfs te voet!). Er dient wel rekening gehouden te worden met het feit dat de schuifwrijvingskracht in grootte beperkt is tot $F_{w,max} = \mu \cdot F_n$ waardoor er een gevaar bestaat dat de beoogde bocht niet gemaakt kan worden! In dit geval spreekt men van slippen en "uit de bocht vliegen". Zie oefeningen voor concrete gevallen.

Opmerking 6.3.1. Soms wordt er een onderscheid gemaakt tussen een statische en kinetische wrijvingsfactor omdat in werkelijkheid de maximale schuifwrijvingskracht in rust een beetje groter is dan wanneer het voorwerp in beweging is. Dit maakt nevenstaande grafiek duidelijk. Niettemin zijn de verschillen meestal klein, waardoor we dit verschil voortaan zullen verwaarlozen.

Opmerking 6.3.2. Bovenvermelde formules zijn enkel van toepassing voor schuifwrijving! **Rolwrijvingskracht en fluïdumwrijvingskracht** (zoals luchtweerstand) zijn snelheidsafhankelijke weerstandskrachten waardoor er hiervoor andere formules gelden.

Trekkkracht, touwkracht, andere steunkrachten

Om een touw op de spannen moet er aan beide uiteindes een kracht gezet worden, **trekkkracht** $\vec{F}_t$ genaamd. Deze staat altijd evenwijdig met het touw en met zin weg van het touw. Zolang het touw niet knapt, is elke grootte voor $\vec{F}_t$ mogelijk, afhankelijk van de situatie. Uiteraard heeft elk touw een maximale trekkkracht alvorens het knapt (maar in onze oefeningen veronderstellen we sterke touwen die niet knappen).

Touwkracht is de kracht die een touw zet op hetgeen eraan vasthangt, de reactiekracht van de trekkkracht dus. Voor de eenvoud noemen we dit ook $\vec{F}_t$. Uit de derde wet van Newton zijn deze toch even groot.

Indien een touw zeer klein in massa is (of massaloos verondersteld wordt), dan wordt er aan beide uiteindes altijd even hard getrokken. De touwkracht is aan beide uiteindes dus ook even groot. Zie oefeningen.

Naast normaalkracht, veerkracht, Archimedeskracht, trekkkracht, touwkracht, ... zijn er nog steunkrachten. Een voorbeeld is de steunkracht van een stang die meestal onvervormbaar is. Dergelijke krachten kunnen ook hun rol spelen binnen de wetten van Newton, maar hebben geen vaste formule.

1 DE MAGNETISCHE KRACHT OF LORENTZKRACHT (VELDKRACHT)

Het gewicht (contactkracht) (zie uitgebreid verhaal in boek FV p126-128)

= kracht $\vec{G}$ die een voorwerp uitoefent op zijn steun (meestal tgv de zwaartekracht)

Let op! Het gewicht van een voorwerp grijpt niet aan op het voorwerp zelf, maar op hetgeen waar het voorwerp contact mee maakt waardoor het ondersteund wordt (bijvoorbeeld: oppervlak, veer, vloeistof, ...)! Het gewicht is vaak de reactiekracht van de steunkracht op het voorwerp ($\vec{F}_n, \vec{F}_v, \vec{F}_A, \vec{F}_t, \dots$) en is daarom volgens de derde wet van Newton in grootte gelijk aan die steunkracht.

Er is geen vaste formule voor gewicht, maar de grootte moet je bepalen met de wetten van Newton (vaak combinatie 3^{de} wet met 1^{ste} of 2^{de}). In eenvoudige situaties draait het vaak uit dat $G = F_z$, maar dit mag je niet algemeen aannemen! De wetten van Newton brengen altijd uitsluit!

6.4 Dynamica van de ECB

6.4 Dynamica van de ECB

7.1 De wetten van Kepler

7.1 De wetten van Kepler

Johannes Kepler (1571 - 1630) destilleerde uit de enorme hoeveelheid meetgegevens van planeetposities die Tycho Brahe (1546 - 1601) verzamelde, zijn drie wetten. Ze luiden: een planeet beweegt in een elliptische baan met de zon in een van de brandpunten, de voerstraal snijdt in gelijke tijdsintervallen gelijke oppervlakten (perken) uit (perkenwet) en de verhouding van het kwadraat van de periode tot de derde macht van de halve lange as van de ellipsbaan is voor alle planeten gelijk.

7.2 De universele gravitatiekracht

7.2 De universele gravitatiekracht

Isaac Newton (1642 - 1727) kon aantonen dat wanneer hij aannam dat planeten door de zon werden aangetrokken door een kracht die omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand, de drie wetten van Kepler hieruit af te leiden zijn. Daar waar de wetten van Kepler slechts inductief uit empirische gegevens zijn afgeleid, zijn ze bij Newton een gevolg van zijn bewegingsleer: de gravitatiekracht als oorzaak van beweging en zijn tweede wet als bewegingsvergelijking. Nu zijn de wetten een deductief gevolg uit een theoretisch model.

Een ander argument dat Newton gebruikte om zijn voorstel voor de formule van de universele gravitatiekracht te corroboreren¹⁷, was een redenering over de versnelling van de maan.¹⁸ Ze gaat als volgt. De maan maakt een nagenoeg cirkelvormige beweging. Haar versnelling is dus te berekenen met de formule voor de versnelling van een ECB. We hebben dan de omlooptijd en de afstand tot de maan nodig. De straal van de cirkelbeweging van de maan is ongeveer 60 keer de straal van de aarde.

$$a = r\omega^2 = r\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

$$= 6370 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot 60 \cdot \left(\frac{2\pi}{27,3 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}}\right)^2 = 0,0027 \text{ m/s}^2$$

Dit getal komt overeen met een omgekeerd kwadratische afhankelijkheid van de straal. Nemen we namelijk de valversnelling op aarde, $9,81 \text{ m/s}^2$ en delen we deze door 60^2 (de maan bevindt zich immers 60 keer zo ver), dan krijgen we hetzelfde getal.

$$a = \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{60^2} = 0,0027 \text{ m/s}^2$$

Hiermee had Newton een argument om aan te nemen dat de gravitatiekracht omgekeerd evenredig moet zijn met het kwadraat van de onderlinge afstand tussen de massa's.

De *universele of algemene gravitatiekracht*, één van de vier fundamentele natuurkrachten, wordt als volgt geformuleerd:

Twee puntmassa's m en m' , die zich op een afstand r van elkaar bevinden, trekken elkaar aan met een kracht die gericht is volgens de verbindinglijn van de twee massa's en waarvan de grootte recht evenredig is met het product van de twee massa's en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tussen beide:

$$F = G \frac{mm'}{r^2} \quad (6)$$

De evenredigheidscoëfficiënt G wordt de *gravitatieconstante* genoemd.

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

Newton bepaalde de constante G niet zelf. Dat werd na zijn dood door Cavendish (1731 - 1810) gedaan.

¹⁷Een moeilijk woord dat 'met argumenten staven' betekent.

¹⁸Zijn berekeningen borg hij op omdat ze niet strookte met de realiteit. Enkele jaren later bleek echter dat de door astronomen gebruikte afstand tot de maan fout was. Een nieuwe waarde toonde aan dat Newton een correcte redenering had gebruikt.

7.3 Satellietbanen

7.3 Satellietbanen

Hoe komt het dat de maan door de aarde wordt aangetrokken en er toch niet naartoe valt? Dat komt omdat de neiging van de maan om door de traagheid weg te vliegen volgens de richting waarin hij beweegt, de valbeweging naar de aarde toe compenseert. De gravitatiekracht zorgt voor de middelpuntzoekende kracht van de nagenoeg cirkelvormige beweging die de maan maakt rond de aarde.¹⁹

Net zoals de maan worden ook kunstsatellieten door de gravitatiekracht in een baan rond de aarde gehouden. Denk maar aan GPS-satellieten en het internationaal ruimtestation. Op de website van de NASA²⁰ kan je real-time gegevens van verschillende satellieten terugvinden.

7.3.1 Parkeerbaan

Met een satelliet is het net zoals met de maan. Willen we ervoor zorgen dat de satelliet steeds in eenzelfde baan rond de aarde blijft cirkelen, dan moet hij een welbepaalde snelheid meekrijgen. Voor een cirkelvormige baan met de aarde als middelpunt fungeert de gravitatiekracht als middelpuntzoekende kracht. De versnelling is dan die van een ECB, wat we kunnen gebruiken om de juiste snelheid af te leiden:

$$\begin{aligned} F &= ma \\ G \frac{m_a m}{r^2} &= m \frac{v^2}{r} \\ v &= \sqrt{\frac{G m_a}{r}} \end{aligned}$$

Hierin is m de massa van de satelliet, m_a de massa van de aarde en r de straal van de cirkelbeweging die de satelliet maakt. De massa van de satelliet speelt duidelijk geen rol.

Passen we deze formule toe op het internationaal ruimtestation, dat ongeveer op een hoogte van 412 km vliegt, dan krijgen we, met een gemiddelde aardstraal van 6370 km, volgende schatting voor de snelheid:

$$v = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,9721986 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6370 \cdot 10^3 \text{ m} + 412 \cdot 10^3 \text{ m}}} = 7,66 \text{ km/s}$$

Dit ligt erg dicht bij de eigenlijke snelheid – en dat voor zo'n 'simpele' berekening. De mechanica van Newton is duidelijk heel krachtig!

7.3.2 Geostationaire baan

Er is één satellietbaan die een speciale eigenschap heeft: de snelheid van de satelliet en de afstand tot de aarde zijn zodanig dat de hoeksnelheid van de satelliet gelijk is aan die van de aarde. De baan ligt bovendien in het equatoriaal vlak zodat voor een waarnemer op de evenaar de satelliet steeds zichtbaar is in het zenit – loodrecht boven de waarnemer. Vandaar dat over een geostationaire baan wordt gesproken.

Als we eisen dat de hoeksnelheid van de satelliet gelijk is aan die van de aarde (de periode moet bijgevolg

¹⁹Maar welke kracht duwt de maan dan voort om zijn snelheid te onderhouden? Geen kracht! Herinner je dat de wet van de traagheid zegt dat je geen kracht nodig hebt om een eenmaal verworven snelheid aan te houden. Er is ook geen directe maar een indirecte relatie tussen kracht en snelheid. De tweede wet van Newton relateert kracht aan *versnelling*, niet aan snelheid! Omdat er in de ruimte geen wrijving is, is er niemand om de maan tegen te houden en blijft hij voortgaan.

²⁰iSat: [Interactive Satellite Viewer \(science.nasa.gov/iSat/\)](https://science.nasa.gov/iSat/)

7.3 Satellietbanen

24 uur zijn) en dat de baan in het evenaarsvlak ligt, kunnen we de straal van de baan afleiden:

$$\begin{aligned}
 F &= ma \\
 \Downarrow \\
 G \frac{m_a m}{r^2} &= m r \omega^2 \\
 r &= \sqrt[3]{\frac{G m_a}{\omega^2}} = \sqrt[3]{\frac{G m_a T^2}{4\pi^2}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,9721986 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot (24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s})^2}{4\pi^2}} \\
 &= 42\,232 \text{ km}
 \end{aligned}$$

Als we hier de straal van de aarde nog afhalen, vinden we dat de satellietbaan zich $42\,232 \text{ km} - 6\,370 \text{ km} = 35\,862 \text{ km}$ boven het aardoppervlak bevindt. Dat is ongeveer een tiende van de afstand tot de maan.

Opmerking: waarom kan er geen geostationaire baan boven België worden geïnstalleerd? Omdat alle parkeerbanen als middelpunt het middelpunt van de aarde moeten hebben. Het is immers de gravitatiekracht die voor de middelpuntzoekende kracht zorgt. Moest je een baan boven België willen maken, dan zou het middelpunt op de rotatieas ergens boven de noordpool liggen. Vanuit dat middelpunt wordt echter geen kracht uitgeoefend.

7.4 Gewicht**7.4 Gewicht**

Het gewicht van een lichaam is de grootte van de kracht die door het lichaam op haar steun wordt uitgeoefend.

Let op het feit dat het om de *grootte* van een kracht gaat en dat gewicht dus wordt uitgedrukt in newton. In de omgangstaal zijn we hierin niet correct. Men zegt zoveel kilogram te wegen terwijl kilogram de eenheid van massa is.

7.5 De zwaartekracht**7.5 De zwaartekracht**

De zwaartekracht is een bijzonder geval van de universele gravitatiekracht: de gravitatiekracht door de aarde op een massa uitgeoefend noemen we ook de zwaartekracht.

7.5.1 De valversnelling

Proefondervindelijk zien we dat op de aarde alle lichamen met dezelfde valversnelling g naar de aarde toe vallen. De tweede wet van Newton zegt dan dat de zwaartekracht die deze versnelling moet veroorzaken gelijk moet zijn aan de massa van het lichaam vermenigvuldigd met deze versnelling:

$$\begin{aligned} F &= ma \\ \Downarrow \\ G \frac{m_A m}{r^2} &= mg \\ \Downarrow \\ g &= G \frac{m_A}{r^2} \end{aligned} \tag{7}$$

De valversnelling g is inderdaad onafhankelijk van de massa van het beschouwde lichaam.

De zwaartekracht op een grotere massa is wel groter, maar doordat een grotere massa een grotere traagheid heeft, is het moeilijker haar bewegingstoestand te veranderen. Deze twee eigenschappen heffen elkaar dus op zodat alle massa's met een zelfde valversnelling vallen.

8.1 Inleiding

8.1 Inleiding

In essentie hebben we met de wetten van Newton, de formules voor o.a. de gravitatiekracht en de kinematica voldoende om alle mechanische verschijnselen te beschrijven. Je zou dus kunnen zeggen dat we geen bijkomende elementen nodig hebben. Maar wat met het begrip energie, een fundamentele grootheid in de fysica en vaak handig bij het oplossen van probleemstellingen? Willen we dit begrip in de mechanica gebruiken, dan zullen we het moeten definiëren aan de hand van begrippen die we al hebben – zoals kracht. De wetten van Newton vormen immers het fundament van de mechanica – alles moet hierop gestoeld zijn.

Je leerde ooit iets over energie: *een lichaam bezit energie als het de mogelijkheid heeft om arbeid te verrichten*. Zo bezit een bewegende hamer *kinetische energie* omdat hij als gevolg van zijn beweging arbeid kan verrichten: hij kan een nagel in de muur drijven. De opgewonden veer van een mechanisch horloge is een voorbeeld van *potentiële energie*. Als gevolg van de spanningstoestand van de veer – die door een bepaalde plaats wordt gekarakteriseerd – kan de veer arbeid verrichten: terwijl de veer zich geleidelijk ontspant, verricht ze arbeid door de wijzers te laten ronddraaien.

Ook in de omgangstaal kennen we de termen arbeid en energie. Je mag echter niet vergeten dat deze hier een bredere betekenis dragen dan degene die we binnen de fysica voor ogen hebben. Zo moet de *kwantitatieve* omschrijving van de mogelijkheid om arbeid te verrichten, vervangen worden door een *kwantitatieve*; we willen weten *hoeveel* arbeid er geleverd wordt, of *hoeveel* energie een bepaald lichaam bezit. Als we bovendien zeggen dat energie de mogelijkheid is om arbeid te leveren, dan moeten we in eerste instantie het begrip arbeid *definiëren*. We gebruiken hiervoor o.a. het begrip kracht. Aan de hand van het begrip arbeid, kunnen we dan vervolgens het begrip energie definiëren.

8.2 Arbeid geleverd door een constante kracht

8.2 Arbeid geleverd door een constante kracht

In essentie hebben we met de wetten van Newton, de formules voor o.a. de gravitatiekracht en de kinematica voldoende om alle mechanische verschijnselen te beschrijven. Je zou dus kunnen zeggen dat we geen bijkomende elementen nodig hebben. Maar wat met het begrip energie, een fundamentele grootheid in de fysica en vaak handig bij het oplossen van probleemstellingen? Willen we dit begrip in de mechanica gebruiken, dan zullen we het moeten definiëren aan de hand van begrippen die we al hebben – zoals kracht. De wetten van Newton vormen immers het fundament van de mechanica – alles moet hierop gestoeld zijn.

Je leerde ooit iets over energie: *een lichaam bezit energie als het de mogelijkheid heeft om arbeid te verrichten*. Zo bezit een bewegende hamer *kinetische energie* omdat hij als gevolg van zijn beweging arbeid kan verrichten: hij kan een nagel in de muur drijven. De opgewonden veer van een mechanisch horloge is een voorbeeld van *potentiële energie*. Als gevolg van de spanningstoestand van de veer – die door een bepaalde plaats wordt gekarakteriseerd – kan de veer arbeid verrichten: terwijl de veer zich geleidelijk ontspant, verricht ze arbeid door de wijzers te laten ronddraaien.

Ook in de omgangstaal kennen we de termen arbeid en energie. Je mag echter niet vergeten dat deze hier een bredere betekenis dragen dan degene die we binnen de fysica voor ogen hebben. Zo moet de *kwalitatieve* omschrijving van de mogelijkheid om arbeid te verrichten, vervangen worden door een *kwantitatieve*; we willen weten *hoeveel* arbeid er geleverd wordt, of *hoeveel* energie een bepaald lichaam bezit. Als we bovendien zeggen dat energie de mogelijkheid is om arbeid te leveren, dan moeten we in eerste instantie het begrip arbeid *definiëren*. We gebruiken hiervoor o.a. het begrip kracht. Aan de hand van het begrip arbeid, kunnen we dan vervolgens het begrip energie definiëren.

8.3 Arbeid geleverd door een niet-constante kracht

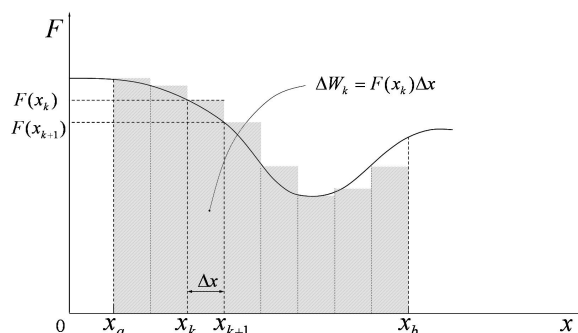
8.3 Arbeid geleverd door een niet-constante kracht

Algemeen zal een kracht gedurende de verplaatsing niet constant blijven. Ze zal met andere woorden o.a. afhankelijk zijn van de plaats waar het lichaam zich bevindt. We kunnen die afhankelijkheid beschrijven met behulp van een functie, de (grootte van de) kracht als functie van de plaats:

$$F = F(x)$$

Eenvoudigheidshalve beperken we ons hier tot bewegingen op een rechte. Bewegingen in meerdere dimensies vereisen een uitgebreidere integraaltheorie dan hetgeen we nu kennen.

We geven een opbouw om tot een definitie van arbeid te komen in het geval dat de kracht dus niet constant is. Ze vertoont gelijkenissen met de opbouw van de integraal.



Figuur 38: Opbouw arbeid bij een niet-constante kracht

Verdeel de verplaatsing $x_b - x_a$ in heel veel hele kleine stukjes Δx bijvoorbeeld als volgt:

$$\Delta x = \frac{x_b - x_a}{n}$$

met $n \in \mathbb{N}_0$ zeer groot. De posities tussen de stukjes kunnen we dan beschrijven door

$$x_k = x_a + k\Delta x \quad k \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$$

Hoe kleiner Δx is, hoe minder de kracht binnen deze stukjes varieert en hoe meer dus $F(x_k)$ de kracht weergeeft die aanwezig is bij de verplaatsing van x_k naar x_{k+1} . Het kleine stukje arbeid $\Delta W_k = F(x_k)\Delta x$ zouden we kunnen beschouwen als een benadering van de geleverde arbeid gedurende deze kleine verplaatsing. De arbeid geleverd bij de gehele verplaatsing zou dan overeen kunnen komen met de som van alle stukjes geleverde arbeid. Hoe kleiner we Δx nemen hoe meer die som overeenkomt met wat de totale arbeid zou moeten zijn, vandaar dat in de limiet van Δx gaande naar nul, we de geleverde arbeid zouden kunnen vinden. Deze limiet komt overeen met het nemen van een integraal:

$$W = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_{k=0}^{n-1} \Delta W_k = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n F(x_k) \Delta x = \int_{x_a}^{x_b} F(x) dx$$

Dit moet de volgende algemene definitie van arbeid legitimeren.

De mechanische arbeid W , geleverd door een kracht $\vec{F}(x)$ gedurende de verplaatsing op een rechte van x_a tot x_b wordt gedefinieerd als

$$W = \int_{x_a}^{x_b} F_x(x) dx \quad (8)$$

waarbij $F_x(x)$ de getalcomponent van $\vec{F}(x)$ is volgens de bewegingsrichting.

Opmerkingen:

8.3 Arbeid geleverd door een niet-constante kracht

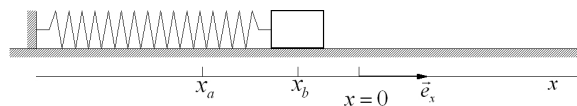
- Indien de kracht als functie van de plaats expliciet gekend is, kan de integraal verder bepaald worden.
- De twee vorige definities zijn speciale gevallen van deze definitie. Inderdaad bekomen we de formule (??) indien de kracht een constante is. De kracht schuift voor het integraalteken en de integraal zelf wordt de verplaatsing.²¹
- Arbeid kan negatief zijn. Dit is o.a. het geval wanneer kracht en verplaatsing een tegengestelde zin hebben.

Voorbeeld: Arbeid door een veer geleverd

Een eenvoudig maar duidelijk voorbeeld van een kracht die afhankelijk is van de plaats is de kracht door een veer uitgeoefend. Voor niet te grote uitwijkingen wordt deze gegeven door de wet van Hooke:

$$F(x) = -kx$$

Hierin is k de veerconstante en x de verlenging van de veer t.o.v. zijn evenwichtspositie²². Het minteken komt van het feit dat de kracht steeds tegengesteld is aan de uitwijking. Het is een *terugroepkracht*. Bij het samendrukken van de veer bijvoorbeeld is $x < 0$ zodat de kracht positief en dus tegengesteld aan de uitwijking is.



We willen de arbeid berekenen door de veerkracht geleverd op een massa bij de verplaatsing van een verlenging x_a naar een verlenging x_b . Volgens de definitie wordt dit:

$$\begin{aligned} W &= \int_{x_a}^{x_b} F(x) dx = \int_{x_a}^{x_b} -kx dx \\ &= -k \left[\frac{x^2}{2} \right]_{x_a}^{x_b} \\ &= \frac{1}{2} k x_a^2 - \frac{1}{2} k x_b^2 \end{aligned}$$

Indien het beginpunt x_a verder uit de evenwichtspositie ligt dan het eindpunt x_b is de geleverde arbeid positief.

²¹Ga dit na!

²²Uit het vierde jaar ken je deze uitdrukking onder de vorm $F = k\Delta l$.

8.4 Het arbeid-energietheorema

8.4 Het arbeid-energietheorema

Indien op een voorwerp een resulterende kracht inwerkt, moet de snelheid ervan veranderen. Volgens de tweede wet van Newton krijgt het immers een versnelling. Indien kracht en verplaatsing dezelfde zin hebben, is er een snelheidstoename en is de arbeid door de kracht geleverd positief. Er moet dus misschien een verband bestaan tussen de geleverde arbeid en de verandering in snelheid ...

Het arbeid-energietheorema

Voor de arbeid door de *resulterende kracht* op een voorwerp geleverd geldt:

$$W = \int_{x_a}^{x_b} F(x) dx = \frac{mv_b^2}{2} - \frac{mv_a^2}{2}$$

waarin m de massa van het voorwerp is en v_a en v_b de snelheden van het voorwerp op respectievelijk het begin- en het eindpunt.

In het rechterlid verschijnt een grootheid die we *definiëren* als de *kinetische energie* van het voorwerp:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

De arbeid geleverd door de resulterende kracht op een voorwerp, is dus gelijk aan het verschil van de kinetische energie van het lichaam in begin- en eindpunt:

$$W = E_{k,b} - E_{k,a} \quad (9)$$

Opmerkingen:

- Dit theorema geeft een samenhang tussen arbeid en energie zoals we dat verwachten. De *nettoarbeid* geleverd over het hele traject *door* de resulterende kracht *op* het voorwerp, resulteert in een toe- of afname van de kinetische energie van dat voorwerp met *eenzelfde waarde*. Zoveel arbeid als geleverd wordt, zoveel energie krijgt of verliest het voorwerp. De manier waarop de arbeid is geleverd tussen begin- en eindpunt speelt geen rol. Enkel de totale hoeveelheid is van belang.
- Indien de geleverde nettoarbeid op een voorwerp positief is, neemt de kinetische energie toe. Voor positieve arbeid hebben kracht en verplaatsing tussen begin- en eindpunt meer eenzelfde dan een tegengestelde zin zodat de snelheid inderdaad kan toenemen. Denk bijvoorbeeld aan een vallende steen; hier levert de zwaartekracht ook positieve arbeid.
- Indien de geleverde nettoarbeid op een voorwerp negatief is, neemt de kinetische energie af. Voor een negatieve arbeid hebben kracht en verplaatsing tussen begin- en eindpunt meer een tegengestelde dan een gelijke zin. De snelheid zal op die manier kunnen afnemen. De geleverde arbeid op bijvoorbeeld een hamer die een nagel in de muur drijft, is negatief. Zijn snelheid, en dus zijn kinetische energie, is afgenomen. Ze is gebruikt om de nagel in de muur te krijgen. Inderdaad is de kracht *door* de hamer op de nagel uitgeoefend met de beweging mee (de *hamer* levert positieve arbeid, en verliest energie) en is de reactiekracht, de kracht door de nagel *op* de hamer uitgeoefend, tegengesteld aan de beweging (de *nagel* levert negatieve arbeid, of ontvangt dus energie).
- Merk op dat dit theorema geldt voor de arbeid door de *resulterende kracht* geleverd en in de regel niet door slechts één van de krachten die op het voorwerp werken. Het is de resulterende kracht die voor een resulterende versnelling van het lichaam zorgt en dus voor een verandering in de snelheid.

Bewijs arbeid-energietheorema

Veronderstel dat de resulterende kracht wordt gegeven door de functie $F(x)$. We berekenen de arbeid door de resulterende kracht geleverd wanneer het voorwerp een verplaatsing ondergaat van x_a naar x_b door de

8.4 Het arbeid-energietheorema

tweede wet van Newton te gebruiken²³, de kettingregel en een substitutie door te voeren.

$$\begin{aligned} W &= \int_{x_a}^{x_b} F(x) dx \\ &= \int_{x_a}^{x_b} ma dx \\ &= \int_{x_a}^{x_b} m \frac{dv}{dt} dx \end{aligned}$$

Door de kettingregel $\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt}$ en de definitie van snelheid $v = \frac{dx}{dt}$ te gebruiken, krijgen we

$$\begin{aligned} W &= \int_{x_a}^{x_b} m \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} dx \\ &= \int_{x_a}^{x_b} m \frac{dv}{dx} v dx \end{aligned}$$

Deze integraal kunnen we uitwerken door de substitutie $v = v(x)$ door te voeren²⁴. De integratiegrenzen x_a en x_b voor de positie x , worden $v_a = v(x_a)$ en $v_b = v(x_b)$ voor de snelheid v . We wisselen voor de duidelijkheid ook twee factoren om.

$$\begin{aligned} W &= \int_{x_a}^{x_b} m v \underbrace{\frac{dv}{dx}}_{u \cdot u' dx} dx \\ &= \int_{v(x_a)}^{v(x_b)} m v dv \\ &= \left[\frac{mv^2}{2} \right]_{v_a}^{v_b} \\ &= \frac{mv_b^2}{2} - \frac{mv_a^2}{2} \end{aligned}$$

■

Oefening 8.4.1. (arbeid-energie theorema) Een horizontaal liggende veer op tafel heeft een veerconstante $k = 360 \text{ N/m}$ en wordt $11,0 \text{ cm}$ ingedrukt. Een blok van $1,85 \text{ kg}$ wordt tegen de gespannen veer gelegd en losgelaten. De wrijvingscoëfficiënt tussen het blok en de tafel is $0,38$.

- Hoeveel arbeid levert de veerkracht vanaf de ingedrukte toestand tot in zijn evenwichtstoestand?
- Hoeveel arbeid levert de wrijvingskracht over hetzelfde traject?
- Hoe groot is de nettoarbeid?
- Welke snelheid heeft het blok wanneer het zich, in de evenwichtstoestand, van de veer losmaakt?

²³ Het gaat hier immers over de resulterende kracht. . .

²⁴ Omdat de substitutie met de letter v enigszins verwarrend is, vind je onder de uitdrukking de benoeming van de variabelen zoals je die voor de substitutieregels kent, nl. met u . En hopelijk overbodig, hier de substitutieregels:

$$\int_a^b \underbrace{f(\underbrace{g(x)}_u)}_{\underbrace{g'(x)}_{u'}} \underbrace{dx}_{du} = \int_{g(a)}^{g(b)} f(u) du$$

8.5 Elastische potentiële energie

8.5 Elastische potentiële energie

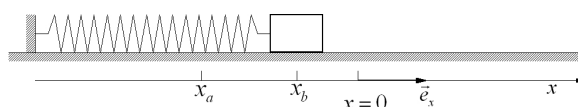
Naast kinetische energie – de energie geassocieerd met de beweging van een lichaam – kunnen we een andere vorm van mechanische energie definiëren: de *potentiële energie*. Dit is de energie geassocieerd met de plaats of configuratie van een lichaam. Een lichaam met kinetische energie heeft energie omdat het als gevolg van zijn beweging arbeid kan verrichten op een ander object. Kan een object arbeid verrichten als gevolg van zijn plaats, dan noemen we deze energie potentiële energie.

Het leveren van arbeid op een voorwerp hoeft niet altijd te resulteren in een verandering van de kinetische energie. Bijvoorbeeld wanneer de arbeid van slechts één van de krachten op een voorwerp wordt beschouwd en niet de arbeid door de resulterende kracht geleverd. De geleverde arbeid moet dan naar een andere vorm van energie gaan: potentiële energie. Bij het opwinden van een horloge bijvoorbeeld wordt de geleverde arbeid gebruikt om de veer samen te drukken. De veer kan zich daarna ontspannen en arbeid op de wijzers leveren.

De vraag *hoeveel* energie een voorwerp heeft, zal bij nader inzien enkel relatief kunnen worden bepaald. Is bijvoorbeeld de kinetische energie van een bekertje koffie op het tafeltje van de trein van Brussel naar Gent gelijk aan nul omdat het t.o.v. het tafeltje niet beweegt? Of is de kinetische energie verschillend van nul omdat het bekertje een snelheid heeft t.o.v. iemand buiten de trein en dus, moest de trein plots stoppen, het bekertje verder zal vliegen en (veel opkuis-) arbeid kan leveren? En hoeveel energie heeft een blokje op een bepaalde hoogte? Zoveel als dat het arbeid kan leveren? Dat zal niet eenduidig te bepalen zijn. De geleverde arbeid tot op het tafeloppervlak, de grond of de bodem van de put die we vervolgens hebben gegraven is steeds verschillend. De geleverde arbeid, en dus de energie, is afhankelijk van het referentiepunt dat we nemen. In ieder geval moet de energie van een voorwerp afnemen met de hoeveelheid arbeid die het levert.

8.5.1 Elastische potentiële energie

We hernemen het voorbeeld van de veerkracht (??).



Hier vonden we dat de hoeveelheid arbeid door de veerkracht geleverd bij een verplaatsing van x_a naar x_b gegeven wordt door:

$$W = \frac{1}{2}kx_a^2 - \frac{1}{2}kx_b^2$$

De geleverde arbeid kan geschreven worden als het verschil van de uitdrukking $\frac{1}{2}kx^2$ geëvalueerd in begin- en eindpunt. De waarde van de uitdrukking neemt af met de hoeveelheid arbeid die is geleverd. We kunnen de uitdrukking dus interpreteren als de hoeveelheid energie die de veer op een bepaald punt, een bepaalde plaats, bezit. Dat wat immers verloren gaat aan energie – de oorspronkelijke energie min de overblijvende energie – moet door de veer worden geleverd als arbeid. We noemen de uitdrukking de *elastische potentiële energie* van een veer:

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 \quad (10)$$

De geleverde arbeid kunnen we vervolgens schrijven als

$$\begin{aligned} W &= E_{p,a} - E_{p,b} = -(E_{p,b} - E_{p,a}) \\ &\Downarrow \\ W &= -\Delta E_p \end{aligned}$$

Hierin is ΔE_p de verandering van potentiële energie: $\Delta E_p = E_{p,\text{eind}} - E_{p,\text{begin}}$. Als de veer arbeid verricht dan gaat dat ten koste van haar potentiële energie: is de geleverde arbeid W positief, dan moet er een afname

8.5 Elastsiche potentiële energie

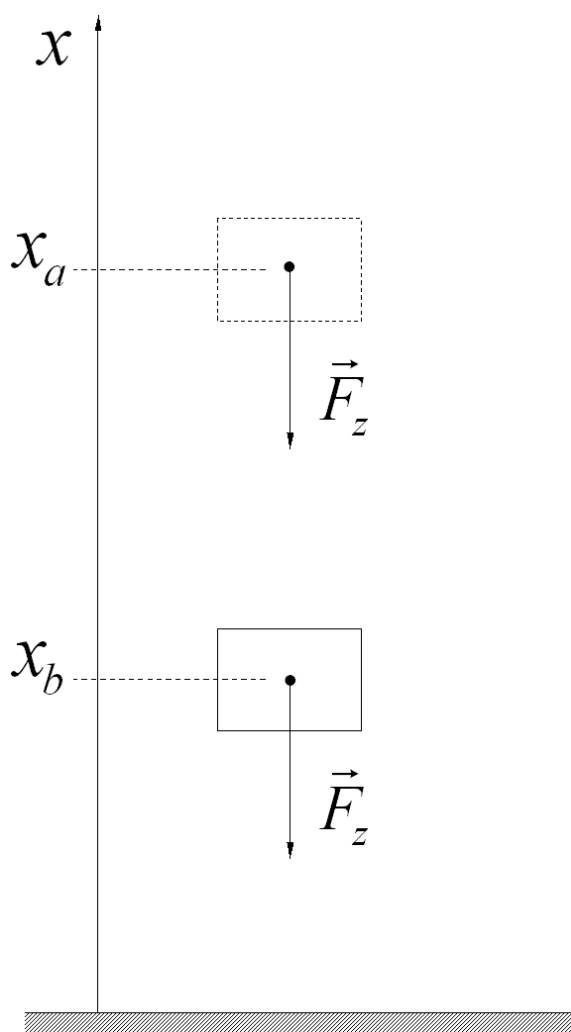
van de potentiële energie zijn (de verandering ΔE_p moet negatief zijn). Opnieuw: de hoeveelheid geleverde arbeid komt overeen met het verlies in potentiële energie tussen begin- en eindpunt. Is de verandering van de potentiële energie ΔE_p positief dan is de geleverde arbeid negatief. Negatieve arbeid betekent dat i.p.v. het leveren van arbeid (het weggeven van energie), er van elders energie wordt toegevoegd en wordt omgezet in potentiële energie.

8.6 Gravitationele potentiële energie

8.6 Gravitationele potentiële energie

8.6.1 Gravitationele potentiële energie

Beschouw een massa op een hoogte boven het aardoppervlak. Vanuit deze positie kan ze arbeid verrichten en zal ze dus potentiële energie bezitten. Als we de massa bijvoorbeeld laten vallen kan ze op de grond een nagel inslaan en dus arbeid verrichten.



Bij het vallen van een hoogte x_a naar een hoogte x_b levert de zwaartekracht die aan de massa trekt een arbeid gelijk aan:

$$W = \int_{x_a}^{x_b} F_z dx = \int_{x_a}^{x_b} (-mg) dx = mgx_a - mgx_b$$

Hier voldoet de uitdrukking mgx aan wat we verwachten van potentiële energie. Het verschil van de uitdrukking geëvalueerd in het beginpunt en het eindpunt – het verschil in energie – is gelijk aan de hoeveelheid arbeid die tussen deze twee posities kan worden geleverd. We noemen de uitdrukking de *gravitationele potentiële energie*. En als we x door h vervangen, krijgen we de gekende vorm:

$$E_p = mgh \quad (11)$$

Net zoals bij de veerkracht geldt $W = -\Delta E_p$.

8.6 Gravitationele potentiële energie

Waarom nu eigenlijk dat minteken? Als de massa valt, wordt door de zwaartekracht positieve arbeid verricht. Op een punt iets lager dan waar de massa was vertrokken, kan de massa nog minder ver vallen zodat ze vanuit dit punt minder arbeid kan leveren. Haar potentiële energie is afgenomen of de verandering ΔE_p is negatief. Dat wat aan potentiële energie verloren is gegaan, is aan arbeid geleverd. Als de massa omhoog wordt gegooid, heeft ze in een punt hoger dan daar waar ze vertrok meer potentiële energie. Vanaf een grotere hoogte kan ze meer arbeid leveren. De potentiële energie neemt dus toe of de verandering ΔE_p is positief. De zwaartekracht F_z is echter tegengesteld (naar beneden gericht) aan de verplaatsing (naar boven) zodat de geleverde arbeid negatief is. Het toenemen van de energie kan maar mogelijk zijn als van elders energie aan de massa wordt gegeven. In dit geval is ze afkomstig van de kinetische energie die bij het opwerpen wordt meegegeven.

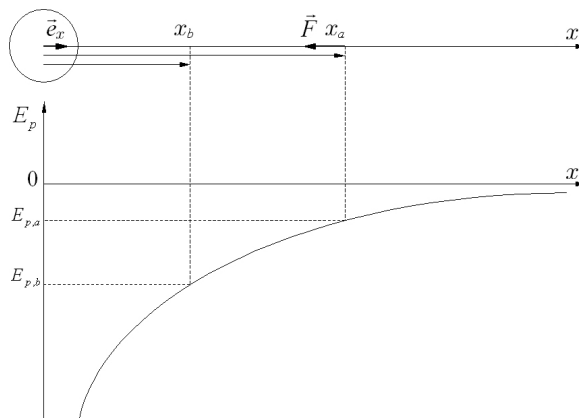
Merk op dat de massa in staat is arbeid te verrichten als gevolg van het feit dat de zwaartekracht erop inwerkt en de massa bijgevolg *zelf* een even grote kracht kan uitoefenen. Op die manier kunnen we de potentiële energie toekennen aan de massa; *de massa* gaat op deze manier in staat zijn arbeid te verrichten.

8.7 Gravitationele potentiële energie, algemeen

8.7 Gravitationele potentiële energie, algemeen

8.7.1 Gravitationele potentiële energie, algemeen

Beschouw een massa onderhevig aan de universele gravitatiekracht. We gaan opnieuw opzoek naar een potentiële energiefunctie geassocieerd aan deze kracht.



Kiezen we een x -as met de oorsprong op de massa m dan wordt, omdat de kracht steeds naar de oorsprong is gericht, de component van de universele gravitatiekracht op de massa m' gegeven door

$$F(x) = -G \frac{mm'}{x^2}$$

De arbeid die door de gravitatiekracht wordt geleverd bij de verplaatsing van de massa m' van x_a naar x_b wordt dan:

$$\begin{aligned} W &= \int_{x_a}^{x_b} -G \frac{mm'}{x^2} dx \\ &= -Gmm' \int_{x_a}^{x_b} \frac{1}{x^2} dx \\ &= -Gmm' \left[-\frac{1}{x} \right]_{x_a}^{x_b} \\ &\Downarrow \\ W &= \left(-G \frac{mm'}{x_a} \right) - \left(-G \frac{mm'}{x_b} \right) \end{aligned}$$

De potentiële energie voor een massa m' wordt bijgevolg gegeven door

$$E_p = -G \frac{mm'}{x} \quad (12)$$

8.8 Referentiepunt van de potentiële energie

8.8 Referentiepunt van de potentiële energie

8.8.1 Referentiepunt van de potentiële energie

Ai, de potentiële energiefunctie (??) is voor alle waarden van x *negatief*. Zou potentiële energie overeenkomen met de mogelijk te leveren hoeveelheid arbeid, dan zou de massa met andere woorden minder dan geen arbeid kunnen leveren vanop een bepaalde afstand. Een vallende steen op de aarde lijkt toch wel het tegendeel te bewijzen. . . . Bovendien is de hoeveelheid arbeid die de massa m' vanaf een bepaald punt tot aan m kan leveren *oneindig* groot ²⁵. De massa zou dus oneindig veel energie hebben. Zeggen dat de potentiële energie gelijk is aan de hoeveelheid arbeid die kan worden verricht, is dus niet mogelijk?!

De potentiële energie kan niet als een absolute maar enkel als een relatieve grootte worden gedefinieerd. Het enige wat we van de potentiële energie kunnen verwachten is dat het *verschil* tussen een begin- en eindpunt overeenkomt met de hoeveelheid geleverde arbeid tussen die twee punten. Een relatieve grootte is tot op een constante na bepaald. Het gevolg is dat als E_p een potentiële energiefunctie is, $E'_p = E_p + \text{cte}$ dat ook is. Immers:

$$\begin{aligned} E'_{p,a} - E'_{p,b} &= (E_{p,a} + \text{cte}) - (E_{p,b} + \text{cte}) \\ &= E_{p,a} - E_{p,b} \\ &= W \end{aligned}$$

Bij de potentiële energiefuncties (??), (??) en (??) zoals we ze hiervoor hebben gegeven, mag dus steeds een constante worden opgeteld. Het *referentiepunt* – daar waar de potentiële energie nul is – kan vrij worden gekozen.

²⁵Waarom?

8.9 Potentiële energie

8.9 Potentiële energie

8.9.1 Potentiële energie

Uit de drie voorbeelden blijkt dat in het algemeen de potentiële energie een plaatsafhankelijke functie moet zijn waarvan het verschil tussen twee punten overeenkomt met de geleverde arbeid door de kracht geassocieerd met deze functie. Noemen we deze functie $U(x)$, dan moet gelden:

$$\begin{aligned} W = \int_{x_a}^{x_b} F(x) \, dx &= -(U(x_b) - U(x_a)) \\ &\Downarrow \\ \int_{x_a}^{x_b} -F(x) \, dx &= U(x_b) - U(x_a) \end{aligned}$$

Als $U(x)$ een primitieve functie voor $-F(x)$ is (dus een functie waarvan de afgeleide de functie $-F(x)$ is: $U'(x) = -F(x)$) dan is aan deze voorwaarde voldaan. Immers geldt dan:

$$\int_{x_a}^{x_b} -F(x) \, dx = \int_{x_a}^{x_b} \frac{d}{dx} U(x) \, dx = U(x_b) - U(x_a)$$

Algemeen geldt dan ook voor de potentiële energie:

Indien er voor een plaatsafhankelijke kracht $F(x)$ een functie $U(x)$ bestaat waarvoor de afgeleide op een minteken na de kracht is,

$$F(x) = -\frac{d}{dx} U(x)$$

dan wordt $U(x)$ de *potentiële energie* genoemd.

De potentiële energie is dus een functie waarvoor de negatieve afgeleide de kracht is. Waarom een minteken? Een positieve afgeleide betekent een toename van de potentiële energie. Om naar een hogere energie te gaan moet *tegen* de kracht in worden bewogen. De kracht moet dus tegengesteld zijn aan de richting waarin de potentiële energie toeneemt.

Zie ook dat de potentiële energie inderdaad tot op een constante na is gedefinieerd. Bij het afleiden valt immers een constante weg.

Een kracht waarvoor een potentiaalfunctie bestaat, levert arbeid die enkel bepaald wordt door begin- en eindpunt. De arbeid is dus onafhankelijk van de gevolgde weg. Zo'n kracht wordt conservatief genoemd. Enkel voor conservatieve krachten bestaat dus een potentiële energie.

Ga na dat de energiefuncties die we bij de drie voorbeelden (??), (8.5.1) en (??) vonden, voldoen aan deze definitie en dus potentiële energiefuncties zijn.

8.10 Het beginsel van behoud van energie

8.10 Het beginsel van behoud van energie

Het arbeid-energietheorema relateert de geleverde arbeid door een resulterende kracht met de toename aan kinetische energie. Het zegt dat de hoeveelheid geleverde arbeid door de resulterende kracht volledig wordt gebruikt voor de toename van kinetische energie. Anderzijds als met de resulterende kracht een potentiële energie kan worden geassocieerd, dan is de geleverde arbeid afkomstig van het verlies in potentiële energie. De energie die dus onder de vorm van potentiële energie verloren gaat wordt in kinetische energie gewonnen. En dit zodanig dat de som van beide energiën - de totale mechanische energie - constant blijft. Uit $W = \Delta E_k$ en $W = -\Delta E_p$ volgt:

$$\begin{aligned}\Delta E_k &= -\Delta E_p \\ \Downarrow \\ E_{k,a} + E_{p,a} &= E_{k,b} + E_{p,b}\end{aligned}$$

Spelen dus enkel krachten een rol waarvoor een potentiële energie functie bestaat, dan is de som van de kinetische en de potentiële energie van een voorwerp gedurende de beweging constant.

Het beginsel van behoud van mechanische energie

$$E_{k,a} + E_{p,a} = E_{k,b} + E_{p,b} \quad (13)$$

$$\Downarrow$$

$$E = \frac{mv^2}{2} + E_p = \text{constant} \quad (14)$$

Het principe van behoud van energie is een van de meest fundamentele principes in de fysica ...