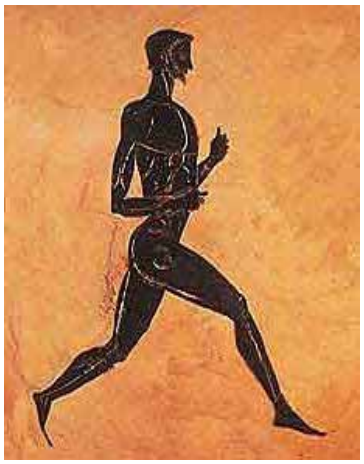
Leven en Natuurkunde



MENSELIJKE PRESTATIES EN NATUURWETTEN

KLAS 4 / 5 VWO

LEVEN EN NATUURKUNDE

In deze lessenserie nemen we een kleine duik in de biofysica. De biofysica beschrijft levende systemen aan de hand van natuurkundige wetten, het is een vorm van toegepaste fysica. Een van de natuurkundigen die de overstap maakte naar de biofysica was Leo Szilard. Hij karakteriseerde zijn rol van natuurkundige in de biologie als volgt: "What I brought into biology was an attitude: the conviction that mysteries can be solved . If secrets exist, they must be explainable."

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde
Auteurs	Aartjan van Pelt, Marileen Dogterom, Loran de Vries, Fleur Zeldenrust
M.m.v.	Ed van den Berg, Michiel Müller en Piet Tom Smit
Vormgeving	Loran de Vries
NiNa Redactie	Harrie Eijkelhof, Guus Mulder, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust
Versie	mei 2009

Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2009

Alle rechten voorbehouden. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins al of niet commercieel hergebruik.

Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten,
- als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt, voor al of niet commercieel hergebruik,

mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:

- schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, voor dit materiaal vertegenwoordigd door de Universiteit van Amsterdam (via info@nieuwenatuurkunde.nl),
- bij hergebruik of verspreiding dient de gebruiker de bron correct te vermelden, en de licentie-voorwaarden van dit werk kenbaar te maken.

Voor zover wij gebruik maken van extern materiaal proberen wij toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen: info@nieuwenatuurkunde.nl

De module is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo, Universiteit van Amsterdam en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit het gebruik van deze module.

INHOUDSOPGAVE

1 Inleiding *6*
Opgaven **8**
2 Diffusie *9*
2.1 Voorbeelden van spontane beweging **9**
2.2 Snelheid van diffusie **11**
2.3 Waarnemen van diffusie **16**
Opgaven **19**
3 Nanomotoren *25*
3.1 Noodzaak voor gerichte beweging **26**
3.2 Stappende eiwitten **27**
3.3 Inzoomen op de levende cel **31**
Opgaven **34**
4 Op tijd reageren *37*
4.1 Spanningspieken als signalen **39**
4.2 Het membraan als RC-keten **44**
Opgaven **46**
5 Complexe systemen *52*
5.1 Homeostase en feedback **53**
5.2 Onvoorspelbaarheid, determinisme en chaos. **55**
5.3 Entropie en complexiteit **57**
Opgaven **61**

GLOBALE OPBOUW VAN HET LESMATERIAAL

In het lesmateriaal is een aantal stijlen gebruikt. De *belangrijkste leerstof* is weergeven in *blauwe* tekstvakken. De betekenis van de andere kleuren en stijlen is hieronder aangegeven.

Belangrijke **vergelijkingen** uit de natuurkunde zijn aangegeven in **blauwe** tekstvakken. Deze heb je nodig om rekenwerk mee te kunnen verrichten.

In het **blauwe** tekstvak "**tekstvragen**" staan de opgaven die je na het lezen van de tekst kan gaan maken

In de **blauwe** tekstvakken **"Rekenvoorbeeld"** staan uitgewerkte berekeningen van behandelde formules

In het **zwarte** tekstvak "**Internet**" staan links naar filmpjes, applets of andere informatie beschikbaar op het net.

In het **blauwe** tekstvak "**Begrippen**" staan belangrijkste termen uit de tekst.

In het **blauwe** tekstvak **"Samenvatting"** staat de minimale kennis die je paraat moet hebben.

Opgaven staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf.

In het **groene** tekstvak "**Extra**" staat informatie die niet tot de leerstof behoort.

LEVEN EN NATUURKUNDE

Voorkennis
Kennis van mechanica (snelheid, wrijving, resulterende kracht en snelheidsverandering). Kennis over materie (atomen en moleculen). Het besef dat er een microwereld is die verklaringen levert voor macroscopische waarnemingen. Kennis van elektriciteit (lading, spanning, stroomsterkte en weerstand).

1 Inleiding

Natuurkunde kan je helpen de kennis over het leven te vergroten. Natuurkundige processen liggen aan de basis van veel van wat ons lichaam kan. Denk aan je zintuigen: om te zien, focusseren je ogen licht op moleculaire receptoren, deze moleculen absorberen vervolgens fotonen en sturen daarop een elektrisch signaal naar je hersenen. Je hart maakt gebruik van vloeistofstroming, je oren van trillingen van trilharen in je oor en ga zo maar door. Daarnaast zijn natuurkundige meettechnieken belangrijk in het doorgronden van de werking van biologische systemen. Een voorbeeld daarvan is de nanotechnologie die het mogelijk maakt de werking van biologische systemen tot op het niveau van een enkel molecuul zichtbaar te maken. Ook het kunnen toepassen van wiskundige modellen, iets wat je bij natuurkunde leert, is zeer nuttig voor de biologie. Naast het observeren van de wereld om ons heen, is het kunnen modelleren van systemen essentieel om de werking ervan te kunnen begrijpen. Dat geldt ook voor biologische systemen.

Hoofdstukvraag	**Welke kennis over het leven heeft natuurkunde ons te bieden?**

Tekstvragen

- Controleer de kenmerken aan de hand van voorbeelden van levende 'wezens'.
- Bedenk ook tegenvoorbeelden: dingen die niet leven en toch aan (één van de) kenmerken voldoen.

Op deze wijze vorm je zelf een goed beeld van wat ***leven*** is.

Wat is leven eigenlijk? Wie door biologieboeken bladert komt de volgende kenmerken van leven tegen:

- Bewegen
- Waarnemen en reageren
- Stoffen opnemen, omzetten en afgeven.
- Groeien en veranderen
- Voortplanten.

Het is nuttig om voor jezelf te definiëren (omschrijven) wat "leven" is. Het helpt daarbij om een aantal gangbare kenmerken als uitgangspunt te nemen.

In deze module concentreren we ons op de vraag hoe moleculen en signalen zich verplaatsen door het menselijk lichaam. In een spontane beweging, of gedreven door nanomotoren, of via elektrische processen. Zoals je zult zien heeft elk van die manieren een eigen typerende snelheid.

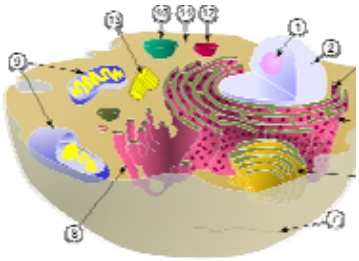
De indeling van deze module is als volgt:

- Hoofdstuk 1 - Inleiding.

Natuurkunde en Leven. Wat is leven en op welke schalen vinden levensprocessen plaats?

- Hoofdstuk 2 - Spontane bewegingen binnen het menselijk lichaam.

Voor alle bewegingen gelden dezelfde natuurwetten en toch neem je op microscopisch niveau andere bewegingen waar dan op macroscopisch niveau. Diffusie, microscopisch en macroscopisch bekeken.



Figuur 1.2 Het lichaam is opgebouwd uit miljoenen cellen. Iedere cel is opgebouwd uit miljoenen moleculen en atomen.

- Hoofdstuk 3 - Moleculaire machines of nanomotoren

Doelgerichte bewegingen in de menselijke cel. Speciale eiwitten in spieren zorgen ervoor dat het lichaam kan bewegen. De constructie van spiercellen zorgt voor krachten die arbeid op de buitenwereld kunnen verrichten.

- Hoofdstuk 4 - Elektrische signalen en reactietijden: wanneer snelheid geboden is.

Spiercellen brengen ledematen in beweging en oefenen krachten uit die arbeid op de buitenwereld kunnen verrichten. De spiercellen moeten echter wel weten wanneer ze dat moeten doen, zij moeten daartoe signalen ontvangen. Zenuwcellen zorgen voor dit signaaltransport. Hoe geven zenuwcellen signalen door?

- Hoofdstuk 5 - Complexe systemen en organisatie.

Een levend systeem is gebaseerd op spontane activiteit (hoofdstuk 2) en georganiseerde activiteit (hoofdstuk 3 en 4). Het samenspel van spontane activiteit en organisatie maakt een systeem tot een *levend* systeem. In hoofdstuk 5 wordt aandacht besteed aan dit complexe samenspel.

Een voorproefje voor hoofdstuk 5 is het volgende experiment:

Bedenk een manier om een mens en een machine van elkaar te onderscheiden. Van een mens verwacht je eerder onvoorspelbaar gedrag. Bij een machine verwacht je eerder voorspelbaar gedrag.

Een manier om het experiment uit te voeren is het opzoeken van websites waar je vragen kunt stellen: de helpfunctie op de website van een groot bedrijf. Dat kan een bank zijn, of een verzekeraar. Op basis van de verkregen antwoorden kun je een conclusie trekken of je met een computerbestand te maken hebt of met een mens.

Mens of machine?

- Ga naar een website waar je vragen kunt stellen.
- Onderzoek of de antwoorden door een mens worden gegeven of door een computer.

Begrippen

Maak zelf een begrippenkaart met de volgende begrippen:
Leven / cellen / deeltjes / beweging / verspreiding / transport / geleiding / spontane activiteit / georganiseerde activiteit

Samenvatting

In deze lessenserie onderzoeken we:

- Beweging van deeltjes
- Transport van informatie
- Spontane beweging van moleculen
- Gerichte beweging van moleculen

Opgaven

1 Ingrepen in een menselijk lichaam

a. Na een ongeval krijgt iemand een kunsthand die hetzelfde kan als een menselijke hand, en zelfs is aan te sturen via zenuwen. Is dit een levend ding?

b. Niet alleen een hand, ook een orgaan zou je kunnen vervangen. Een deel van de darm kun je bijvoorbeeld vervangen door een kunststof buis. Maakt deze ingreep het lichaam minder levend?

c. Stel nu dat je –in een soort science fiction situatie- alle spijsverteringsorganen in het lichaam vervangt door machines die de spijsvertering overnemen, zodat alleen het hoofd nog menselijk is. Is dit menselijk hoofd dan een deel van een levend organisme?

d. Hetzelfde voorbeeld als hierboven: een menselijk hoofd en verder alle lichaamsfuncties overgenomen door apparaten en machines. Zijn deze apparaten en machines nu levende organen?

2 Missie naar de aarde

Een Marsbewoner wordt naar de aarde gestuurd, op zoek naar leven. De Marsbewoner neemt van de aarde een auto mee terug naar Mars. Hij vindt het een goed voorbeeld van leven op aarde. De regering op Mars denkt daar anders over. De Marsbewoner moet voor de rechtbank verschijnen.

De marsbewoner betoogt: “Ik zag deze vorm van leven zich in groten getalen langs wegen verplaatsen. Zij scheidden dikke, giftige rook uit, terwijl ze bewogen. Ze vertoonden groepsgedrag: vele bewogen in dezelfde richting. Ze leken een behoorlijke hoeveelheid energie te bezitten: sommigen bewogen sneller dan 100 km/h! Op het moment dat één van deze levensvormen stopte, of zich langzamer ging voortbewegen, reageerden de anderen. Ze minderden ook vaart en er kwam rood licht uit hun achterkanten. Soms maakten ze harde geluiden. Ik zag ook dat ze zich voedden met een vloeibare substantie”

a. Neem de verdediging van de Marsbewoner op je. Noteer zo veel mogelijk argumenten in zijn voordeel.

b. Neem vervolgens de taak van de aanklager op je en noteer zo veel mogelijk argumenten in zijn nadeel.

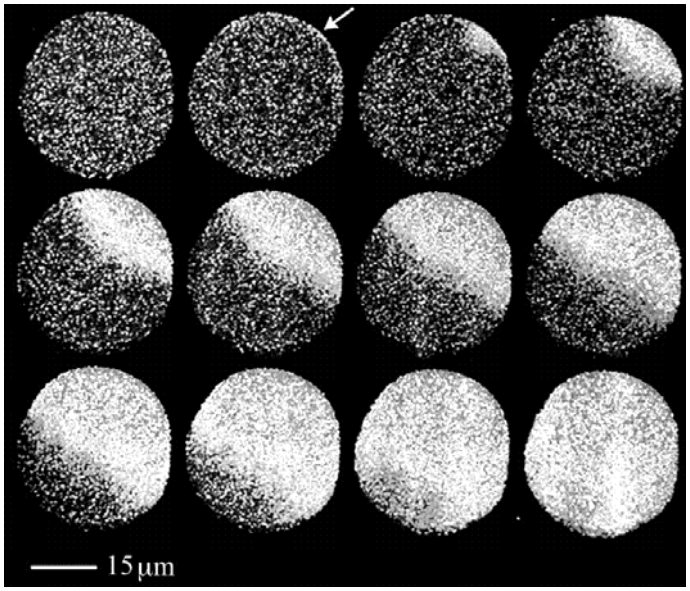
Figuur1.2 Een levende auto!?!

2 Diffusie

Spontane beweging in Cellen

Hoofdstukvraag	**Welk transport is in het lichaam mogelijk door de spontane beweging van moleculen?**

2.1 Voorbeelden van spontane beweging



Figuur 2.1

In figuur 2.1 zie je opeenvolgende beeldjes uit een filmopname van een calciumgolf in een zeesterrenei, die plaatsvindt na de bevruchting door een spermacel. In de onbevruchte eicel is een calciumgevoelige kleurstof aangebracht. Daarna is de cel bevrucht en elke vijf seconden gefotografeerd. We zien dat de vrijgekomen calciumionen zich verspreiden vanuit de plek waar de bevruchting heeft plaatsgevonden (pijltje) over de hele eicel. Zwart staat hier voor een lage calciumconcentratie en wit voor een hoge. Deze filmopname geeft ons inzicht in de verspreiding van stoffen in cellen.

Tekstvraag

1. Bedenk voor jezelf hoe de wereld er uit zou zien zonder spontane molecuulbeweging. En op welke wijze leven dan mogelijk zou zijn.
2. Overleg in groepsverband en probeer tot een conclusie te komen.
3. Bespreek deze vraag ten slotte klassikaal.

Diffusie

Spontane verspreiding van stoffen noem je *diffusie*. Deze spontane verspreiding kun je verklaren met de spontane beweging van moleculen. Deze molecuulbeweging hangt samen met de temperatuur. Wanneer moleculen niet voortdurend zouden bewegen zou geen cel kunnen blijven leven, en zou leven in zijn algemeenheid niet mogelijk zijn. Aan de basis van het leven ligt een *fysisch verschijnsel*: de *temperatuurbeweging van moleculen*.

Dit hoofdstuk gaat in op drie vragen.

- Wat is diffusie en waar kom je het tegen?
- Hoe verklaar je de spontane beweging van moleculen?
- Hoe kun je diffusie waarnemen?

In deze paragraaf staat een aantal voorbeelden van spontane verspreiding van stoffen. Deze voorbeelden helpen, het antwoord op de hoofdstukvraag te vinden.

Enkele waarnemingen

Wanneer in het klaslokaal iemand een flesje parfum opent, is het lokaal even later vervuld van het geurtje. De geur van eten bereikt ons verderop in huis, wanneer er wordt gekookt in de keuken. De geur van een wierookstokje bereikt ons. Dit alles gebeurt zelfs als het windstil is, al duurt het dan langer. Het blijkt dat hier niet uitsluitend stroming in het spel is.

Zonder de spontane beweging van moleculen zou je niet kunnen ruiken bij windstil weer. Je zou in dat geval alleen maar iets ruiken als het toevallig naar je neus geblazen wordt.

Op het moment dat je een druppel inkt in water brengt, zal na enige tijd het hele bakje gekleurd zijn (zie figuur 2.2). De verspreiding heeft niet alleen met stroming te maken. De lokale verspreiding van de moleculen gebeurt ook spontaan door de temperatuurbeweging van de moleculen. Wanneer het water een lage temperatuur heeft, duurt dit erg lang. Wanneer het water een hogere temperatuur heeft, gaat het sneller. Het is de thermische beweging van moleculen die er samen met stroming voor zorgt dat de inktmoleculen zich verspreiden.

Figuur 2.2

Brug naar de volgende paragraaf

In paragraaf 2.2 onderzoeken we de grootheden en omstandigheden die invloed hebben op de snelheid van diffusie.

- Temperatuur heeft invloed op diffusie
- De afmetingen van de deeltjes die zich verspreiden hebben invloed op de diffusie
- De omgevingseigenschappen hebben invloed op diffusie.

2.2 Snelheid van diffusie

Invloeden op de snelheid en richting van spontane verspreiding.

In de vorige paragraaf hebben we enige voorbeelden van diffusie gezien. In paragraaf 2.2 zullen we diffusie nader bekijken. In het bijzonder zullen we ons richten op de vraag wat de snelheid en richting van diffusie beïnvloedt.

Paragraafvraag	**Welke grootheden en omstandigheden hebben invloed op de snelheid van diffusie?**

Tekstvraag

Denk je dat er nog meer factoren van invloed zijn op de snelheid van diffusie dan de drie hiernaast? Welke?

1. Concentratie van stoffen

De *concentratie van een stof* heeft veel invloed op de verspreiding ervan. De **concentratie** is het aantal deeltjes per volume-eenheid. Als er op een bepaalde plek meer van een stof aanwezig is dan op een andere plaats (de concentratie is hoger), dan zal er een netto verplaatsing van deeltjes van de plek met een hoge concentratie naar de plek met lage concentratie zijn. Hoe groter het concentratieverschil, hoe groter deze stroom van deeltjes zal zijn. Wanneer er geen concentratieverschil is zal er geen waarneembare verspreiding zijn (let op: de deeltjes staan niet stil, maar er zullen zich evenveel deeltjes de ene als de andere kant op bewegen, waardoor de netto stroom nul wordt).

2. Temperatuur.

De beweging van moleculen in een stof heeft alles te maken met de temperatuur van de stof. We kunnen het hier wat formeler definiëren. Temperatuur is de macroscopische waarneming van een verzameling microscopische verschijnselen, nl. de spontane beweging van moleculen. Hoe groter de gemiddelde snelheid van de moleculen, des te hoger is de temperatuur van de stof.

toelichting

De Boltzmann-constante is niet zo bekend als bijvoorbeeld de lichtsnelheid.

In hoofdstuk 4 en 5 komt deze ook weer aan de orde.

Aan het einde van deze lesmodule zul je meer vertrouwd zijn met deze natuurconstante.

Temperatuur en bewegende deeltjes

$$E = k_b \cdot T$$

Symbolen: E is de gemiddelde bewegingsenergie van een molecuul. T is de waargenomen temperatuur. k_b is de constante van Boltzmann die de meetbare grootheid temperatuur verbindt met de bewegingsenergie van de afzonderlijke moleculen.

3. Deeltjesgrootte.

Bij diffusie verspreiden grote deeltjes zich langzamer dan kleine. Het gaat bij diffusie om de botsingen tussen afzonderlijke moleculen. Hoe groter een deeltje is, des te kleiner is de kans dat dit in aanraking komt met afzonderlijke moleculen. Aanraking met veel moleculen tegelijkertijd heeft geen beweging tot gevolg omdat de bewegingen van grote aantallen moleculen tegen elkaar wegvallen.

4. Eigenschap van de omgeving: Viscositeit.

De viscositeit is de stroperigheid van een stof. Hoe stroperiger een vloeistof is, des te moeilijker is het voor een deeltje om er doorheen te bewegen. De viscositeit van gassen is veel kleiner dan van vloeistoffen. De stroperigheid wordt bepaald door de krachten tussen de moleculen. Het zijn deze krachten die het onderscheid veroorzaken tussen de vloeibare fase en de gasvormige fase. Onderlinge aantrekkende krachten werken de botsingen tussen afzonderlijke moleculen tegen.

Toelichting

Viscositeit kom je minder vaak tegen dan de luchtweerstand. Het is weerstand die veel meer een rol speelt voor kleine deeltjes zoals moleculen dan voor grote voorwerpen zoals auto's en fietser in de mechanica.
In hoofdstuk 3 komt viscositeit meer uitgebreid aan de orde.

Viscositeit

$$\eta = \frac{F}{v \cdot omtrek_{molecuul}}$$

Symbolen: F is de aantrekkende kracht tussen moleculen die vrije beweging tegenwerkt (N). v is de snelheid van het molecuul ($m \cdot s^{-1}$). $omtrek_{molecuul}$ is de omtrek van het molecuul; ook die bepaalt hoe sterk het deeltje wordt afgeremd (m). η is de viscositeit ($N \cdot m \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)

Combinatie van eigenschappen 1 t/m 4

Temperatuur, deeltjesgrootte en viscositeit zijn terug te vinden in de diffusieconstante. Deze constante geeft aan hoe snel de verspreiding plaatsvindt, gegeven een bepaald concentratieverschil.

Toelichting

De diffusieconstante heeft als eenheid ($m^2 \cdot s^{-1}$). Deze eenheid is logisch wanneer je denkt aan een bol die steeds groter wordt. De oppervlakte van de bol groeit dan met een aantal ($m^2 \cdot s^{-1}$).
Deze constante geeft dus aan hoe snel een concentratie zich uitbreidt.

Diffusieconstante

$$D = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

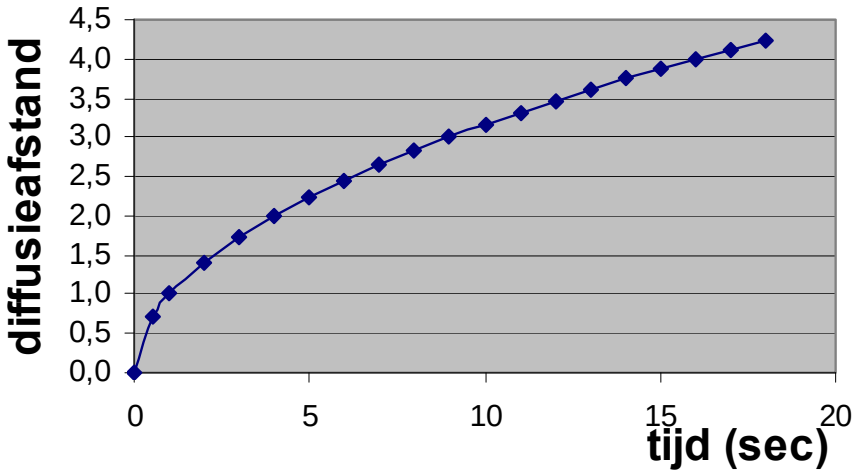
Symbolen: D is de diffusieconstante (in $m^2 \cdot s^{-1}$). k_B: Dit is de constante van Boltzmann in Joule per Kelvin ($J \cdot K^{-1}$). T is de temperatuur K. η is de viscositeit ($N \cdot m \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$) en r is de straal van het deeltje m

$$diffusiestroom = -D \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

Symbolen: *diffusiestroom* = de snelheid waarmee deeltjes zich verspreiden($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). D is de diffusieconstante in ($m^2 \cdot s^{-1}$).

$\frac{\Delta c}{\Delta x} = concentratiegradient$ ($mol \cdot m^{-3} \cdot m^{-1}$)

In de grafiek in figuur 2.3 is weergegeven hoe een stof zich verspreidt in de loop van de tijd. Tijdens het verspreiden van een stof neemt het concentratieverschil per meter voortdurend af. Daardoor neemt ook de diffusiestroom voortdurend af; het verspreiden gaat steeds langzamer. Je ziet dat aan de helling van de grafiek die steeds minder steil wordt.



Figuur 2.3 — De diffusieafstand als functie van de tijd.

Het verband dat de grafiek weergeeft is:

$$diffusieafstand = constante \cdot \sqrt{t}$$

Men vindt dit verband door statistiek toe te passen op de chaotische beweging van de moleculen, dat doen we hieronder, bij *Statistiek*.

5. Statistiek

Processen waarbij diffusie een rol speelt zijn statistisch van aard, je moet ervoor middelen over grote aantallen deeltjes. Bij 'diffusiesnelheid' moet je dan ook niet denken aan de snelheid van één, individueel deeltje, zoals je gewend was bij auto's, fietsen en losse moleculen. Het gaat erom hoe snel de concentratie van een stof, bestaande uit veel moleculen, zich uitbreidt over een bepaalde afstand.

Bij iedere gebruikelijke beweging verwacht je een snelheid: zoveel meter per seconde of kilometer per uur. Voor diffusie gaat dit niet op. Er is geen diffusiesnelheid in die zin te definii=ëren. Dat komt omdat diffusie een statistisch proces is. Wat je met je zintuigen waarneemt (de verspreiding van een stof) heeft als oorzaak: een spontane beweging van een groot aantal moleculen. Voor deze diffusie geldt de wet van de grote aantallen.

Diffusietijd

diffusieafstand, $s = constante \cdot \sqrt{t}$ Diffusietijd, $t = \dfrac{s^2}{2 \cdot D}$

Symbolen: s is de diffusieafstand in meters (m), D is de diffusieconstante in vierkante meter per seconde ($m^2 \cdot s^{-1}$) en t is de tijdsduur waarin de diffusieafstand wordt afgelegd in seconden (s).

Hieronder staan enkele voorbeelden van diffusieconstanten. Met behulp van deze voorbeelden kun je nagaan wat de invloed is op de diffusieconstante van de *deeltjesgrootte* en van de *viscositeit*.

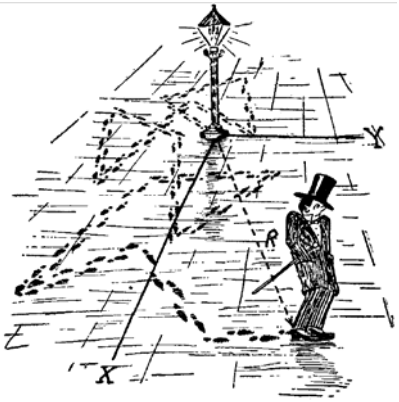
Tekstvraag

Controleer de afmetingen van de verschillende moleculen met de waarden van de diffusieconstanten en de formule voor de diffusieconstante op blz. 12.

Raadpleeg eventueel Binas, of andere bronnen om de afmetingen van de moleculen te controleren.

Diffunderende stof	diameter van het molecuul bij benadering:	Medium	D (m²/s)
O_2	0,29 nm	Lucht	$2{,}06 \cdot 10^{-5}$
Waterdamp	0,2 nm	Lucht	$2{,}56 \cdot 10^{-5}$
CO_2	0,33 nm	Lucht	$1{,}64 \cdot 10^{-5}$
O_2	0,29 nm	Water	$2{,}33 \cdot 10^{-9}$
Rode bloedcel	6 - 8 μm	Water	$6{,}9 \cdot 10^{-11}$

Maak nu de opgaven 3 t/m 11 aan het einde van dit hoofdstuk.



Figuur 2.4

Verdieping: Dronkemanswandeling

Grote aantallen stappen
De beweging van een enkel molecuul in water is voor te stellen als een zogeheten dronkemanswandeling. Stel je voor, je bekijkt een dronkaard die tegen een lantaarnpaal leunt. Plotseling besluit hij zomaar een richting uit te gaan. En hij begint te lopen (meer strompelen eigenlijk). Hij doet een paar stappen in de ene richting, dan weer een paar stappen in de andere richting. Om de paar stappen verandert hij van richting, volstrekt willekeurig (zie figuur 2.4). Hoever zal onze dronkelap van de lantaarnpaal zijn verwijderd na honderd passen te hebben gezigzagd? Je zou misschien denken dat er vanwege de volstrekte willekeur van zijn pad, er geen zinnig antwoord mogelijk is op deze vraag. Hoewel we niet kunnen zeggen *waar* de dronken figuur *precies* zal zijn aan het einde van zijn wandeling, kunnen we wel iets zeggen over de afstand tot de lantaarnpaal na een aantal stappen. Wanneer de dronkaard bijvoorbeeld 100 stappen maakt van gemiddeld 0,5 meter lang, zal hij gemiddeld $0{,}5 \cdot \sqrt{100}$ meter van de lamp verwijderd zijn. Dat is 5 meter. Dit laat zien dat het is aan te bevelen zonder drank op te gaan wandelen. Je komt dan verder!

Verdieping: statistiek en de √n-wet

De gemiddelde verplaatsing bij het doen van een groot aantal stappen in een willekeurige richting is volgens de statistiek.

$$Verwijdering = stapgrootte \cdot \sqrt{aantal\ \ stappen}$$

Het volgende voorbeeld verduidelijkt deze √n wet.
Jan en Piet doen een spelletje: dronkemanswandeling over een ***rechte lijn. Jan*** gooit 4 keer een muntje op. Kop levert een stap naar links voor Piet, Munt levert een stap naar rechts voor Piet. Na ieder spelletje (-4x gooien dus-) wordt de verplaatsing van Piet opgemeten. Er zijn 16 mogelijke uitkomsten voor dit spel. Hieronder staat de frequentieverdeling van de verschillende mogelijkheden.

Onvoorspelbaar heen en weer lopen.

Aantal stappen van de dronkemanswandeling: 4

Aantal mogelijke wandelingen: $2^4 = 16$

kkkk	kkkm	kkmm	kmmm	mmmm
	kkmk	kmmk	mkmm	
	kmkk	mmkk	mmkm	
	mkkk	kmkm	mmmk	
		mkmk		
		mkkm		

Mogelijke uitkomsten voor de verplaatsing:

	4x Kop	3x Kop	2x Kop	1x Kop	0x Kop
Frequentieverdeling	1	4	6	4	1
Stappen naar L	0	1	2	3	4
Stappen naar R	4	3	2	1	0
Verplaatsing	**-4**	**-2**	**0**	**2**	**4**
Verwijdering van beginpositie (absolute waarde van verplaatsing)	**4**	**2**	**0**	**2**	**4**

16 mogelijke wandelingen, leveren 5 mogelijke verplaatsingen met een frequentieverdeling van 1-4-6-4-1. De gemiddelde verwijdering van de beginpositie is:

$$\frac{1x\ 4 + 4x\ 2 + 6x\ 0 + 4x\ 2 + 1x\ 4}{16} = 1{,}5 \text{ meter}$$

De gemiddelde ***verplaatsing*** is uiteraard 0. Want Piet loopt even vaak naar links als naar rechts. De gemiddelde verwijdering bij 16 spelletjes is echter 1,5 m

Wanneer het aantal stappen toeneemt zal ook de gemiddelde verwijdering toenemen.

De volgende tabel geeft dat weer.

Aantal stappen van de dronkemanswandeling = n					
5	6	7	8	9	10
Aantal mogelijke wandelingen:					
$2^5=32$	$2^6=64$	$2^7=128$	$2^8=256$	$2^9=1024$	$2^{10}=2048$
Aantal mogelijkheden voor de verplaatsing					
6	7	8	9	10	11
frequentieverdeling					
1-5-10-10-5-1	1-6-20-15-6-1	1-7-21-35-35-21-7-1	1-8-28-56-7028-8-1-	Etc…	Etc..
Gemiddelde ***verplaatsing*** tijdens de wandeling					
0	0	0	0	0	0
Gemiddelde ***verwijdering van het startpunt*** tijdens de wandeling					
1,9	1,9	2,2	2,2	2,5	2,5

Wanneer het aantal stappen per dronkemanswandeling echt groot wordt is de gemiddelde verwijdering van het startpunt tijdens stapgootte $\cdot\sqrt{t}$.

2.3 Waarnemen van diffusie

Paragraafvraag	Wat merk je van diffusie in het dagelijks leven?

Diffusie waarnemen

Diffusie is een langzaam proces. In een vloeistof is dit merkbaar. Wanneer de melk in jouw koffie zich enkel door diffusie zou moeten verspreiden, zou de koffie allang koud zijn geworden tegen de tijd dat de melk genoeg verspreid is om je koffie te drinken. Je kunt dus beter even roeren. De afstand die een molecuul kan afleggen voordat het botst met een ander molecuul is in vloeistoffen betrekkelijk klein.

Figuur 2.5

Tekstvraag

Is uitsluitend diffusie verantwoordelijk voor verspreiding van stoffen?
Zo nee, welk natuurkundig principe speelt nog meer een rol bij de waargenomen verspreiding?

Wanneer je een statistische berekening gebruikt, dan blijkt dat diffusie alleen werkt op korte afstanden. Over afstanden van micrometers gaat het redelijk snel, als de afstanden ook maar een beetje groter worden gaat het al zeer traag. Een cel heeft niet in alle gevallen iets aan diffusie om stoffen te transporteren. Het onderstaande rekenvoorbeeld laat de beperkte bruikbaarheid van diffusie in het lichaam zien.

Rekenvoorbeeld – Diffusie

Vraag

ATP is een eiwitmolecuul dat de energie levert voor levensprocessen in cellen. De diffusieconstante van ATP in cytoplasma bedraagt maximaal $5{,}0 \cdot 10^{-9}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$)

a) Schat de tijd die ATP nodig heeft om de gehele cel over te steken. Neem voor de grootte van een cel 10 micrometer. Is diffusie een geschikt transportproces binnen de cel?

b) Een hemoglobinemolecuul heeft in het cytoplasma van een cel een diffusieconstante van $1{,}0 \cdot 10^{-11}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$). Bereken de tijd die hemoglobine nodig heeft om een afstand van 1 cm af te leggen (1000 maal de grootte van een cel). Wat is jouw conclusie: is diffusie een geschikt transportproces voor afstanden veel groter dan een cel?

c) Een axon is een uitloper van een neuron dat elektrische impulsen geleidt. Axonen kunnen een lengte van 1 meter bereiken. Bereken de tijd die een 200 kiloDalton eiwit (zoek de eenheid Dalton op in Binas tabel 5) met een diffusieconstante van $1{,}0 \cdot 10^{-10}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$) nodig heeft om van het cellichaam (het begin van de axon) naar het eind van de axon te diffunderen.

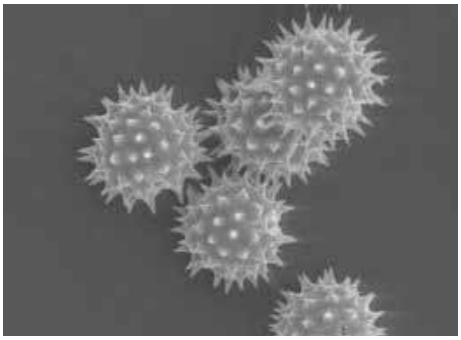
Antwoord

a) $t = \dfrac{s^2}{2D} = \dfrac{(10 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 0.15 \cdot 10^{-9}} = 0{,}33\,\text{s}$ Werkt prima!

b) $t = \dfrac{s^2}{2D} = \dfrac{(10^{-2})^2}{2 \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-11}} = 5{,}0 \cdot 10^6\,\text{s}$ = 58 dagen. Niet praktisch dus!

c) $t = \dfrac{s^2}{2D} = \dfrac{(1{,}0)^2}{2 \cdot 1{,}0 \cdot 10^{-10}} = 5{,}0 \cdot 10^9\,\text{s}$ = 158,5 jaar. Ook niet praktisch!

Het antwoord op c) laat zien dat diffusie duidelijk niet gebruikt kan worden voor het transport over afstanden groter dan een cel. In de hoofdstukken 3 en 4 zullen we bekijken hoe het transport over grotere afstand geregeld wordt in het menselijk lichaam.



Figuur 2.6 — Stuifmeelkorrels in water.

Waarnemen van diffusie

Volgens de theorie is diffusie moeilijk waarneembaar. Een paar cm afleggen duurt al snel enkele dagen. Toch kan diffusie waargenomen worden.

In 1828 keek Robert Brown door zijn microscoop naar stuifmeelkorrels in water (fig. 2.6). Hij zag dat ze in een redelijk hoog tempo op een willekeurige manier in het rond bewogen. Een kleine eeuw lang werd er hevig gedebatteerd over de processen die ten grondslag zouden liggen aan deze willekeurige beweging. Sommigen dachten aan elektrische effecten, anderen zaten een eind in de goede richting door te denken aan thermische beweging. Er was geen overeenstemming, totdat Albert Einstein in 1905 zijn artikel “Onderzoekingen aan de theorie van de Brownse beweging” publiceerde.

Hij stelde een wiskundige beschrijving voor en beschouwde de Brownse beweging van de *zichtbare* stuifmeelkorrels als een indirect bewijs voor het bestaan van de *onzichtbare* atomen en moleculen.

Tekstvraag

Vergelijk de verspreiding van stuifmeelkorrels met de verspreiding van moleculen die veel kleiner zijn.

Welke van de twee verspreiden zich in de kortste tijd?

Stuifmeelkorrels en moleculen

De stuifmeelkorrels die de botanicus Robert Brown zag door zijn microscoop zijn klein genoeg om onder invloed te staan van afzonderlijke moleculen. De stuifmeelkorrels worden voortdurend alle kanten opgeduwd door moleculen die hun willekeurige thermische beweging aan het uitvoeren zijn. Hierdoor worden de stuifmeelkorrels gedwongen in zigzagpatronen te bewegen, net als de moleculen. Wanneer er op een plaats een opeenhoping is van stuifmeelkorrels, zullen deze zich vanzelf gaan verspreiden. De afstand tot het gebiedje waarin de korrels zich oorspronkelijk bevonden zal evenredig zijn met de wortel van het tijdsinterval.

Diffusie en fasen

In elke fase is materie onderhevig aan diffusie. In gassen verloopt diffusie het snelst. Een gasdeeltje kan een relatief grote afstand afleggen voordat het botst met een ander deeltje. Diffusie in een vloeistof verloopt langzamer, de deeltjes kunnen minder vrij bewegen. Diffusie is zelfs mogelijk in vaste stoffen. De krachten tussen de moleculen zijn daar zo groot dat de moleculen zelden van positie wisselen, maar het gebeurt wel. Ook de deeltjes in het kristalrooster van vaste stoffen staan niet stil. Zo kan goud bewegen in lood door diffusie. Dit is bij kamertemperatuur een zeer langzaam proces. Een ander voorbeeld is dichter bij huis. Wanneer de leraar met een krijtje op het bord heeft geschreven en dit een paar dagen laat staan, dan zal hij merken dat het bord moeilijk is schoon te maken: een deel van de kalk is in het oppervlak van het bord gediffundeerd.

Algemeen kunnen we stellen dat diffusie in gassen sneller verloopt dan diffusie in vloeistoffen en dat diffusie in vloeistoffen weer sneller verloopt dan diffusie in vaste stoffen. De afstand die door diffusie wordt afgelegd is wel steeds evenredig met de wortel van het tijdsinterval.

Begrippen

Diffusie
Concentratie
Bewegingsenergie van moleculen
Constante van Boltzmann
Brownse beweging
Concentratieverschil
Diffusieafstand
Diffusietijd
Beweging op microscopische schaal
Verspreiding op macroscopische schaal

Samenvatting

Alle deeltjes zijn in voortdurende (thermische) beweging. Deze beweging ligt ten grondslag aan het proces diffusie. De **concentratie** is het aantal deeltjes per volume-eenheid. De verspreiding van deeltjes ten gevolge van een concentratieverschil noemen we **diffusie**. Diffusie is dus de beweging van deeltjes van een gebied met hoge concentratie naar een gebied met een lage concentratie.

De ***diffusietijd*** neemt af als het concentratieverschil of de temperatuur toeneemt: diffusie gaat dan dus sneller. De ***diffusietijd*** neemt toe als de deeltjesgrootte of de viscositeit toeneemt: diffusie gaat dan dus langzamer. In vloeistof is de diffusie daarom ***trager dan in gassen.***

Doordat diffusie een langzaam proces is, is het een transportverschijnsel over korte afstanden. Bijvoorbeeld voor de beweging van deeltjes binnen cellen. De afstand die door diffusie wordt afgelegd zal steeds evenredig zijn met de wortel van het tijdsinterval.

Maak nu de opgaven 12 t/m 20 aan het einde van dit hoofdstuk.

Brug naar de volgende paragraaf: moleculaire machines

Er is niet alleen spontane beweging in cellen. Er is wel degelijk ook gerichte beweging. Dat is beweging van grote aantallen deeltjes die alle dezelfde kant op gaan, bijvoorbeeld langs draden (Hoofdstuk 3). Er is ook beweging van deeltjes van grote aantallen deeltjes van een lage concentratie naar een hoge concentratie. Dergelijke georganiseerde bewegingen worden in levende cellen mogelijk gemaakt door zgn. *nanomotoren*, dat zijn moleculen die een gerichte beweging kunnen maken en daarbij onderdelen meeslepen.

In hoofdstuk 3 onderzoeken we de volgende vragen.

- Waartoe dienen nanomotoren in het lichaam?
- Wat is allemaal nodig om een nanomotor te laten werken?
- Hoe kom je er achter hoe zo'n nanomotor werkt?

Opgaven

bij par. 2.2

3

Kies de juiste uitspraak en geef aan wat er onjuist is aan de andere uitspraak.

a. "Tijdens diffusie zullen deeltjes *over het algemeen* bewegen van een gebied met hoge concentratie naar een met lage concentratie."

b. "Tijdens diffusie zal elk deeltje bewegen van een gebied met hoge concentratie naar een met lage concentratie."

4

Beargumenteer welke van onderstaande uitspraken de meest zorgvuldige is en geef aan wat er onjuist of verwarrend is aan de overige uitspraken.

a. "Deeltjes bewegen van een gebied met hoge naar een gebied met lage concentratie, omdat er teveel deeltjes in een gedeelte bij elkaar zitten. Zij zullen dus naar een gedeelte bewegen waar meer ruimte is."

b. "Deeltjes bewegen van een gebied met hoge naar een gebied met lage concentratie, omdat de deeltjes in gebieden met hoge concentratie een grotere kans hebben om te botsen in de richting van een gebied met lage concentratie dan omgekeerd."

c. "Deeltjes bewegen van een gebied met hoge naar een gebied met lage concentratie, omdat de deeltjes net zolang bewegen totdat het concentratieverschil is opgeheven. Als dat is gebeurd, stoppen ze met bewegen.

d. "Deeltjes bewegen van een gebied met hoge naar een gebied met lage concentratie, omdat er in een gedeelte met een hoge concentratie een grotere kans is dat de deeltjes elkaar afstoten.

5

Kies de juiste uitspraak en geef aan wat er onjuist is aan de foute uitspraken.

e. "Als het concentratieverschil tussen twee gebieden toeneemt, zal de diffusiesnelheid toenemen, omdat er meer ruimte voor de deeltjes is om te bewegen."

f. “Als het concentratieverschil tussen twee gebieden toeneemt, zal de diffusiesnelheid afnemen, omdat als de concentratie hoog genoeg is, de deeltjes zich minder snel zullen verspreiden en de diffusiesnelheid daardoor zal afnemen.”
g. “Als het concentratieverschil tussen twee gebieden toeneemt, zal de diffusiesnelheid toenemen, omdat er een grotere kans is op willekeurige beweging naar andere gebieden.”

6

We voegen een druppel blauwe kleurstof in een bak met water. Na een aantal uren kleurt de gehele bak blauw. Over de kleurstofmoleculen op dat moment wordt een aantal uitspraken gedaan. Kies de juiste uitspraak en geef aan wat er onjuist is aan de overige uitspraken.

a. “De kleurstofmoleculen zijn opgehouden met bewegen, want de gehele bak kleurt blauw; als de kleurstofmoleculen nog steeds zouden bewegen, zouden er verschillende blauwtinten zichtbaar zijn.”
b. “De kleurstofmoleculen voeren nog steeds hun willekeurige beweging uit, als de kleurstofmoleculen zouden zijn gestopt, zouden zij naar de bodem van de bak zijn gezakt”
c. “De kleurstofmoleculen voeren nog steeds hun willekeurige beweging uit, omdat moleculen altijd in beweging zijn.”
d. “De kleurstofmoleculen voeren nog steeds hun willekeurige beweging uit, omdat dit een vloeistof is, als het een vaste stof zou zijn, zouden de moleculen zijn opgehouden met bewegen.”

7

We hebben twee bekers met eenzelfde hoeveelheid water, maar beker 1 heeft een temperatuur van 25°C en beker 2 een temperatuur van 35°C. Aan beide bekers wordt een druppel groene kleurstof toegevoegd. Het water zal na enige tijd lichtgroen gaan kleuren. Op de vraag welke beker het eerste lichtgroen zal kleuren, staat een aantal antwoorden geformuleerd. Kies het juiste antwoord en geef aan wat er onjuist is aan de andere antwoorden.

a. “Beker 1, want de lagere temperatuur breekt de kleurstof af.”
b. “Beker 2, want de kleurstofmoleculen bewegen sneller bij een hogere temperatuur.”
c. “Beker 2, want de moleculen zullen uitzetten”

8 Eigen woorden

a. Beschrijf in jouw eigen woorden wat het begrip diffusie inhoudt.
b. Beschrijf in jouw eigen woorden wat er gebeurt met een individueel deeltje dat begint in een gebied met een relatief hoge concentratie.

9 Temperatuur en diffusie

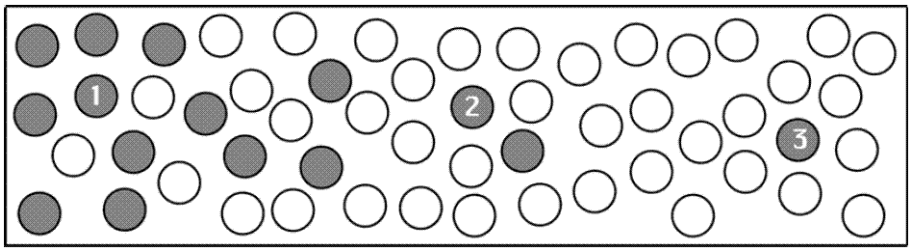
a. Leg uit zonder gebruik te maken van formules dat diffusie sneller verloopt wanneer de temperatuur toeneemt.

In de praktijk blijkt de invloed van temperatuur op diffusie veel groter dan je zou verwachten volgens de formule voor de diffusieconstante. De temperatuur is in Kelvin en van 273 K naar 293K is in verhouding maar een klein verschil.

b. Leg uit m.b.v. de formule voor de diffusieconstante op welke manier de temperatuur nog de diffusie kan vergroten.

10 Foto

Stel je voor dat figuur 2.7 een foto is van moleculen op een bepaald moment. Op de foto zien we een buis. Vanaf links diffunderen de grijs getekende moleculen in het water. Teken voor het moment net na de foto pijlen die de richtingen aangeven waarin de genummerde moleculen naar alle waarschijnlijkheid zullen gaan bewegen.



Figuur 2.7

11 Random Walk

In de EXTRA STOF aan het einde van paragraaf 1 staat een voorbeeld van een zogenaamde Random Walk. Extra of niet: het is leuk om hier mee te experimenteren.

a. Open de activiteit *1D-Random walk* die je kunt vinden via www.natuurkunde.nl/nina → *Leven en natuurkunde*. Laat de simulatie een aantal keren lopen, en beantwoord de volgende vraag: Wat is de gemiddelde verplaatsing?

b. Wat is het verschil tussen de gemiddelde *verplaatsing* en de gemiddelde *verspreiding*?

c. Om het antwoord van vraag b te onderzoeken kun je met Coach een nieuwe grootheid aanmaken: Het kwadraat van de verplaatsing. Maak met hulp van je docent een nieuwe tabel aan en laat de simulatie opnieuw een aantal keren lopen. Wat is de gemiddelde verspreiding?

d. Het is illustratief om de tijd in het programma te variëren. Doe dat en controleer of een lange tijdsduur van de simulatie een ander resultaat oplevert.

e. Dezelfde vragen kun je beantwoorden met de activiteit *2D-Random walk*.

bij par. 2.3

12 Doorzichtige buis

Een doorzichtige horizontale buis is gevuld met water. Het lukt je een druppel kleurstof in het water te krijgen aan de linkerkant van de buis.

a. Wat gebeurt er met de kleur van het water in de buis naarmate de tijd verstrijkt?

b. Het midden van de buis gaat kleuren na een minuut. We veronderstellen dat de temperatuur gelijk blijft. Hoe lang zal het dan duren voordat de rechterkant van de buis gaat kleuren?

- Minder dan een minuut.
- Ongeveer een minuut.
- Meer dan een minuut.
- Dat hangt van de temperatuur af.

Leg je antwoord uit.

Figuur 2.8

13 Tomaat in water

In figuur 2.8 zie je een tomaat die in een bak met zout water is gebracht. De hoeveelheden water en zout in de tomaat en in het water staan aangegeven. We nemen aan dat er water door het vlies de tomaat in kan. Zouten kunnen niet door het vlies van de tomaat naar binnen.

a. Zal de tomaat naarmate de tijd verstrijkt in grootte toenemen, in grote afnemen, of niet in grootte veranderen? Leg je antwoord uit.

Neem aan dat de tomaat kan veranderen van grootte, als de watermoleculen binnendringen, of de tomaat verlaten. We houden de zoutconcentratie van het water in de bak constant.

b. Hoeveel mol water zal zich in de tomaat bevinden na lange tijd?

- 400 mol water.
- 40 mol water.
- 10 mol water.
- 8 mol water.
- Onmogelijk te beantwoorden.

Leg uit hoe je aan jouw antwoord gekomen bent.

14 Analogie

Wat zou je waarnemen als je een tafeltennisballetje tussen door elkaar krioelende mieren zou leggen?

15 Diffusie

De diffusieconstante van tafelsuiker in water bedraagt $4{,}0 \cdot 10^{-10}\, m^2 s^{-1}$.

a. Bereken de tijd die een suikermolecuul nodig heeft om een afstand van 5 cm af te leggen.

b. Hoe ver komt het suikermolecuul in 1 minuut.

16 Parfum

Je opent een flesje parfum aan een kant van de kamer.

a. Bereken hoelang het duurt voordat iemand aan de andere kant van de kamer het parfum begint te ruiken. Gebruik daarbij een schatitng van de grootte van de kamer. Neem voor de diffusieconstante een waarde uit de tabellen hierboven (kies zelf een stof die je in parfum tegen zou kunnen komen).
b. Denk je dat het parfum alleen maar door diffusie wordt getransporteerd?

17 Brownse beweging waarnemen

Als een object kleiner is dan de halve golflengte van het licht waarmee je het waarneemt, kun je het niet meer zien.

a. In welk golflengtegebied ligt het zichtbare licht?
b. Wat zijn de kleinste objecten die je dus met een lichtmicroscoop kan waarnemen? Zijn stuifmeelkorrels, met een diameter van ongeveer 100 μm, waar te nemen met een lichtmicroscoop?

18 Verbeter je inzicht over diffusie...

a. Koolstof diffundeert redelijk snel bij 100 °C, terwijl chroom dit niet doet. Verklaar het verschil.
b. Is toevoer van energie nodig voor diffusie?
c. Er zijn twee manieren om over diffusie te praten:

- De "netto" –diffusie van een groot aantal deeltjes
- De diffusie van een individueel deeltje

Bespreek de verschillen en overeenkomsten tussen deze twee standpunten.

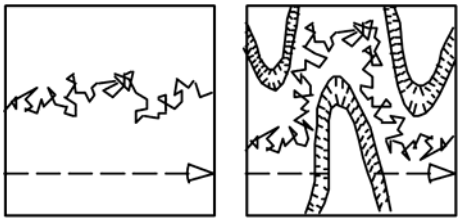
d. Leg uit dat diffusie sneller verloopt in een gas dan in een vloeistof en weer sneller in een vloeistof dan in een vaste stof
e. Verklaar de volgende observatie: de geur van heet, nog nagarend eten, bereikt ons zelfs over betrekkelijk grote afstand, maar om koud eten te ruiken, moeten we er dicht bij in de buurt zijn,
f. Geef een voorbeeld van diffusie...

- In een gas
- In een vloeistof
- In een vaste stof

Diffusie: een cel kan niet zonder

Diffusie is een van de belangrijkste vormen van transport in de cel. Bijna alle kleine moleculen - zoals water, maar ook de brandstof ATP en de signaalstof calcium - vinden hun weg naar de uithoeken van de cel door diffusie.

Het is behoorlijk vol in de cel. Tal van eiwitstructuren maken dat er een geringe hoeveelheid "vrij water" aanwezig is in de cel. Door deze beperkte hoeveelheid vrij water is een kleine verandering van de waterinhoud van de cel voldoende om grote effecten op de effectieve diffusiesnelheden te hebben. Die eiwitten zitten ook nog in allerlei kronkels opgevouwen, waardoor de effectieve afstand waarover stoffen moeten worden getransporteerd behoorlijk groter worden (zie figuur 2.9).



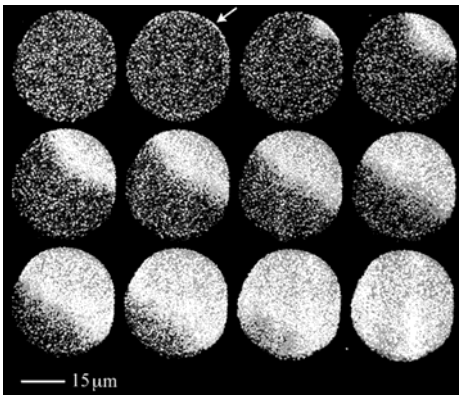
Figuur 2.9

Het netwerk van eiwitstructuren in de cel, het *cytoskelet*, neemt 16-20% van het volume van een dierlijke cel in. Dit cytoskelet fungeert als een zeef voor grote moleculen. Moleculen groter dan 10^{-8} m in diameter komen er niet doorheen. Alle bekende eiwitten zijn veel kleiner.

19 De bruikbaarheid van diffusie

a. Een hemoglobinemolecuul (levert zuurstof aan de cel voor verbranding) heeft in waterige omgeving een diffusieconstante van maximaal $7{,}0 \cdot 10^{-11}$ m²·s⁻¹. Bereken de tijd die hemoglobine nodig heeft om een afstand van 1 cm af te leggen. Wat is jouw conclusie: is diffusie een geschikt transproces voor afstanden veel groter dan een cel?

b. Waarom staat er "maximaal" bij de waarden van de diffusieconstante (lees de toelichting boven deze opgave).



Figuur 2.10 — Filmbeeldjes van de verspreiding van calcium in een cel.

20 Snelheid van de Calciumgolf.

Calcium is een klein, tweewaardig positief geladen ion. Het kan niet eenvoudig door het celmembraan heen, maar eenmaal in het cytoplasma ondervindt het nauwelijks belemmeringen in de beweging. De diffusiesnelheid is hoog en de cytoskelet-filamenten vormen geen obstakel.

a. Bereken de tijd die de calciumgolf nodig heeft om de cel over te steken m.b.v. de filmopname in fig 2.10. (5 beeldjes per seconde).

b. Bereken de grootte van de diffusieconstante m.b.v. de formule voor de diffusietijd.

Wanneer de molecuulgrootte en de nodige gegevens over de vloeistof bekend zijn, kunnen we de diffusieconstante berekenen voor dit molecuul (of voor deze stof). Vaker gebeurt het omgekeerde. De grootte van het molecuul wordt berekend aan de hand van experimenteel bepaalde waarden van de diffusieconstante, door de formule om te schrijven. $r = \dfrac{k_B \cdot T_1}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D}$

c. Bereken de grootte van de Calcium moleculen in het zeester-ei.

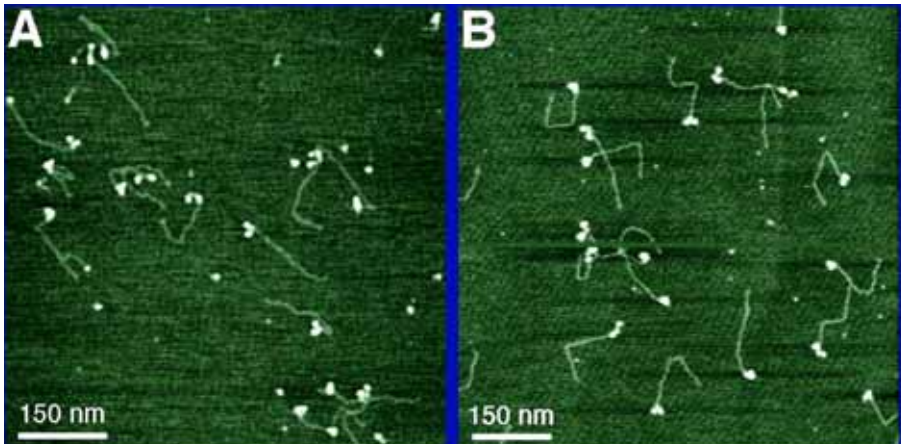
3 Nanomotoren

Gerichte beweging

Hoofdstukvraag	**Wat is er bekend over gerichte beweging in het menselijk lichaam?**

Diffusie is het resultaat van de chaotische beweging van moleculen. Een dergelijke beweging zou dus nooit tot een gecoördineerde beweging in één bepaalde richting kunnen leiden.

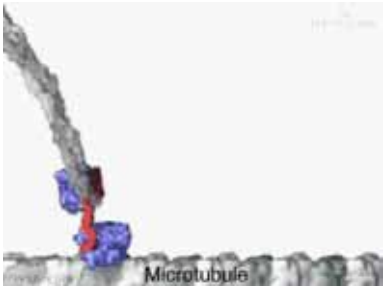
Tegen het einde van de 20e eeuw werden voor het eerst speciale eiwitten uit levende cellen geïsoleerd, die voor gericht transport verantwoordelijk zijn. Deze zogenaamde kinesine moleculen zien eruit als een soort nanowandelaars die langs lange eiwit draden (microtubuli genaamd) in een goed bepaalde richting lopen. Deze moleculen zijn bovendien in staat krachten uit te oefenen (om bijvoorbeeld hun vracht mee te kunnen slepen).



Figuur 3.1 —Diffusie.

Centrale vragen in dit hoofdstuk:

- Welke rol spelen nanomotoren in het lichaam?
- Welke natuurwetten spelen een rol bij de werking van de nanomotor?
- Hoe kom je er achter hoe deze nanomotor werkt?



Figuur 3.2 — Een wandelend molecuul

3.1 Noodzaak voor gerichte beweging

Paragraafvraag	Welke rol spelen nanomotoren in het lichaam?

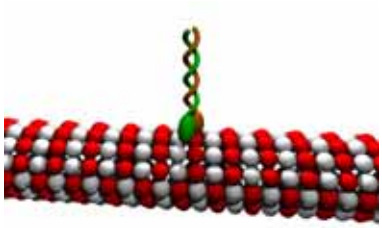
Tekstvragen

Welke drie eisen kunnen niet worden ingewilligd met het diffusie proces?

Welke twee aanvullende mechanismes zijn er daarom in het menselijk lichaam?

Spierwerking

Een spier kan onmogelijk zijn werk doen als er geen gecoördineerde beweging is van moleculen. Bij het lopen zet je voet moet zich af tegen de weg, en dan ook nog in de goede richting. In de spier heb je moleculen nodig die krachten kunnen bundelen en kunnen overbrengen op het skelet.



Vaste structuren in cellen zijn net zo belangrijk als de nanomotoren. In een levende cel bevinden zich inderdaad structuren waartegen de stappende moleculen zich kunnen afzetten (nanotubuli).

Figuur 3.3 — Een molecuul dat kan wandelen heeft daar een spoor voor nodig, een nanotubulus.

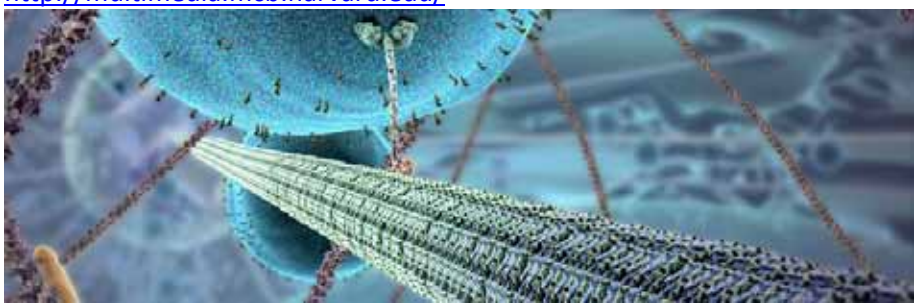
Bouwstoffen

Het skelet brengt ons op het volgende: de bouw van het lichaam noodzaakt tot transport van grotere structuren. Het is niet mogelijk dat deze grote structuren door diffusie op de juiste plaats terecht komen. Moleculaire machines verzorgen deze taak in de cel. Een reconstronstrucitie van microscopische opnames kun je vinden op de volgende website:

Internet.

The inner life of cells.

http://multimedia.mcb.harvard.edu/



Gewenste Snelheid

Bouwstoffen en voedingsstoffen moeten tijdig op de juiste plekt in het lichaam aanwezig zijn. Het hart is een relatief grote machine die zorgt voor snel transport van zuurstof en voedingsstoffen door het lichaam. Ook binnen cellen is het transport via diffusie soms te traag. Het lichaam heeft daar andere mechanismes voor nodig.

3.2 Stappende eiwitten

Paragraafvraag	Welke natuurwetten spelen een rol bij de nanomotor?

Energieomzetting

Bij de temperatuurbeweging van deeltjes bewegen de verschillende deeltjes in een stof in alle mogelijke richtingen. Dat levert geen gerichte beweging van de stof als geheel op. Voor gerichte beweging is een ander mechanisme dan de temperatuurbeweging nodig. Uit de macrowereld kennen we de *motor* als een apparaat dat een voorwerp een gerichte beweging kan geven. In de nanowereld bestaat zoiets ook, in de vorm van eiwitten die een gerichte beweging kunnen uitvoeren. Die eiwitten worden nanomotoren genoemd. En net zoals voor grote-schaalmotoren als in auto's een energiebron nodig is voor de bewegingsenergie van het bewegende voorwerp, zo is dat ook nodig voor moleculaire motoren.

Energie-opmzetting in moleculaire motoren zoals kinesine gebeurt door de omzetting van ATP moleculen. Hierdoor kunnen de nanomotoren door de cel bewegen. Voor elk ATP molecuul dat het omzet kan kinesine een stap zetten van 8 nm. De motor kan dergelijke stappen doen met een frequentie van ongeveer 100 Hz. (Hoe deze gegevens bepaald zijn staat in §3.3).

Extra - ATP

ATP is een eiwitmolecuul dat in de cel wordt gemaakt.

ATP bevat chemische energie. Bij de omzettting van 1 ATP molecuul komt een energie vrij van $8 \cdot 10^{-20}$ J.

Bij iedere stap die een nanomotor zet wordt zo'n ATP molecuul omgezet.

Snelheid

Omdat de stapgrootte en de stapfrequentie van de nanomotor bekend zijn kun je uitrekenen met welke snelheid deze door het lichaam beweegt. Hieronder staat een voorbeeld.

Rekenvoorbeeld

Vraag

a) Hoe lang doet een kinesinemolecuul er over doet om de overkant van een 'normale' cel (van enkele tientallen micrometer) te bereiken?
b) En als het om signalen gaat die zenuwcellen van je hersenen naar spiercellen moeten overdragen?
c) Bereken ook voor beide cellen de tijd die je nodig hebt om via diffusie de afstand af te leggen. (neem voor de diffusieconstante van kinesine 10^{-10} m^2/s^{-1}). Zie hoofdstuk 2.

Uitwerking

a) Snelheid is stapgrootte x stapfrequentie = 8 nm x 100 s^{-1} = 800 nm/s of 0,8 µm/s.
$t=s/v$. Voor een normale cel, van zeg 40 µm in diameter, doet een kinesinemolecuul er dus 40/0,8 = 50 seconde over.

b) Voor een zenuwcel van 1 m lengte gaat het om een tijd van 1.000.000/0.8 = 1.250.000 seconden. Dit is ongeveer 21.000 minuten, ofwel 350 uur, ongeveer 15 dagen! Voor grondstoffen die de zenuwcel aan het uiteinde nodig

heeft en die in blaasjes door kinesine vervoerd worden, is dit te doen. Voor hersensignalen uiteraard niet.

c) Voor dezelfde afstanden via diffusie geldt: $t = s^2/2D$. Dus voor een normale cel geldt $t=(40\ 10^{-6})^2/2\cdot10^{-10}=8$ s; voor een zenuwcel is $t=158{,}5$ jaar. Dus binnen een normale cel wint diffusie net (eigenlijk zijn beide processen vergelijkbaar), maar voor een zenuwcel is diffusie duidelijk geen alternatief!

Niet ieder levensproces vraagt dezelfde snelheid. Het transporteren van bouwstoffen in een cel binnen enkele seconden kan acceptabel zijn, terwijl een dergelijke snelheid van enkele micrometers per seconde voor signaaltransport volstrekt ontoereikend is.

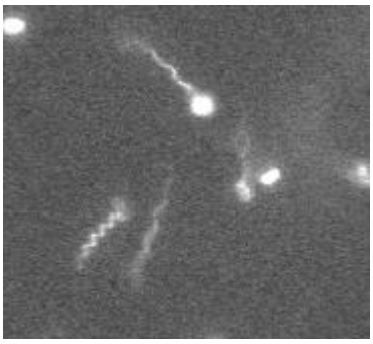
De beweging van je benen en armen kan makkelijk een snelheid halen van 10 m/s terwijl dit niet betekent dat de nanomotoren met deze snelheid moeten wandelen. De manier waarop deze nanomotoren samenwerken bepaalt de snelheid van de spier als geheel.

Door motoren *in serie* te schakelen kunnen hoge *snelheden* bereikt worden en door ze *parallel* te schakelen kunnen grote *krachten* voortgebracht worden. Serie- en parallelschakeling samen bepalen het maximale vermogen van een spier.

Maak nu de opgave 21 aan het einde van dit hoofdstuk.

Het is moeilijk zwemmen in viskeuze vloeistof

Bewegen in vloeistof gaat niet vanzelf. Wanneer je zwemt moet je vloeistof voor je uitduwen. De weerstand die je ondervindt door verplaatsing van de moleculen om je heen is in de mechanica bekend. Je kent hem al als luchtweerstand, en in vloeistoffen geldt deze weerstand ook. We spreken van **trage weerstand**. Het is de weerstand van de trage massa in de omgeving die je in beweging moet brengen alvorens de materie in de omgeving voor je gaat wijken.



Figuur 3.4
Bewegende bacteriën met een zwemstaartje

In vloeistoffen is een tweede weerstandskracht merkbaar door de aantrekkende krachten tussen moleculen. Een vloeistof verzet zich tegen vervorming; we noemen dat **viscositeit**. De wrijving die een deeltje ondervindt ten gevolge van deze viscositeit noemen we **viskeuze wrijving**.

Voor kleine bewegertjes in vloeistof (zoals de bacteriën in figuur 3.4) heeft de viscositeit een grote invloed. Zwembewegingen hebben geen zin; door de grote viskeuze weerstand kunnen zij zich niet afzetten tegen de omringende vloeistof. Bacteriën *schroeven* zich daarom door het water in plaats van zich af te zetten met voeten of vinnen zoals mensen en vissen dat doen. Wanneer het zwemmertje stopt actief te bewegen, houdt de beweging onmiddellijk op. Uitdrijven is er niet bij. De snelheid neemt veel abrupter af dan je met je eigen zwemervaring zou verwachten.

Stapbewegingen

Nanomotoren in cellen kunnen zich evenmin afzetten tegen de omringende vloeistof en maken daarom stapbewegingen langs een microtubulus.

Wanneer een zwemmertje een eenvoudige vorm heeft zoals een ellipsoïde (dat is een soort sigaar, een langgerekte regelmatige vorm zonder scherpe hoeken, zie fig. 3.5), dan is de viskeuze weerstand eenvoudig uit te rekenen.

Hieronder staan de grootheden die viscositeit bepalen op een rijtje.

Tekstvragen

- Waarom stopt een bacterie als zijn "aandrijving" ophoudt?
- Waarom hebben bacteriën veel meer last van viscositeit dan zwemmers?

Viskeuze weerstand

Voor viskeuze weerstand geldt de volgende formule:

$$F_w = f \cdot v$$

Voor een ellipsoïde bedraagt de constante:

$$f = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r$$

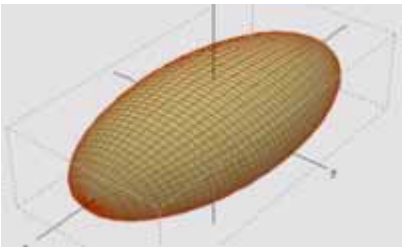
r is de grootste straal van het object (m). η is de viscositeit (Pa•s). *v* is de snelheid van het deeltje (m/s).

Voor een bolvormig object is de constante tweemaal zo groot:

$$f = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r$$

waarbij *r* nu simpelweg de straat van de bol is.

Er zijn twee belangrijk verschillen tussen viskeuze weerstand en trage weerstand
1. Viskeuze weerstand is evenredig met *v* en trage weerstand is evenredig met v^2.
2. Viskeuze weerstand is evenredig met de straal *r* en de trage weerstand is evenredig met het frontaal-oppervlak.
Conclusie: viskeuze weerstand overheerst bij kleine deeltjes. Trage weerstand overheerst bij grote deeltjes en voorwerpen.



Figuur3.5 — Een ellipsoïde.

De invloed van de trage weerstand overheerst de viskeuze weerstand meer naarmate de diameter van een voorwerp groter wordt en naarmate zijn snelheid ten opzichte van de omringende vloeistof groter wordt.

Rekenvoorbeeld

Na hoeveel meter komt een zwemster door viscositeit tot stilstand?We kiezen een beginsnelheid van 1 m/s en een massa van 80 kg.
Volgens de 2e wet van Newton is de vertraging die de zwemster ondervindt gelijk aan de kracht die 'tegenwerkt', gedeeld door de massa: $a = \frac{F_w}{m}$.
De zwemster vereenvoudigen we voor het gemak tot een ellipsoïde, de viskeuze weerstand kunnen we dan uitrekenen: $F_w \approx 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$.
Waarbij *r* de grootste straal is (≈1 m, een mens is ongeveer 2 meter lang) en η de viscositeit (voor water $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ Pa•s). Samengevat:

$$F_w = 3 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1 \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ N.}$$

Voor het gemak nemen we aan dat de tegenwerkende kracht die de zwemster ondervindt constant is en gelijk aan de wrijving bij haar beginsnelheid, dus: $F_w \approx 10^{-2}$ N, en de constante vertraging is:

$a = \frac{F}{m} = \frac{10^{-2}}{80} = 0{,}00125\,\text{m/s}^2$. Voor de afgelegde afstand bij eenparig vertraagde beweging geldt: $s = \frac{v^2}{2a}$; waarbij v de beginsnelheid is, dus de afstand die de zwemster doordrijft is: s = 400m.

In werkelijkheid sta je veel eerder stil dan in het voorbeeld. Dat komt door de traagheid van het water dat je moet verplaatsen. De weerstandskracht wordt voornamelijk daardoor bepaald. Dit is vergelijkbaar met de luchtweerstand bij fietsen etc.
Voor een zwemmer met menselijke afmetingen speelt de viskeuze wrijving nauwelijks een rol.

Maak nu de opgave 22 t/m 25 aan het einde van dit hoofdstuk.

Begrippen

Moleculaire machine of Nanomotor:

Geleide beweging of gerichte beweging.

Stapgrootte en stapfrequentie bepalen snelheid

Viscositeit en viskeuze weerstand maken geleide beweging noodzakelijk.

Omzetting van ATP levert de noodzakelijke arbeid.

Samenvatting

Uit het rekenvoorbeeld in paragraaf 31 blijkt dat waar transport via diffusie veel te langzaam is, transport via ***nanomotoren*** naar het uiteinde van een zenuwcel wel op een redelijke tijdschaal kan plaatsvinden (dit duurt enkele dagen). Deze snelheid is groot genoeg voor de aanvoer van grondstoffen die nodig zijn om de uiteinden van de cel in leven te houden.

Bij kleine deeltjes in waterige omgeving is de viskeuze weerstand erg groot. Vooral bij lage snelheden. Deze deeltjes kunnen zich onmogelijk afzetten tegen de omringende vloeistof zoals een zwemmer dat doet. ***Kinesine***moleculen maken daarom ***stapbewegingen.***

In spiercellen werken nanomotoren samen om snelheden en krachten te genereren die op macroscopisch niveau voor de werking van spieren relevant zijn. Door motoren ***in serie*** te schakelen kunnen hoge ***snelheden*** bereikt worden en door ze ***parallel*** te schakelen kunnen grote ***krachten*** voortgebracht worden. Serie en parallel schakeling samen bepalen het maximale vermogen van een spier.

3.3 Inzoomen op de levende cel

Paragraafvraag	Met welke technieken kun je de beweging van nanomotoren onderzoeken?

De gehele paragraaf is extra stof.

Het zijn onder andere natuurkundige technieken die het mogelijk hebben gemaakt om moleculaire machines te ontdekken. Nog steeds wordt er veel onderzoek gedaan naar het ontstaan en de groei van microtubuli en naar de beweging van de nanomotoren. Hieronder staat een overzicht.

Internet

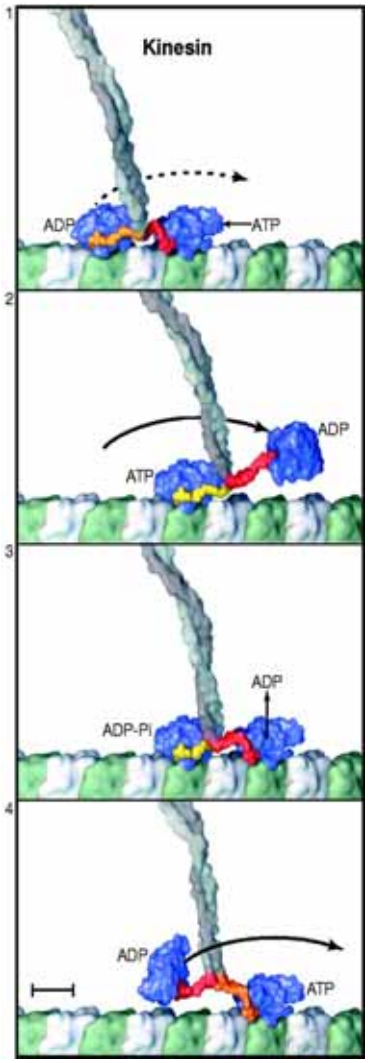
Op de volgende link zie je hoe het motoreiwit kinesine zich voortbeweegt:

http://nl.youtube.com/watch?v=686qX5yzksU

Extra – Nanotechnieken

Moleculen in actie

Figuur 3.6 toont snapshots van een filmpje. Dit filmpje reconstrueert een kinesine molecuul dat langs een microtubulus loopt. Het filmpje vat veel van de kennis samen die over de structuur en beweging van dit molecuul bestaat. Het is niet eenvoudig om alle informatie te vergaren die nodig is om het te kunnen maken. Probleem is dat deze nano-wandelaars veel te klein zijn om met gewone lichtmiscroscopie in actie te zien. Dit heeft te maken met de resolutie van deze optische techniek (zie de 'review' over miscrosopie hieronder). Dat het toch mogelijk is om de 8 nm-stapjes van een enkel kinesine molecuul zichtbaar te maken is te danken aan technieken die op een slimme manier de optische resolutie van een lichtmicroscoop omzeilen.



Figuur 3.6 — Beweging van een kinesine molecuul. Reconstructie van een filmopname.

Extra: Optisch Pincet

Het wandelen van een enkele nanomachine kan niet met de elektronenmicroscoop worden bestudeerd. Het preparaat moet voor deze microscoop gefixeerd worden en bewegingen zijn niet mogelijk. Daarom zijn speciale technieken met de lichtmicroscoop ontwikkeld. Sindsdien is veel kennis vergaard over de bewegingen van enkele kinesine moleculen en andere nanomotoren (zoals myosine moleculen die verantwoordelijk zijn voor het samentrekken van spieren).

Optisch pincet
Met deze techniek wordt gebruik gemaakt van laserlicht om eiwitmoleculen die aan een microscopisch klein glazen bolletje vast zitten vast te pakken. De geringste beweging van het eiwitmolecuul kan dan via de beweging van het (veel grotere) bolletje worden waargenomen –dit geeft een verstoring van de laserbundels. Hierdoor is het mogelijk verplaatsingen van enkele nanometers waar te nemen (terwijl details van enkele nanometers met zichtbaar licht niet waar te nemen zijn) Het is ook mogelijk om krachten te meten die door de eiwitten worden uitgeoefend als ze door de "optisch pincet" worden vastgehouden.

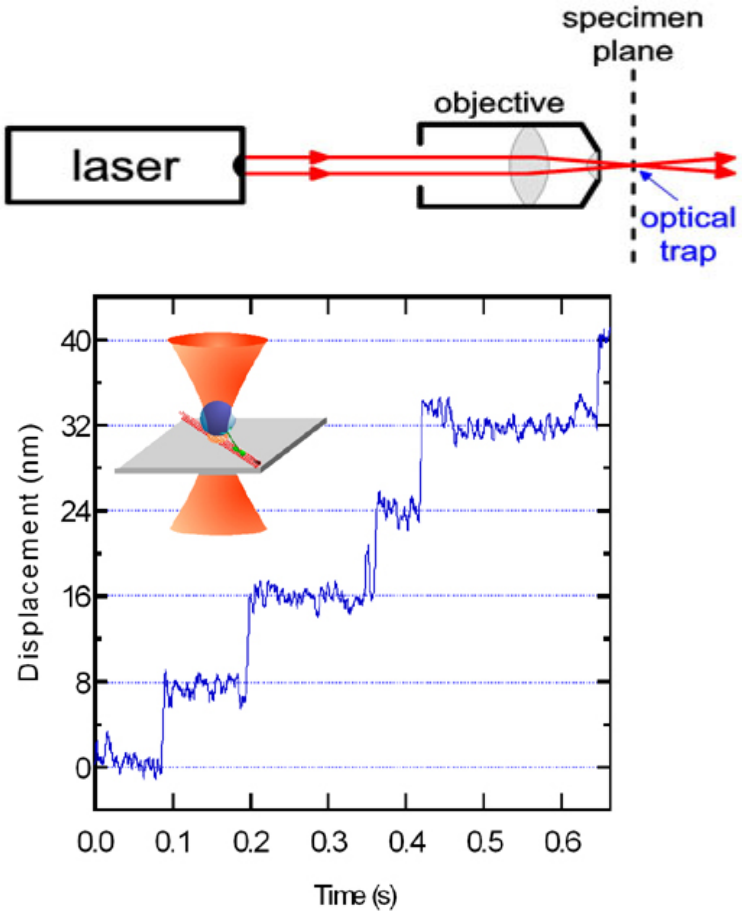
Onderzoek

De afbeeldingen in figuur 3.7 zijn afkomstig uit onderzoekswerk van Steve Block. Een zeer vereenvoudige weergave van een optisch pincet.

Daaronder is te zien hoe stappen met een grootte van 8 nm m.b.v. deze techniek kunnen worden waargenomen.

Bronnen:
http://www.nbi.dk/~tweezer/introduction.htm

http://www.stanford.edu/group/blocklab/Optical%20Tweezers%20Introduction.htm



Figuur 3.7 — Vereenvoudigde weergave van een optisch pincet.

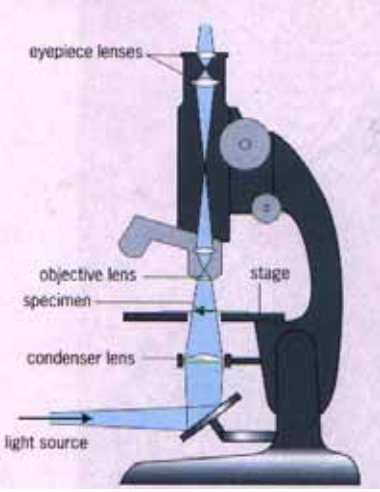
Internet

Een animatiefilmpje over de werking van een optisch pincet staat op:
http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Molecular_Motors

Extra: Fluorescentie

Fluorescentie
Een eiwitmolecuul kan gelabeled worden met een een fluorescerend molecuul. Het wordt daardoor een lichtbron die gevolgd kan worden met een nauwkeurigheid van enkele nanometers. De verplaatsingen die waargenomen kunnen worden zijn veel kleiner dan het oplossend vermogen van zichtbaar licht.

Extra – Microscopie en Nanoscopie

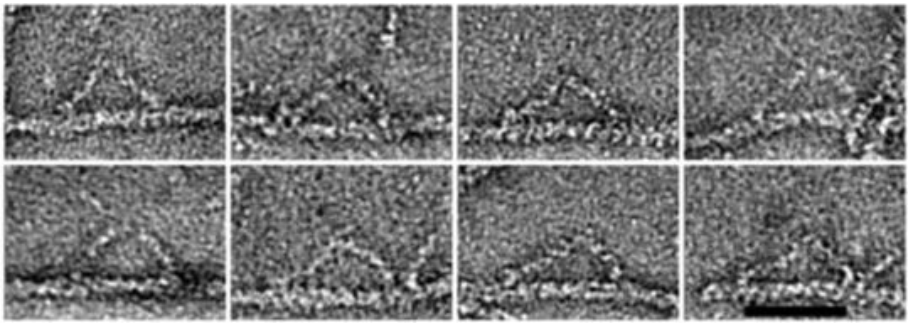


Figuur 3.8 — Een optische microscoop.

Optische microscopie 'review'
In de middeleeuwen gebruikten oudere monniken vergrootglazen om hun zelfgeschreven kleine lettertjes te kunnen lezen. Vermoedelijk waren het brillenmakers (Hans en Zaccharias Janssen in de late 16e eeuw) die doorhadden dat je een combinatie van 2 lenzen kunt gebruiken om een sterke vergroting te maken. Zo is het goed mogelijk een vergroting van 1000x te krijgen (100 x 10). Het lijkt eenvoudig de vergroting steeds verder op te schroeven. Zolang de kwaliteit van de lenzen maar groot genoeg is. Het golfkarakter van lichtstralen gooit echter roet in het eten. Zoals je een brommer achter een muurtje gewoon kunt horen (de golven met een lengte van ongeveer 1 meter buigen om het muurtje heen) zo kan ook licht een beetje afbuigen. Je beeld wordt dan vaag. Zichtbaar licht heeft een golflengte van ongeveer 0,5 µm (500 nm). Daarom is het moeilijk objecten die slechts enkele nanometers groot zijn, de *nano-wereld*, met de lichtmicroscoop te bestuderen.

Andere golven
Er bestaan stralingssoorten met kleinere golflengte. Röntgenstraling heeft met waarden tussen 0,01 nm en 4,5 nm de juiste golflengte om de *nano-wereld* te bestuderen. Het is niet eenvoudig een röntgenmicroscoop te bouwen, omdat het moeilijk is een lens te maken die röntgenstralen afbuigt. De röntgenfoto's waarmee je vertrouwd bent (bij de tandarts of als je een been gebroken hebt) zijn eigenlijk schaduwbeelden met een vergroting van 1. Omdat het onmogelijk is met röntgenstraling echte *afbeeldingen* te maken gebruikt men andere stralingssoorten: elektrongolven.
Deeltjes zo klein als elektronen blijken zich net zo makkelijk als golven te gedragen als als deeltjes. De golflengte van elektronen is veel kleiner dan die van röntgenstraling en daardoor zeer geschikt voor het bestuderen van de *nanowereld*. En, voor elektronenbundels kun je *wel* lenzen maken: magnetische lenzen namelijk.
Toch zijn er geen microscopen beschikbaar waarmee je details van 0,01 nm kunt bestuderen in bijvoorbeeld een levende cel. Het doordringend vermogen van de elektronen in het preparaat is zo klein dat dit extreem dun moet zijn: het liefst veel dunner dan een 1 µm. Een levende cel heeft echter een diameter in de orde van 10 µm. Elektronenstralen leveren net als röntgenstralen veel beschadigingen op aan biologische samples. Het sample moet altijd bevroren zijn om beschadigingen binnen de perken te houden.

Zoals je een filmbeeld kunt 'bevriezen' zo kun je ook de beweging van een motoreiwit 'bevriezen' –maar dan letterlijk-.
Je kunt er vervolgens met de elektronen microscoop naar kijken. Ieder filmbeeldje in figuur 3.9 is een motoreiwit in een ander stadium van de beweging. Het is een heel werk om uit al deze afzonderlijke beelden informatie over de beweging te krijgen. Het onderzoek heeft een publicatie opgeleverd in Nature 405 (2000).



Figuur 3.9 — Verschillende stadia van een wandelend motoreiwit. Zie toelichting in de tekst hiernaast.

Je kunt nu maken: Opgave 26 aan het einde van dit hoofdstuk**.**

Opgaven

21 Snelheid van een spiersamentrekking

Neem voor de frequentie van een myosinemolecuul 25 stappen per seconde, en voor de stapgrootte 5nm.

Een spiervezel kan verkorten met een snelheid van 0,1 tot 25 keer zijn eigen lengte per seconde. Een spiervezel heeft een lengte van ongeveer 1 cm.

a. Bereken hoeveel myosinemoleculen een rol spelen wanneer een spiervezel zich verkort met de maximale snelheid.

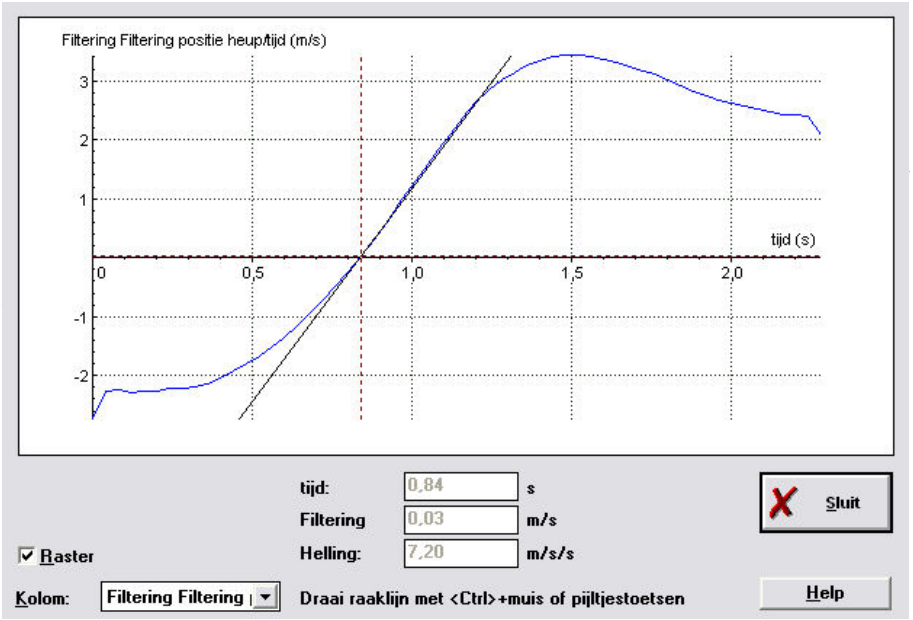
Neem voor de massa van myosinemoleculen ongeveer 1,0 10^{-18} kg/mol.

b. Bereken met dit gegeven de benodigde spiermassa voor deze taak.

c. De totale massa van een spier in je lichaam zal in de praktijk veel groter zijn dan je antwoord bij b. Voor de snelheid is dat niet noodzakelijk. Waarom moet de spiermassa toch veel groter zijn?

22 snelheidsmeting in water

Met een videocamera is de beweging van een zwemster vastgelegd. M.b.v. video-meting is een diagram gemaakt van de snelheid. Uit dit (*v,t*-)diagram kun je de volgende gegevens aflezen: De zwemster komt aan met een snelheid van -2,2 m/s, keert daarna om, zet zich af en drijft uit tot de volgende (vlinder)slag. Bij het uitdrijven neemt haar snelheid uiteraard af.



Figuur 3.10

a. Bereken m.b.v. dit diagram de (wrijvings)kracht die de zwemster ondervindt tijdens het uitdrijven. Neem hiervoor een stuk van de grafiek waarvoor de versnelling min of meer constant is.

b. Veronderstel (ten onrechte) dat deze wrijvingskracht een viskeuze wrijvingskracht is. Beschouw de zwemster als een “ellipsoide” en bereken dan de viscositeit van water.

c. Vergelijk je uitkomst met de viscositeit van water volgens Binas. Verklaar het grote verschil.

d. Vergelijk het antwoord van a ook met de weerstandskracht t.g.v. trage heidswrijving: $F_w = \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \rho \cdot v^2$ (dit is eigenlijk de waterverplaat-

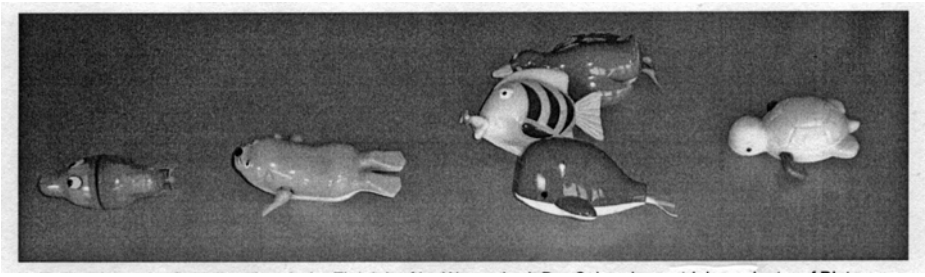
sing). Neem voor de snelheid van de zwemster een waarde van 3 m/s, voor c_w een waarde van 0,5 en frontaal voor het oppervlak een waarde van 0,040 m.

23 Grote en kleine zwemmers

a. Bereken voor een onderzeeër van 100 m lang en een massa van 50 ton hoe lang deze uitdrijft in water; bij dezelfde beginsnelheid als in de vorige opgave.

b. Bereken welke afstand een bacterie nog aflegt als hij zijn zwemstaartjes stil houdt. Neem een beginsnelheid van 10 μm/s. De langste straal van een bacterie is ongeveer 1 μm en zijn dichtheid is ongeveer 1,3 maal die van water.

24 Andere vloeistoffen dan water

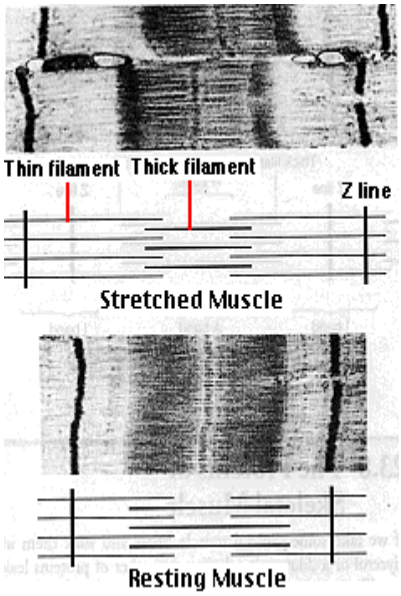


Figuur 3.11

De speelgoedvisjes hierboven komen in water redelijk vooruit (draaiende vinnen, een draaiende staart; als het maar lijkt op een schroef of een schoepenrad). Doe je de visjes in slaolie, dan komen ze niet meer vooruit

a. Bedenk een verklaring hiervoor. De dichtheid van slaolie is niet groter dan die van water, dus aan de trage wrijving / vloeistofverplaatsing kan het niet liggen.

b. Geef een verklaring voor het volgende: heel kleine deeltjes in water hebben in water dezelfde problemen als de visjes hierboven in slaolie.



Figuur 3.12

25 Transport van blaasjes door de cel

a. Bereken hoeveel tegenwerkende kracht een kinesinemolecuul ondervindt van de vloeistofwrijving als het een blaasje van 100 nm diameter met zich meesleept (verwaarloos in dit geval de wrijving van de motor zelf)

b. Bereken of een enkel ATP-molecuul per stap genoeg energie geeft voor de arbeid die deze kracht moet leveren. Anders gezegd: is een kinesinemolecuul in staat om in zijn eentje dit blaasje door te cel te slepen?

c. Bereken hoelang dit blaasje erover doet om het uiteinde van een zenuwcel te bereiken, als het door kinesine getransporteerd wordt. Vergelijk dit met de tijd die het zou kosten om deze afstand via diffusie te overbruggen.

26 *extra* Microscopie

De afbeeldingen in figuur 3.12 van gestreept spierweefsel en afzonderlijke sarcomeren geven details te zien van enkele nanometers. Dergelijke afmetingen te klein om met de lichtmicroscoop in beeld te brengen. Met een elektronmicroscoop kun je veel kleinere details in beeld brengen.

Een elektron heeft een duaal karakter, het gedraagt zich als golf en als deeltje. De golflengte van het elektron kun je berekenen met $\lambda = h / m \cdot v$.

a. Maak een schatting voor de lengte van de kleinste details die de foto hiernaast laat zien. Gebruik de bekende lengte van 1 sarcomeer.

b. Leg uit wat de kleinste afmeting is die je met een gewone lichtmicroscoop in beeld kunt brengen (gebruik binas tabel 20).

In een elektronenmicroscoop hebben de elektronen een snelheid van $2{,}0 \cdot 10^7$ m/s.

c. Bereken met deze gegevens de kleinste afmeting die je met een elektronmicroscoop in beeld kunt brengen.

Helaas gedragen elektronen zich toch wat anders dan fotonen zodat deze techniek niet bruikbaar is in vloeistoffen – in het bijzonder in levende cellen.

d. Geef hiervoor een verklaring.

4 Op tijd reageren

Zenuwgeleiding

Hoofdstukvraag	Hoe is snel signaaltransport in het lichaam mogelijk?

Soms is ergens in het lichaam een stof zelf nodig, bijvoorbeeld glucose als energiebron voor een spier. Moleculen van die stof moeten dan naar die plek getransporteerd worden, en ze worden daar verbruikt. Andere stoffen zijn niet zelf nodig, maar zijn alleen maar nodig om informatie te geven. Een hormoon bijvoorbeeld informeert een orgaan dat het in actie moet komen. Zo'n informatietaak heet een signaal, en de signaalstof (het hormoon in dit voorbeeld) hoeft er niet bij verbruikt te worden.

Van signalen in het lichaam die nodig zijn om spieren te laten bewegen weten we het volgende:

- Ze overbruggen een afstand van 1 tot 2 meter (van je hoofd tot je tenen).
- In het menselijk lichaam is hiervoor een tijd nodig van ongeveer 0,3 sec.

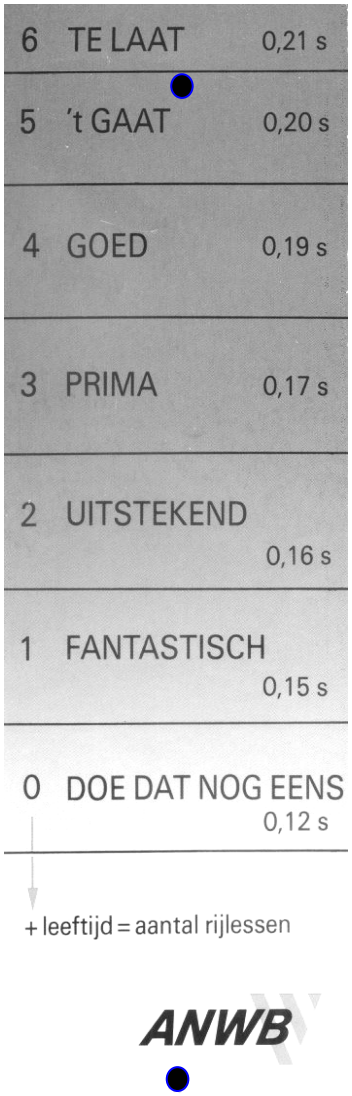
Transport van deeltjes in het lichaam is een van de mogelijkheden voor het overbrengen van signalen. Inmiddels weet je een aantal dingen daarover, na de hoofdstukken 2 en 3. Via diffusie of gericht transport verplaatsen moleculen zich over kleine afstanden.

Een experiment: “Houd je duim en wijsvinger op een kleine afstand van elkaar. Iemand anders houdt een bankbiljet tussen de duim en wijsvinger en laat het onverwacht los. Het zal je niet altijd lukken om het te grijpen voordat het je vingers gepasseerd is”.

De reactietijd hangt af je concentratie. Wanneer je het proefje zeer geconcentreerd uitvoert – bijvoorbeeld omdat je het bankbiljet mag houden als je het vangt – zal je reactietijd kort zijn. Je kunt je voorstellen dat je op deze manier een loterij opzet voor een goed doel. De inleg moet dan hoog genoeg zijn en je moet van te voren weten welk percentage van de mensen het biljet weet te vangen. Kennis over de reactietijd van mensen is dan belangrijk.

Wanneer je in plaats van een bankbiljet het strookje hiernaast gebruikt kun je de reactietijd van een klasgenoot bepalen.

Bij atletiekwedstrijden wordt ook gebruik gemaakt van kennis over de reactietijd. Sprinters starten vanuit een blok met een sensor. Het wegsprinten kan worden gedetecteerd. Wanneer dit minder dan 0,3 sec na het startschot gebeurt is er sprake van een valse start: de sprinter moet dan *voor* het schot gestart zijn. Bij de atletiekwedstrijden gaan ze er kennelijk vanuit dat de tijd die een signaal nodig heeft om van de oren via de hersenen naar de beenspieren te gaan niet kleiner kan zijn dan 0,3 sec.



Figuur 4.1

Tekstvragen

activiteit

- Controleer of diffusie geschikt is voor signaaltransport over een afstand van 1m. Gebruik hoofdstuk 2 hierbij.
- Controleer ook of gericht transport met moleculaire machines voor signaaltransport kan zorgen.

Op deze wijze kom je tot een conclusie. Kan signaaltransport hetzelfde zijn als transport van moleculen?

In de vorige paragrafen hebben we gezien dat transport van deeltjes in het lichaam door diffusie alleen al over enkele centimeters uren kan duren. Moleculaire machines kunnen deeltjes al sneller transporteren, maar ook dat gaat niet snel genoeg om een signaal van je hoofd naar je tenen te sturen: om te beginnen met rennen bijvoorbeeld, als je een loslopende leeuw ziet, of om een stapje opzij te doen als je dreigt om te vallen. Dan moet een signaal vanuit de benen de hersenen in delen van seconden bereiken, en er moet heel snel weer een signaal terug.

In het lichaam van mensen en vergelijkbare diersoorten kan zo'n snel signaal door het zenuwstelsel vervoerd worden. Op de werking daarvan gaan we in dit hoofdstuk in. We zullen niet op elk detail ingaan, via aparte opdrachten kun je onderdelen van het verhaal meer in detail onderzoeken.

4.1 Spanningspieken als signalen

paragraafvraag	**Hoe kan een signaal door het materiaal van een zenuw gaan zonder dat het materiaal zelf hoeft te reizen?**

Tekstvragen

activiteit
Als je aan zo'n gekruld ouderwets telefoonsnoer kunt komen, kun je de volgende proef doen.

- Pak het snoer aan een kant vast, en geef je buurvrouw of -man het ander einde. Span het snoer en geef aan een uiteinde een korte tik loodrecht op de lengterichting. Je ziet 'de tik' naar de overkant reizen. Het lukt misschien wel om hem een paar keer heen en weer te zien gaan ('de tik' reflecteert aan de overkant).
- We noemen het signaal dat naar de buurvrouw reist 'de tik'. Bedenk er een andere naam voor.
- Leg uit hoe die 'tik' kan reizen zonder dat een compleet stukje snoer de afstand hoeft te overbruggen. Maak je geen zorgen als blijkt dat nog niet zo makkelijk uit te leggen is hoe dat dan wél gaat.

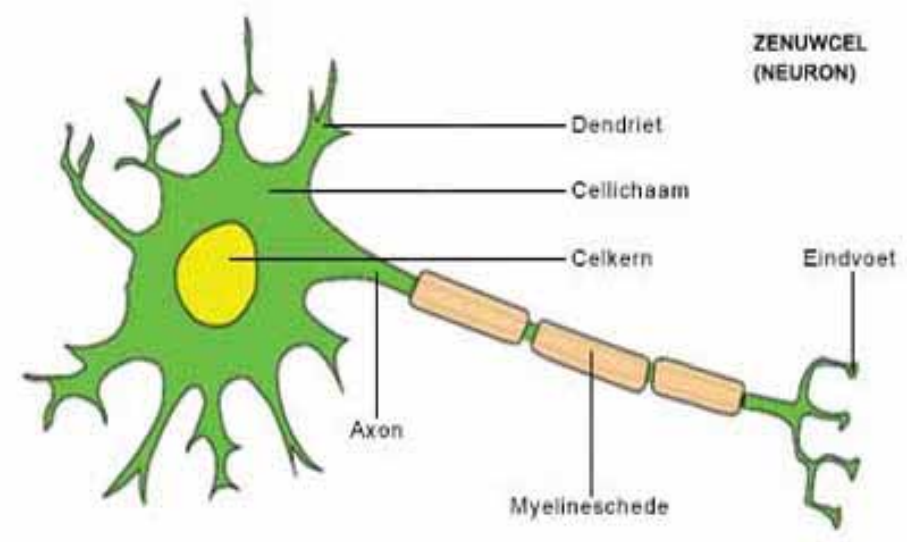
Signalen kunnen sneller gaan dan de stoffen waardoorheen ze vervoerd worden, denk aan een golf door een koord, aan een geluidsgolf in lucht, aan elektrische geleiding.

Het zenuwstelsel gebruikt elektrische geleiding om signalen over te brengen. Het gaat op een andere manier dan in een koperdraad tussen bijvoorbeeld een CD-speler en een versterker, maar de kern van de zaak is: ladingen brengen elkaar in beweging en die beweging plant zich voort in het medium (koperdraad of zenuw).

We gaan hieronder het mechanisme van signaaltransport in een zenuw bekijken met een natuurkundige bril. Dat betekent hier dat we een model maken voor het basismechanisme, zodat we met dat model kunnen experimenteren zonder levende zenuwen te hoeven prepareren.
Dat model houdt in dat we de zenuw beschouwen als een keten van condensatoren en weerstanden. Daar kunnen we proeven mee doen, en we kunnen het model in een computer nabouwen en verfijnen. Dat leert ons dan weer wat over de échte zenuwen.

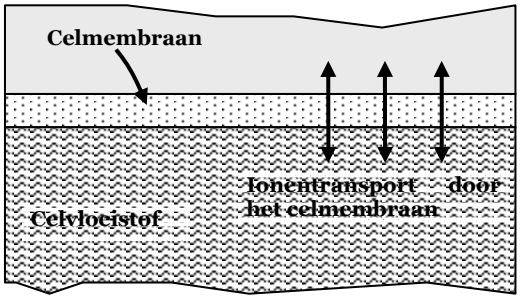
In dit boek houden we het bij simpele benaderingen, om je een idee te geven. Via de opdrachten kun je onderdelen ervan in meer detail uitzoeken. In de professionele *neuroscience* analyseert men veel meer dan alleen de standaardsituaties, en kijkt men bijvoorbeeld ook naar het functioneren van zenuwen in netwerken. Hoe complex dat ook wordt, het basisidee blijft dat de zenuw een keten van condensatoren en weerstanden is.

Bouw van een zenuw, een simpel beeld
Wat we hier voor het gemak *een zenuw* noemen is in feite een axon, een uitloper van een speciaal soort cel, de *zenuwcel*. Zie figuur 4.1.



Figuur 4.1 — Een zenuwcel met uitlopers. Wat we in dit hoofdstuk 'een zenuw' noemen is het axon. Axonen in het menselijk lichaam hebben een lengte in de orde van van een paar millimeter tot een meter. Bron: www.kennislink.nl , artikel MS-therapie dichterbij.

Het basisidee van een zenuw zie je in figuur 4.2, waar je een stukje ziet . Het lijkt een soort slangetje. De wand van de zenuw heet het *membraan*.



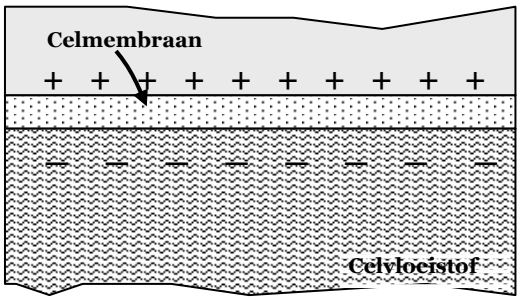
Figuur 4.2 — Een simpel beeld van een stukje zenuw (bovenste helft) als een buisje dat een zoutoplossing bevat en dat ook omgeven wordt door een zoutoplossing. Dat zout bestaat voor het grootste deel uit kalium-, natrium, calcium- en chloride-ionen.

Diffusie van ionen door de membraanwand

De wand van de zenuw laat geen water of ionen door, behalve op sommige plekken, waar ionenkanalen zitten die een bepaalde soort ionen kunnen doorlaten. Nu is bijvoorbeeld binnen de zenuw de concentratie kaliumionen ($K^{+)}$ hoger dan erbuiten, en door ionenkanalen worden K^+-ionen een beetje doorgelaten. Gevolg: door diffusie gaat meer K^+ de zenuw uit dan erin. Zo gaat er positieve lading de zenuw uit, zonder dat dat door diffusie van andere ionen gecompenseerd wordt. Daardoor ontstaat er een elektrische spanning tussen buiten- en binnenkant van het membraan die de kaliumionen weer naar binnen trekt. Bij een bepaalde spanning over het membraan is er evenwicht tussen de kaliumexport door diffusie en -import door de elektrische spanning. In een menselijke zenuwvezel ligt die spanning voor kalium rond de 80 mV. Ook andere ionensoorten spelen een rol, daarover straks meer.

De potentiaal buiten de zenuw wordt *gedefinieerd* als nul (de 'aarde'), en zo zou de rustpotentiaal aan de binnenkant van het membraan -80 mV zijn als het membraan alleen kalium zou doorlaten.

Een eenvoudige tekening zie je in figuur 4.3.



Figuur 4.3 —Als het membraan kaliumionen doorlaat, en als er tegelijk een concentratieverschil van kalium tussen binnen- en buitenkant van de zenuw heerst, ontstaat een potentiaalverschil over het membraan.

Applet over ontstaan membraanspanning

Een mooi beeld van het onstaan van de elektrische spanning bij selectief doorlaten van positieve ionen geeft de applet in:
http://physioweb.med.uvm.edu/diffusion/NernstPages.htm

De fysicus Hermann Walter Nernst heeft voor dit evenwicht een vergelijking afgeleid, die staat hieronder. Bij de vergelijking zijn de waardes van de natuurconstanten k en q aangegeven, en als voorbeeld de temperatuur in het lichaam. Als je je voorstelt dat je de valentie van de ionen verdubbelt, of de verhouding tussen de concentraties, dan krijg je een idee van de samenhang met de Nernst-spanning.

Nernst-spanning

$$U = \frac{k_b \cdot T}{q \cdot z} \cdot \left[\ln(C_{uit}) - \ln(C_{in})\right]$$

waarin: $k_b = Boltzmanconstante = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

$T = temperatuur = 310$ K (= 37° C)

$q = elektronlading = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C

$z = valentie\ van\ het\ ion\ (+1\ voor\ natrium\ en\ kalium)$

C_{in} en C_{uit} zijn de ionenconcentraties aan de binnenzijde en aan de buitenzijde van het celmembraan.

Andere ionen

Chloorionen (chloride) dragen weinig bij aan de membraanspanning. De kalium- en natriumconcentratieverschillen zijn constant en worden in stand gehouden door ionenpompen. Chloor heeft niet zo'n pomp, met als gevolg dat de concentratie binnen in de cel zich aanpast aan de membraanspanning in plaats van andersom.

Er zijn ook calciumkanalen, maar die gaan pas open bij zeer hoge membraanpotentialen. Het concentratieverschil tussen binnen en buiten is wel zeer hoog, dus als die kanalen opengaan stroomt er veel calcium de cel in.

Voor het begrijpen van de rust- en actiepotentiaal heb je eigenlijk alleen natrium en kalium nodig, calcium en chloor hebben andere functies in de cel en dragen hier in veel mindere mate aan bij.

Ionenpompen

De membraanspanning is te laag om het concentratieverschil van kalium tussen binnen en buiten stabiel te houden. Die zou immers -80 mV moeten zijn, terwijl hij in de praktijk -65 mV is (door het effect van natrium). Er blijft dus kalium naar buiten stromen. En door net zo'n effect blijft er natrium naar binnen stromen. Zo zouden de concentratieverschillen af kunnen nemen. De zenuw houdt ze echter actief in stand, met *ionenpompen*. De natrium-kaliumpomp pompt kalium terug naar binnen, en natrium naar buiten.

Verschillende soorten ionen

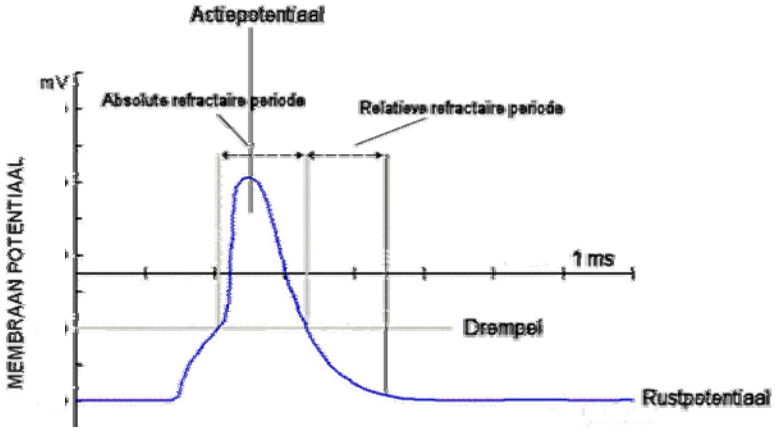
Het membraan van een zenuw laat niet alleen kaliumionen door, maar ook natrium-, calcium- en chloorionen. Kalium en natrium zijn de belangrijke ionen als het gaat om de opbouw van een spanning over het membraan. En zoals kalium een bijdrage van ongeveer -80 mV aan de membraanspanning levert, zo doet natrium dat met ongeveer +70 mV. Met een plusteken, want natrium heeft juist buiten de zenuw de grootste concentratie.

Het gecombineerde effect van de potentiaalverschillen als gevolg van natrium en kalium is dat de membraanspanning in de rustsituatie ca. -65 mV is.

Actiepotentiaal

Nu zijn we zover dat we de basis voor een signaal in beeld hebben. Aan een zenuw kan een prikkel worden toegediend in de vorm van een plaatselijke verstoring van de membraanspanning. Contact met een stof uit een andere zenuwcel bijvoorbeeld (een neurotransmitter) kan veroorzaken dat de membraanspanning iets omhoog gaat — d.w.z. minder negatief wordt. Dat heeft een zichzelf versterkend effect. De hogere membraanspanning zorgt ervoor dat er meer natriumkanalen open gaan, waardoor er een grotere instroom komt van natrium, waardoor de membraanspanning verder omhoog gaat, waardoor er meer kanalen open gaan, enzovoort. De membraanspanning stijgt tot boven nul, maar inmiddels is ook de kaliumuitstroom toegenomen en daalt de membraanspanning weer. Na die korte verstoring herstelt de situatie zich weer, dat duurt bij elkaar een paar milliseconden. Die piek in de membraampotentiaal heet een *actiepotentiaal* (fig. 4.4).

De actiepotentiaal wordt na de prikkel in het begin door de cel zelf gemaakt.



Figuur 4.4 — Een actiepotentiaal duurt een paar milliseconden. Erna zakt de membraanpotnetiaal terug naar -65 mV.

Voortplanting van een actiepotentiaal

We zagen dat een actiepotentiaal kon worden opgewerkt door een externe prikkel op een bepaalde plaats van het membraan. De membraanpotentiaal gaat daar iets omhoog, waardoor de cel zelf de actiepotentiaal opwekt door het samenspel van mechanismen om ionen door te laten.

Vlak naast de plek waar een actiepotentiaal optreedt heeft het membraan nog de lagere rustpotentiaal. Er gaat dan een stroom lopen van de plaats van de actiepotentiaal naar die naburige plaats. Daardoor stijgt ook daar de potentiaal en de hele reactie die we hierboven zagen speelt zich op die naburige plaats af. En vervolgens op de plek daar weer naast. Zo plant de actiepotentiaal zich voort langs het membraan.

Internet

Je kunt die voortplanting van een actiepotentiaal bekijken in de applet op:
http://nerve.bsd.uchicago.edu/nerve1.html

Elke keer stopt de cel er energie in om de rustconcentraties van de ionen te herstellen – dat doen actieve ionenpompen, zie de kadertekst *Ionenpompen* hierboven.

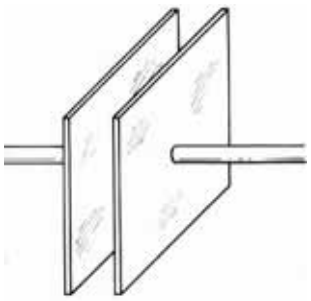
Over deze paragraaf gaan de opgaven 27 t/m 30.

4.2 Het membraan als RC-keten

Paragraafvraag	Hoe kunnen we prikkelgeleiding modelleren en onderzoeken?

In de vorige paragraaf zagen we hoe een actiepotentiaal zich door de activiteit van de cel in het openen en sluiten van ionenkanalen en door het gebruik van ionenpompen langs het membraan voortplant.
Er stroomt daarbij steeds elektrische lading *door* het membraan, maar de verstoring, de actiepotentiaal, reist *langs* het membraan.

Ook zonder die activiteit van de cel plant een spanningspiek over het membraan zich in de lengterichting van de zenuw voort. Dat komt doordat het membraan tegelijkertijd ook een *weerstand* en *condensator* is.



Een condensator kun je je voorstellen als twee evenwijdige platen, op korte afstand van elkaar, die elektrisch geladen kunnen worden. Als er bijvoorbeeld negatieve lading naar de ene plaat stroomt, duwt die de negatieve lading in de andere plaat weg. Zo loopt er dus even een stroom door de condensator, ook al steken er geen ladingen zelf de spleet tussen de platen over. De ene plaat wordt negatief, de ander wordt positief, en tussen de twee platen onstaat een elektrische spanning. De condensator kan zich weer ontladen als de platen door een weerstand met elkaar worden verbonden.

Capaciteit en Condensator

Capaciteit bepaalt de verhouding tussen lading die je op een condensator kan opslaan en spanning die ervoor nodig is om deze lading op de condensator te zetten.

Symbolen: *C* is de capaciteit in Farad ($C \cdot V^{-1}$), Q is de lading in Coulomb, U is de spanning in Volt.

$$C = \frac{Q}{U}$$

De capaciteit neemt toe wanneer het oppervlak van de delen toeneemt.
De capaciteit neemt toe wanneer de afstand tussen de delen afneemt.

Op een zelfde manier werkt een membraan als een condensator. En de ionkanalen vormen een geleider met een zekere weerstand.

Weerstand en capaciteit

Herstel van de membraanspanning
De weerstand en de capaciteit van het membraan bepalen hoe snel de rustspanning zich herstelt na een verstoring. Het is een exponentieel verband. Het product R·C bepaalt hoe snel de verstoring voorbij is.

$$U(t) = U_0 \cdot e^{\frac{t}{R \cdot C}}$$

Wanneer de tijd gelijk is aan de waarde van $R \cdot C$ is de verstoring nog 37% van het maximum. zodat je elkaar het antwoord moet uitleggen. Rechtsonder een voorbeeldgrafiek. $R \cdot C$ = 0,04 s. Daarnaast een meting van een actiepotentiaal.

Om de werking een condensator beter te begrijpen kun je nu het practicum daarover doen, je vindt het onder opgave 31.

Membraan als reeks van condensatoren en weerstanden

De voortplanting van een spanningspiek langs het membraan kun je opvatten als het opladen en ontladen van een reeks parallel geschakelde condensatoren.

In het practicum van opgave 32 kun je zo'n reeks condensatoren ook zelf bouwen

Begrippen

Signaal: bijvoorbeeld elektrische spanning.

Nernstspanning

Actiepotentiaal

Signaaltransport: geleiding van spanningspiek

Stroomsterkte
Weerstand
Capaciteit

Samenvatting

De transportsnelheid van deeltjes kan nooit de benodigde snelheid van 1 m/s tot 5 m/s opleveren.

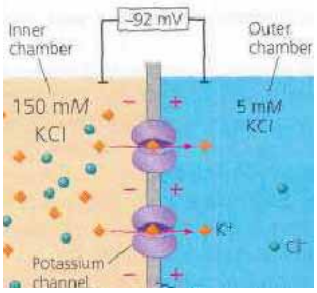
Het signaal wordt mogelijk gemaakt door een verstoring van de Nernstspanning. Dit is het evenwicht waarbij de stroom van ionen ten gevolge van het concentratieverschil precies even groot is als (maar tegengesteld is aan) de stroom ten gevolge van een spanning over een celmembraan.

In de rusttoestand staat er een spanning over het celmembraan van ongeveer -65 mV, negatief aan de binnenkant (de potentiaal buiten de cel is gedefinieerd als nul). Een verstoring wordt door mechanismen in de membraanwand zelf versterkt, en dat leidt tot een actiepotentiaal. Een actiepotentiaal plant zich langs het membraan voort en kan als signaal fungeren.

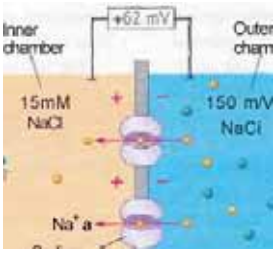
Dat signaal reist veel sneller en over een grotere afstand door het lichaam dan ooit een moleculaire motor zou kunnen, laat staan dat diffusie dat zou kunnen realiseren.

Opgaven

Bij §4.1



Figuur 4.5



Figuur 4.6

27 Nernstspanning

Leg uit hoe een concentratieverschil voor een ionsoort tussen binnen- en buitenmileu van de zenuwcel in combinatie met een selectief doorlatend celmembraan kan leiden tot een elektrische spanning over het membraan.

28

In figuren 4.5 en 4.6 staan twee tekeningen van het celmembraan, met vermelding van de ionenconcentraties en de membraanspanning.

a. Controleer of de gegevens bij de tekeningen in overeenstemming zijn met de formule van Nernst.
b. Waarom heeft de spanning in de bovenste tekening in –teken, terwijl de K-concentratie *in de cel* veel groter is dan erbuiten?

29

a. Bepaal wat de rustpotentiaal zou zijn (volgens de formule van Nernst) wanneer alle K+ en Na+ kanalen geopend zouden zijn. De wet van Nernst geldt voor afzonderlijke ionconcentraties. Welke aanname moet je maken om de spanning uit te rekenen t.g.v. meerdere soorten ionen.
b. Leg uit of de rustpoteniaal van -60 tot -80 V in overeenstemming is met het gegeven dat de K+ kanalen grotendeels geopend zijn, en de Na+ kanalen in veel mindere mate.

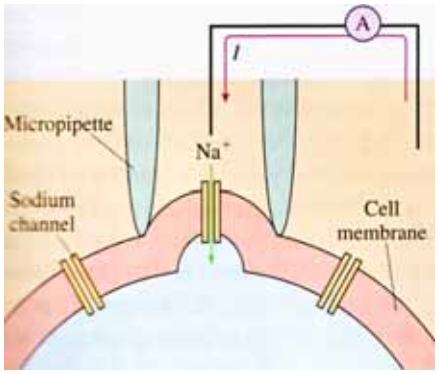
30

a. Een korte duur van de actiepotentiaal is van belang voor de frequentie waarmee zenuwen signalen kunnen doorgeven. Leg dat uit.

De kanalen in het membraan kun je niet alleen beïnvloeden m.b.v. elektrische spanning. Er zijn ook cellen in het lichaam waarvan de doorlaatbaarheid van de wand reageert op vervorming (druk of trekkrachten) en op de aanwezigheid van chemische stoffen.

b. Leg uit op welke plaats in het lichaam je dergelijke zenuwcellen tegenkomt (gevoelig voor kracht of aanwezigheid van stoffen).

Bij §4.2



Figuur 4.7

31 Practicum: Weerstand en capaciteit

In figuur 4.7 zie je een stukje van een zenuwvezel waar een prikkeling plaatsvindt. De spanningsbron is het aangeboden signaal waar de zenuwvezel op reageert. Dat kan bijvoorbeeld een signaal van één der zintuigen zijn.

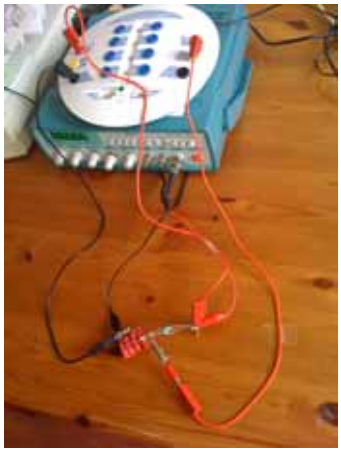
Membraanweerstand en Membraancapaciteit

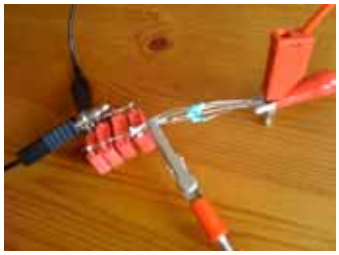
De weerstand R_m van het membraan geeft weer dat de ionen met de nodige moeite door het membraan bewegen.

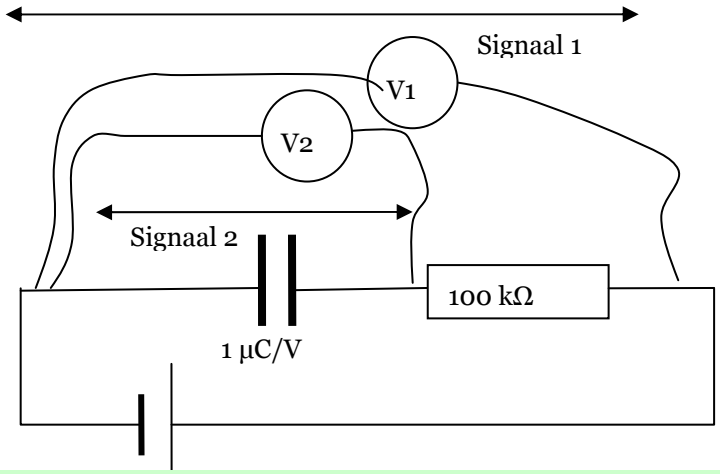
De capaciteit C_m geeft de verhouding aan tussen de lading op het membraan en de spanning die dat tot gevolg heeft. Deze capaciteit is in de tekening van de meetopstelling weergegeven als twee zwarte balkjes.

$\tau = R_m C_m$. Het product van de waarden R_m en C_m is een tijdsconstante. Deze constante geeft aan hoe lang het duurt om 63% van de lading op het membraan te krijgen. De waarde van de membraanspanning is dan 63% van de signaalspanning.

Meetopstelling







Benodigdheden:
Functiegenerator, CoachlabII , Computer, Bedrading
1 condensator (geen electrolytische omdat deze polariteit kent)
1 weerstand
Signaal van functiegenerator is V_1 (batterijspanning)
Spanning over de condensator, V_2 gaat naar kanaal 2 van de Coachlab.

Beginwaarden

De capaciteit: 1×10^{-6} C/V.

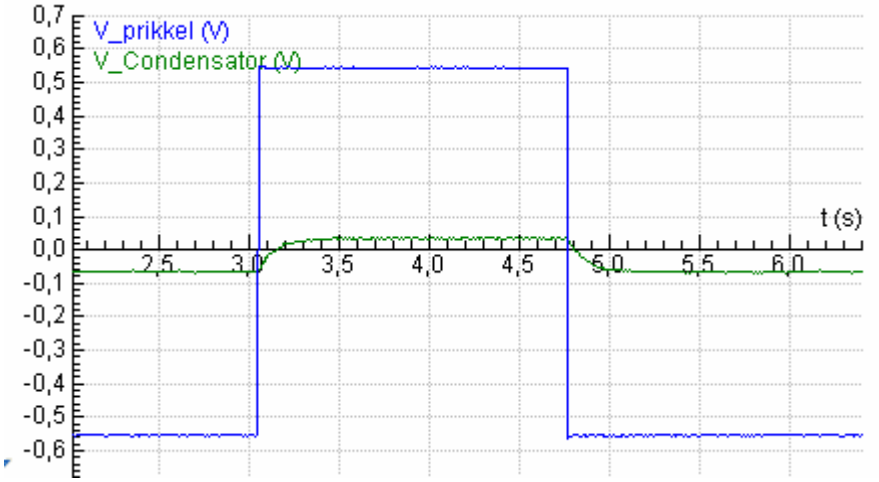
De weerstand: 100 kΩ. De tijdsconstante is dan 0,10 seconde en je kunt goed zien wat er gebeurt.

De amplitude van de spanningspuls: ongeveer 0,6 V, dit komt overeen met de waarde van de rustpotentiaal van een zenuwvezel en is dus een redelijke grootte.

Neem voor de vorm van het signaal een blokgolf; die vertoont overeenkomsten met een puls (een plotselinge verandering van de membraanspanning). De meettijd: 10 seconden. Je kunt de vorm van het signaal dan goed waarnemen.

Variaties.
Voer dezelfde metingen uit wanneer je een weerstand gebruikt van 10 kΩ en een weerstand van 1,0 MΩ.

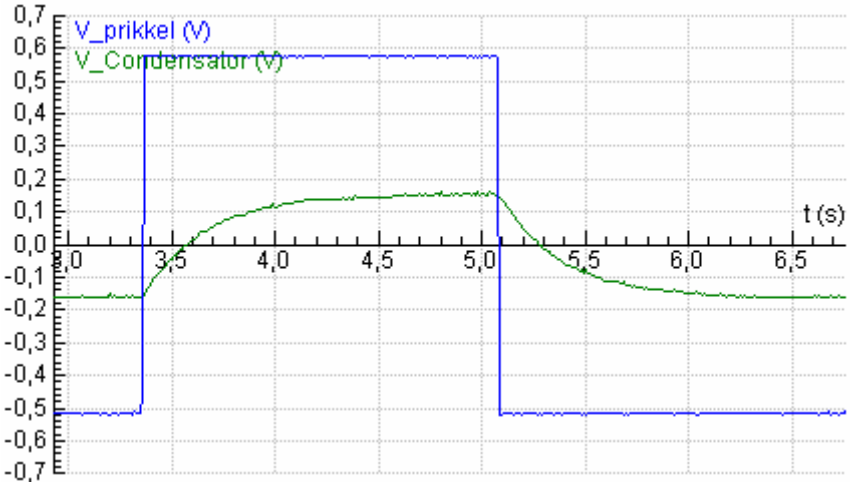
Voorbeeld van een meting. Prikkel en membraanweerstand.



a. Welke twee veranderingen zie je bij de spanning over het membraan (de condensator) ?
b. Wat is de invloed van de weerstand op de membraanspanning? Je kunt dat niet zien in het bovenstaande diagram. Je hebt daarvoor je eigen metingen nodig met *drie verschillende weerstandswaarden*.

Wanneer je wilt weten wat de invloed is van de condensator (capaciteit van het membraan) kun je de weerstand verkleinen en de capaciteit vergroten. Dat is wat op de foto te zien is.

c. Wat is de invloed van de membraancapaciteit op de membraanspaning, wanneer je de RC-tijd constant houdt?

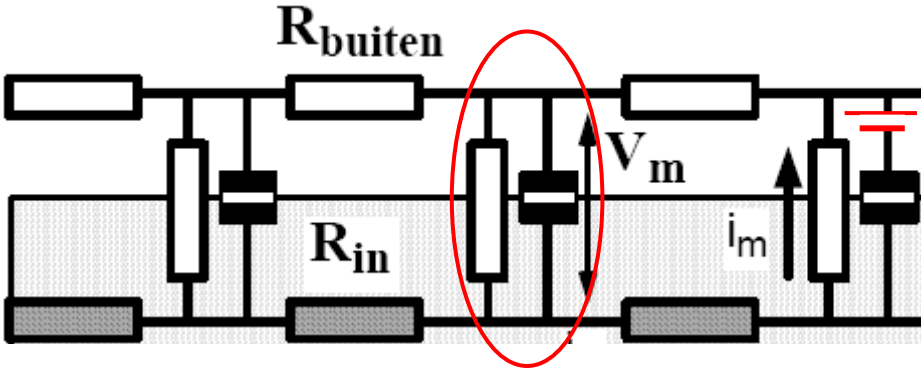


32 Signaaltransport *langs* de zenuwvezel.

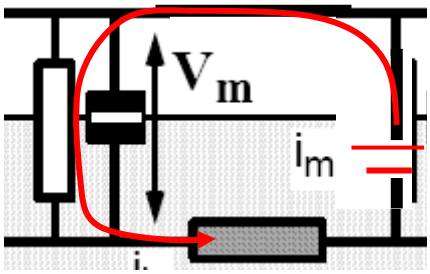
In een volgende proef gaan we de signaalgeleiding *langs* de zenuwvezel nabootsen.

We behouden de oorspronkelijke schakeling: een stukje zenuwvezel dat geprikkeld wordt, zodat de membraanspanning wijzigt.

We breiden de schakeling uit met een weerstand en condensator die de geleiding langs de zenuwvezel weergeven. Zie de schematische tekening hieronder.



De weerstand *buiten* de zenuwvezel is in de praktijk niet groot. R_{buiten} kan daarom verwaarloosd worden. We kunnen de elektrische weergave van de zenuwvezel als volgt vereenvoudigen voor een prakticum.

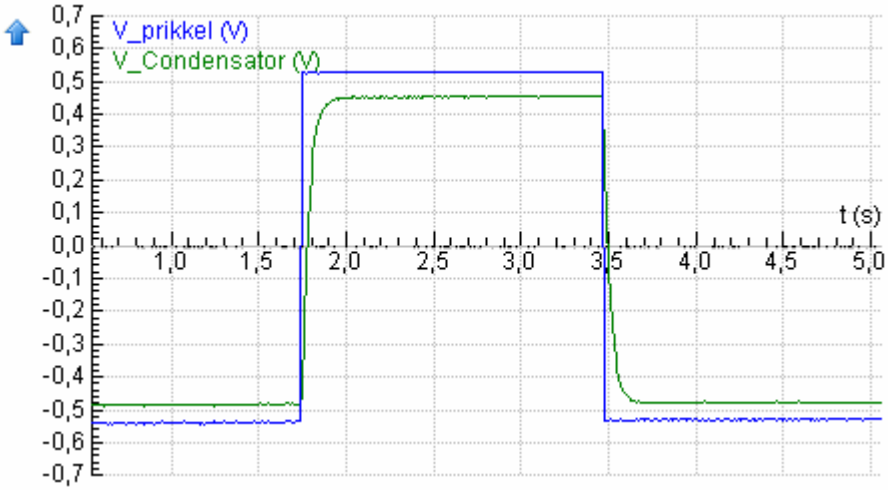


De weerstand en de capaciteit die op de plaats van de prikkeling in serie geschakeld waren, zijn nu parallel geschakeld.

Beginwaarden

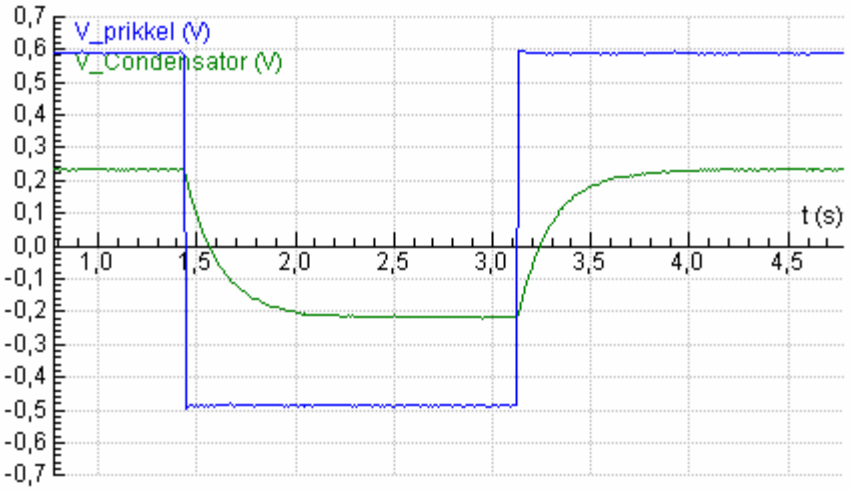
De capaciteit is C_m = 4,0 x10^{-6} C/V. De weerstand R_m =250 kΩ.

De weerstand R_i bedraagt 10 kΩ. (Uitgaande van een stukje zenuwvezel van 5 cm lang, met een diameter van 0,5 mm, en een soortelijke weerstand van 0,5 Ωm.)



Het signaal verspreidt zich in ongeveer 0,1 sec. De grootte van de membraanspanning is wat verderop langs de zenuwvezel ongeveer 10% verzwakt.

Wanneer de weerstand van de celvloeistof wordt verhoogd tot 100kΩ ontstaat het volgende resultaat.



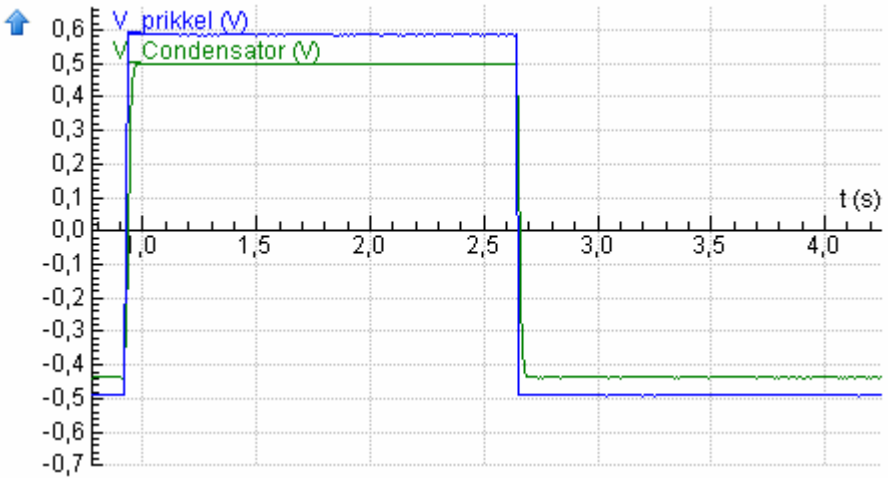
Het is duidelijk dat een grotere weerstand van de celvloeistof het signaal zal verzwakken en vertragen. De membraaneigenschappen zijn hierbij constant gebleven.

Veranderen van de membraaneigenschappen

De capaciteit verlagen we met een factor 4: C_m = 1,0 x10^{-6} C/V. De membraanweerstand blijft hetzelfde: R_m =250 kΩ.

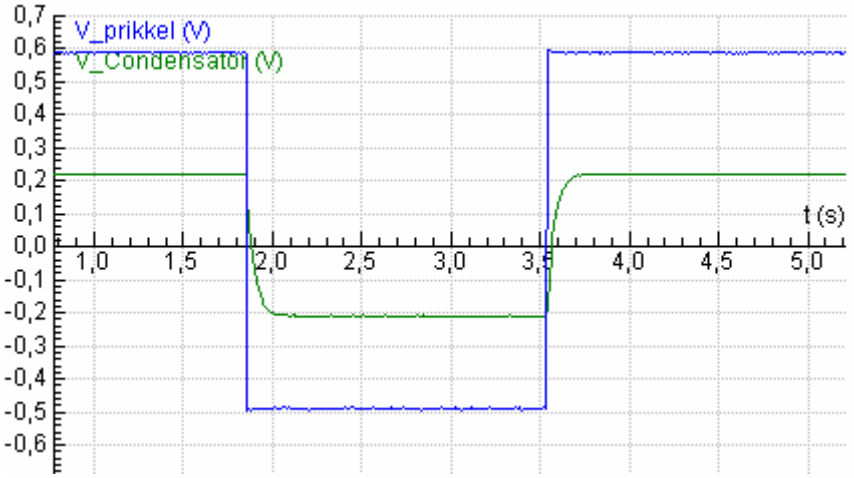
De weerstand R_i heeft weer de oorspronkelijke waarde: 10 kΩ. (Uitgaande van een stukje zenuwvezel van 5 cm lang, met een diameter van 0,5 mm, en een soortelijke weerstand van 0,5 Ωm). Al met al is alleen de capaciteit verkleind.

Dat geeft het volgende resultaat:



Opmerkelijk is dat het signaal nu veel sneller wordt doorgegeven en dat de grootte van het signaal net zo goed is als in het eerste geval (ongeveer 90% van het signaal bij de bron).

Wanneer we dit membraan met een kleine capaciteit koppelen aan een grotere weerstand van de zenuwvezel (100 kΩ i.p.v. kΩ) ontstaat het volgende:



Vergroting van de weerstand in axiale richting heeft weer het verwachte effect: het signaal is verzwakt en vertraagd.

Op deze manier kun je prima de invloed van membraancapaciteit, membraanweerstand en weerstand van cytoplasma in beeld brengen.

5 Complexe systemen

Onvoorspelbaar en georganiseerd gedrag

Hoofdstukvraag	**Welke kennis over levende systemen heeft inzicht in complexe systemen ons te bieden?**

Inleiding

De vraag waarmee hoofdstuk 1 is begonnen stellen we nog een keer. Inmiddels hebben we kennis over spontane beweging van kleine moleculen over kleine afstanden en de beweging van grotere moleculen met hulp van moleculaire machines. Daarnaast hebben we kennis over signaaltransport als een elektrisch golfverschijnsel. Dit laatste hoofdstuk behandelt de organisatie van atomen en moleculen tot een levend systeem.

Ons lichaam bestaat uit cellen, die weer uit eiwitten bestaan, die op hun beurt weer uit atomen bestaan. We bestaan dus uit dezelfde onderdelen als bijvoorbeeld een steen, of water. Wat maakt ons levend en water niet? In de eerste paragraaf zagen we al dat het zeer lastig is om een goede definitie van leven te geven. We kunnen wel een aantal kenmerken bedenken, maar moeten die altijd allemaal aanwezig zijn? Een muilezel kan zich niet voortplanten, maar leeft wel. Een plant beweegt niet, maar leeft wel. We zagen ook dat deze kenmerken ook niet geheel sluitend zijn. Een robot kan bewegen, kan waarnemen, kan reageren, maar leeft niet. En er zijn twijfelgevallen: leeft een virus nu wel of niet? En een los hart, klaar voor transplantatie? Of een banaan? In dit hoofdstuk zullen we vooral kijken naar één belangrijk aspect van leven: complexiteit. We zullen dit toespitsen op drie onderwerpen: **homeostase, determinisme** en **entropie**. Wat deze begrippen betekenen zal hier worden uitgelegd.

5.1 Homeostase en feedback

Paragraafvraag	Hoe houdt het lichaam zichzelf in evenwicht?

Levende systemen zijn niet alleen opgebouwd uit ingewikkelde structuren, ze zijn ook in staat zichzelf in evenwicht te houden. Je lichaamstemperatuur blijft ongeveer 37 °C, of je nu op een tropisch eiland bent waar het 45 °C is, of dat je op wintersport bent. Natuurlijk heeft dat ook te maken met de hoeveelheid kleren die je aantrekt, maar ook je lichaam is in staat dezelfde temperatuur te behouden terwijl de omgevingstemperatuur verandert. We noemen dit 'in evenwicht houden' **homeostase**. Je vindt het overal in de natuur, van de hoeveelheden van bepaalde stoffen in het bloed, tot de hoeveelheid konijnen en vossen in een bepaald gebied. Hoe komt het dat levende systemen zich in evenwicht kunnen houden? Is een ecosysteem ook leven?

Evenwicht is meestal niet vanzelfsprekend, het moet actief onderhouden worden. Misschien weet je nog van de lessen over elektrische systemen (Domotica) hoe een thermostaat werkt: de thermostaat is verbonden met de kachel en met een thermometer. Als het koud is, wordt dat gemeten met de thermometer en door de thermostaat doorgegeven aan de kachel. Die gaat dan branden. Als het warm genoeg is, gaat de kachel via hetzelfde systeem weer uit. Een dergelijk mechanisme, waarbij datgene wat door het systeem wordt beïnvloedt (de temperatuur van de kamer) ook hetgeen is dat wordt gemeten, noemen we **feedback** of terugkoppeling. Met een feedbackmechanisme kan een systeem zichzelf beïnvloeden. Je vindt dit zeer veel in levende systemen. Soms eenvoudig, waarbij een systeem zichzelf direct beïnvloedt (de pupil van je oog wordt automatisch kleiner wanneer er veel licht is), soms met zeer veel tussenstappen. Dit gebeurt op verschillende schalen. Een paar voorbeelden.

- Op het niveau van DNA zorgt de transcriptie (kopiëren) van DNA voor het maken van eiwitten. Als er genoeg eiwitten zijn, dan zorgt dit er vaak voor dat de transcriptie weer stopt.
- Op het niveau van het organisme zorgt stress er voor dat een gebied in je hersenen (de hypothalamus) een signaal naar de bijnieren stuurt om het stresshormoon cortisol te maken. Op zijn beurt zorgt cortisol er (onder andere) voor, dat de hersenen stoppen met het signaal sturen naar die bijnieren, waardoor de aanmaak van cortisol weer stopt.
- Op het niveau van populaties is er vaak niet genoeg voedsel als er van een bepaalde diersoort teveel exemplaren zijn. Hierdoor zullen dieren overlijden, waardoor de populatie weer afneemt.

Ook wij mensen zijn opgebouwd uit een heleboel van dit soort systemen. Van het kleinste molecuul tot complete organen zijn onze systemen bezig allerlei aspecten van ons lichaam in evenwicht te houden. Een belangrijk verschil tussen levende en niet levende systemen is dat de levende zichzelf in evenwicht houden.

Verdieping: negatieve en positieve feedback

Alle besproken gevallen zijn voorbeelden van zgn. **negatieve feedback**: een systeem beïnvloedt zichzelf op een dusdanige manier, dat het zichzelf remt. Als de temperatuur in de kamer hoger wordt, dan stopt de kachel. Zo ontstaat evenwicht.

Er bestaat ook **positieve feedback**. In dat geval beïnvloedt een systeem zichzelf op een dusdanige manier, dat het zichzelf versterkt. Dit zorgt ervoor dat het systeem juist uit evenwicht raakt. Denk maar wat er zou gebeuren, als een hogere temperatuur ervoor zou zorgen dat de kachel harder zou gaan branden. Binnen de kortste keren zou het veel te warm zijn in de kamer. Of als het al koud was, dan zou de kamer nooit opwarmen, doordat de kachel nauwelijks aan zou gaan. Positieve feedback zorgt er dus voor dat dingen steeds sneller toe- of afnemen. Je zou misschien denken dat dit in de levende natuur niet voorkomt, maar dit is niet waar. Ook positieve feedback is soms belangrijk. Bijvoorbeeld bij bevallingen: weeën zorgen ervoor dat een hormoon genaamd oxytocine in het bloed komt. Dit hormoon stimuleert op zijn beurt weer de weeën. Zo komen de weeën tijdens een bevalling steeds heftiger en sneller achter elkaar. Natuurlijk is er uiteindelijk wel een rem nodig, anders zouden de weeën nooit meer stoppen! Ook het openen van de natriumkanalen die we in de vorige paragraaf zagen is een voorbeeld van positieve feedback: door het openen van de kanalen gaat de spanning omhoog, waardoor er nog meer kanalen openen en de spanning nog sneller stijgt. Ook in dit systeem is een rem aanwezig: als de kaliumkanalen openen, dan zakt de membraanspanning weer

Als een evenwicht verstoord wordt in een biologisch systeem, heeft dit vaak vergaande consequenties. Zo is suikerziekte (diabetes) een voorbeeld van de verstoring van een evenwicht. Insuline zorgt er normaal gesproken voor dat suiker (glucose) wordt opgenomen uit het bloed. Bij suikerziekte is het lichaam minder gevoelig voor insuline, waardoor de glucose niet meer wordt opgenomen en er dus heel veel glucose in het bloed komt. Hierdoor gaat je lichaam meer insuline maken, waardoor er ook zeer veel insuline in het bloed komt. Dit heeft echter als effect, dat het lichaam nog minder gevoelig wordt voor insuline. Zo zie je dat wat begon als een kleine verstoring van een evenwicht, zichzelf kan versterken en zo steeds erger kan worden. Ook zien we in dit voorbeeld, dat meerdere feedback systemen samenwerken (hier: de aanmaak van insuline door de glucosespiegel en de gevoeligheid voor insuline door de insulinespiegel), het nog helemaal niet zo gemakkelijk is te zeggen wat er precies zal gebeuren. Dit is het onderwerp van paragraaf 5.3.

Internet

Je vindt allerlei voorbeelden van feedback als je de term *terugkoppeling* invult in de zoekvensters van www.kennislink.nl en www.natuurkunde.nl.

5.2 Onvoorspelbaarheid, determinisme en chaos.

Paragraafvraag	Kun je natuurwetten maken voor onvoorspelbare systemen?

Inleiding: Toekomst voorspellen

Een levend systeem is een complex systeem, gekenmerkt door een zekere mate van onvoorspelbaar gedrag. Als onvoorspelbaarheid zo kenmerkend is voor levende systemen, is het gedrag ervan dan wel in wetmatigheden te beschrijven en kunnen daar voorspellingen mee worden gedaan?

Als een natuurkundige om zich heen kijkt, probeert hij (of zij) datgene wat hij ziet in wiskundige modellen te vangen. Dit doet hij om een goede beschrijving te kunnen geven van wat hij ziet, maar ook om voorspellingen te kunnen doen. Een belangrijk onderdeel van elk wiskundig model of natuurkundige theorie is wat je ermee kunt voorspellen. Je kunt bijvoorbeeld met de formules voor versnelling en de theorie van zwaartekracht voorspellen wat er zal gebeuren als je een bal uit het raam gooit. We noemen dit **determinisme**: als je genoeg weet van wat er nu aan de hand is (de hoogte, de valversnelling, de snelheid waarmee je gooit, eventueel de wind), dan weet je wat er in de toekomst gaat gebeuren. Als een natuurkundige naar de biologie kijkt, zal hij dus ook een theorie willen maken waarmee hij kan voorspellen wat er gebeurt. Maar kan dat wel altijd?

Sommige systemen kunnen we niet voorspellen, ook al weten we precies wat er aan het begin aan de hand is (voorbeelden: dubbele slinger, het weer). Dit noemen natuurkundigen **deterministische chaos**. Bij de dubbele slinger is de natuurkunde niet anders dan voor de enkele slinger, het bestaat uit hetzelfde materiaal, er geldt dezelfde zwaartekracht en we weten precies waar en hoe we hem loslaten. Toch kunnen we de enkele slinger nauwkeurig voorspellen en de dubbele niet.

Internet

Bekijk een filmpje van de dubbele slinger op:
http://nl.youtube.com/watch?v=Whvl6CikDxA

Bouw er zelf een met twee latjes en een paar splitpennen. Wil je gaan videometen, dan kun je beter een wat stabieler model bouwen, zie:
http://www.instructables.com/id/The-Chaos-Machine-Double-Pendulum/

Denk nu nog eens als een natuurkundige aan een biologisch systeem, bijvoorbeeld het menselijk lichaam. We zagen dat het een geheel is van een heleboel feedbackmechanismen, die zichzelf op allerlei manieren in evenwicht houden en elkaar beïnvloeden. Zal het dus gemakkelijk zijn om de toekomst te voorspellen voor een heel lichaam? Het zal afhangen van naar welk stukje lichaam je kijkt, maar de toekomst voorspellen is voor een levend

lichaam veel moeilijker dan voor een tennisbal. En dit is een belangrijk verschil tussen levende en niet levende natuur.

Levende systemen bestaan vaak uit zeer veel verschillende onderdelen, die elkaar en via-via zichzelf beïnvloeden. Hierdoor is het lastiger om er modellen voor te maken, ondanks het feit dat ze uit dezelfde onderdelen bestaan als niet levende systemen, bijvoorbeeld een rots. Maar is dit niet precies wat die verzameling atomen ook levend maakt en die van een rots niet?

Begrippen

Homeostase
Feedbackmechanisme
Negatieve feedback
positieve feedback
Determinisme
Deterministische chaos

Samenvatting

Homeostase is het vermogen van het systeem "het menselijk lichaam" om zichzelf in evenwicht te houden Precies dit zichzelf in evenwicht houden is wat sommige mensen als het verschil tussen levende en niet levende systemen zien.

Met een **feedbackmechanisme** kan een systeem zichzelf beïnvloeden.

Een systeem met **negatieve feedback** beïnvloedt zichzelf op zo'n manier, dat het zichzelf remt. Een systeem met **positieve feedback** beïnvloed zichzelf op zo'n manier, dat het zichzelf versterkt.

De **deterministische visie** op de natuurkunde zegt dat de toestand 'nu' de de toestanden in de toekomst geheel bepalen. Alles heeft een oorzaak. Toch kunnen we soms toch de toekomst niet voorspellen. Het gedrag van een dergelijk onvoorspelpaar systeem noemen we **deterministische chaos**.

5.3 Entropie en complexiteit

Paragraafvraag	Waarom springt een gebroken vaas niet meer terug in elkaar?

We zagen al eerder dat het menselijk lichaam een zeer complex, maar tegelijk zeer georganiseerd geheel is. Op elk niveau zitten alle onderdelen in een duidelijke structuur: elk atoom heeft zijn eigen plek in het DNA, je DNA zit in de celkern en zwemt niet zomaar door de cel en je organen zitten niet zomaar los in je buik. Dit is natuurlijk maar goed ook, want anders zouden een heleboel processen in je lichaam niet goed werken. Het is echter niet gratis. Misschien is het je wel eens opgevallen dat je kamer altijd vanzelf een rotzooi wordt, terwijl het flink moeite kost om hem weer op te ruimen. Zo werkt het in de natuur ook: organisatie kost energie. Natuurkundigen noemen dit principe de tweede hoofdwet van de thermodynamica (de eerste is het principe dat energie nooit verloren gaat, maar steeds weer omgezet wordt, zie het tekstkader "Eerste hoofdwet"). We zullen hier nu eens nader naar kijken.

Eerste hoofdwet

De eerste hoofdwet van de thermodynamica stelt dat energie nooit verloren gaat. Energie wordt alleen maar omgezet van de ene vorm in de andere. Denk maar aan een brommer: die zet de chemische energie in de benzine om in bewegingsenergie en warmte. Je zult je misschien afvragen waarom er dan een energieprobleem is op de wereld. Dat komt doordat niet alle energie even nuttig is. Elke keer als je energie omzet, bijvoorbeeld van elektrische energie in beweging in een staafmixer, wordt een deel van de oorspronkelijke (hier: elektrische) energie niet omgezet in datgene wat je nodig hebt (hier: beweging), maar in warmte. Met die warmte kunnen we niks en die is in die zin dus toch 'verloren'. Hoe het komt dat er altijd een deel wordt omgezet in warmte, heeft te maken met de tweede hoofdwet, die we hier behandelen.

Microtoestanden en macrotoestanden

We zagen al eerder in deze module dat er soms een verschil is tussen micro- en macroniveau en dat op verschillende niveaus dingen soms net anders werken. Toch kun je soms door goed naar het microniveau te kijken, verklaren hoe iets op het macroniveau werkt. Bijvoorbeeld bij gassen kun je verklaren hoe een hele ruimte gevuld wordt met gas, door na te denken wat individuele moleculen doen. Maar heeft alles wat er op microniveau gebeurt gevolgen voor het macroniveau?

Een voorbeeld: een hoeveelheid water bestaat uit watermoleculen. Deze watermoleculen bestaan ieder weer uit twee waterstofmoleculen en één zuurstofmolecuul. Denk nu eens aan een glas water. We kijken naar een molecuul onderin het glas water en naar een molecuul bovenin het glas water. Zou het voor het glas water uitmaken als die twee moleculen van plaats zouden wisselen? Of als in het onderste molecuul de twee waterstofmoleculen van plek zouden wisselen? Natuurlijk niet, het is nog steeds hetzelfde glas water (als je dorst hebt, maakt het je weinig uit waar binnen het glas water de moleculen precies zitten). Een natuurkundige zou zeggen: verschillende **microtoestanden** (op het niveau van moleculen) corresponderen met dezelfde **macrotoestand** (een glas water). Dit is meestal zo: er zijn meestal een heleboel microtoestanden mogelijk die voor dezelfde macrotoestand zorgen.

Figuur 5.1 Een Royal flush.

Micro- en macrotoestand

Een **microtoestand** is de beschrijving van een specifieke, gedetailleerde toestand van een systeem, op kleinere (micro)schaal.
Een **macrotoestand** daarentegen beschrijft de macroscopische eigenschappen van een systeem, zoals de temperatuur of de druk.

Meestal corresponderen meerdere microtoestanden met één enkele macrotoestand. Het aantal microtoestanden dat correspondeert met één macrotoestand noemen we de **multipliciteit** Ω.

Tekstvraag

Je gooit met twee dobbelstenen. Hoeveel microtoestanden zijn er voor de macrotoestand "4 ogen"?

Een ander voorbeeld: een hand met poker van vijf speelkaarten. Elke combinatie van vijf kaarten vormt een microtoestand. Elke microtoestand is even waarschijnlijk. Stel nu dat we de macrotoestand "Royal Flush" bekijken (zie figuur 5.1). Met deze macrotoestand corresponderen vier microtoestanden (een Royal flush van respectievelijk harten, klaveren, schoppen en ruiten), oftewel de multipliciteit is vier. Dit zijn er veel minder dan het totaal aantal handen dat je gedeeld kunt krijgen (2,6 miljoen). Van deze enorme hoeveelheid corresponderen er maar vier met een Royal flush.

Entropie

Goed, zul je misschien zeggen, die micro- en macrotoestanden zijn leuk en aardig, maar waar heb ik ze voor nodig? Voor natuurkundigen is dit onderscheid tussen micro en macro interessant, omdat ze op deze manier de mate van ordening meten. Weet je jouw rommelige kamer nog? Er zijn een heleboel manieren waarop je kamer een zooitje kan zijn, maar er zijn maar weinig manieren waarop hij er netjes uitziet. Op dezelfde manier definiëren natuurkundigen orde: hoe groter het aantal microtoestanden dat overeenkomt met een macrotoestand (hoe groter de multipliciteit dus), hoe groter de wanorde. Deze wanorde wordt **entropie** genoemd. Een Royal flush is een stuk ordelijker dan al die andere waardeloze combinaties van vijf kaarten die je kunt krijgen. De kans dat je een Royal flush gedeeld krijgt, is dus ook vele malen kleiner dan een waardeloze combinatie.

Tweede hoofdwet

We zijn nu klaar voor de tweede hoofdwet. Entropie is inmiddels gedefinieerd als een maat voor wanorde. En net als met het opruimen van je kamer, kost het energie om de wanorde te laten afnemen (zie figuur 5.2). Als je de entropie wilt laten afnemen, dan kost dit energie.

Figuur 5.2 Ervaring uit het dagelijks leven.

Dit is precies wat de **tweede hoofdwet van de thermodynamica** zegt:

Tweede Hoofdwet

De tweede hoofdwet van de thermodynamica stelt: de **entropie** van een geïsoleerd systeem dat niet in evenwicht is zal altijd toenemen.

Als we de **entropie** toch willen laten afnemen, kost dit energie. Het oorspronkelijke systeem is dan niet meer geïsoleerd van de omgeving. Wij voegen immers energie aan het systeem toe.

Formules - Entropie

De definitie van entropie is:

$$S = k \cdot \ln \Omega$$

Symbolen: S is de entropie in Joule per Kelvin ($J \cdot K^{-1}$), Ω is de multipliciteit: het aantal microtoestanden dat tot dezelfde macrotoestand leidt (zonder eenheid), k is de constante van Boltzmann in Joule per Kelvin ($J \cdot K^{-1}$). Let op: ln staat voor de "natuurlijke logaritme" op je rekenmachine en niet voor de $^{10}\log$.

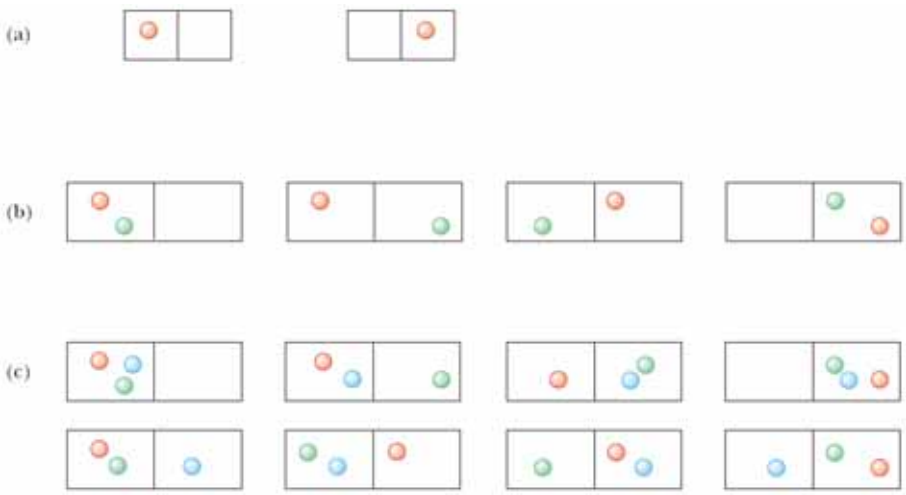
Het woord "geïsoleerd" in de tweede hoofdwet is heel belangrijk. Wij kunnen altijd ingrijpen van buiten het systeem. Dit kost dan dus wel energie. Met het opruimen van het systeem "jouw kamer" is de entropie van jouw kamer afgenomen, maar de entropie van het gehele universum is toegenomen. Bedenk dat het jou energie kostte om te kunnen opruimen (je moest eten).

Wanneer we aannemen dat iedere microtoestand even waarschijnlijk is, dan geldt het volgende: de kans dat een systeem vanuit een geordende macrotoestand in een wanordelijke macrotoestand terecht komt is vele malen groter dan de kans op de omgekeerde overgang. Beschouwen we een systeem en zijn omgeving zo dat het hele universum erdoor omsloten wordt, dan concluderen we dat het universum altijd bezig is met het veranderen naar een meer wanordelijke macrotoestand. Een andere manier om de tweede hoofdwet te formuleren is dus dat de entropie van het universum alleen maar kan toenemen (de wanorde zal toenemen).

De tweede hoofdwet is een statistische onvermijdelijkheid: er zijn relatief heel veel wanordelijke microtoestanden. Stel je het volgende eenvoudige systeem voor: honderd willekeurige bewegende moleculen in een bak. De moleculen kunnen zich links, of rechts van het midden bevinden. Eén molecuul heeft een kans van 0,5 (50%) om zich links van het midden te bevinden (figuur 5.4a). Bij twee moleculen is de kans dat ze beiden links zitten $(0,5)^2$, oftewel 1 op 4 (figuur 5.4b). Bij drie moleculen is de kans dat ze gedrieën links zitten $(0,5)^3$, ofwel 1 op 8 (figuur 5.4c). De kans dat van de honderd moleculen de vijftig snelste zich links van het midden bevinden, is $(0,5)^{50}$. De kans dat de overige vijftig langzame moleculen zich rechts van het midden bevinden is eveneens $(0,5)^{50}$. De kans dat deze snel/langzaam-scheiding daad werkelijk plaatsvindt, is het product van deze twee kansen$(0,5)^{50} \cdot (0,5)^{50}=(0,5)^{100}$. Dit is ongeveer een kans van 1 op de 10^{30}. Dit voorbeeld was maar voor 100 moleculen. Een mol gas bevat ongeveer 10^{23} deeltjes. Stel je eens voor hoe extreem klein de kans voor een dergelijk veeldeeltjes-systeem is om het in een bepaalde geordende toestand aan te treffen. Het kan dus wel, maar de kans is zo klein dat we langer dan de leeftijd van het universum zouden moeten wachten, totdat het een keer zou gebeuren. Het systeem zal spontaan neigen naar een meer wanordelijke toestand. De betekenis van het woord "spontaan" is belangrijk hier. Natuurlijk kunnen we arbeid op het systeem verrichten, zodat we wel een ordelijke toestand krijgen, maar spontaan gebeurt het niet. Het is niet zo dat het systeem iets van orde, volgorde of willekeurigheid "afweet", er zijn gewoonweg veel en veel meer wanordelijke toestanden dan ordelijke toestanden.

Valkuil

Bedenk dat je entropie alleen maar met orde en wanorde in verband mag brengen, als je goed weet waar je het over hebt. Als je wit en zwart zand gaat mixen, zal het van een afstand er grijs en uniform uitzien. Dit is niet wat we met ordelijk bedoelen. Geordend betekent: gesorteerd op een bepaalde manier. Op het moment dat we alle witte zandkorrels sorteren en alle zwarte en je ziet een kleurscheiding, dan bedoelen we dat met geordend.



Figuur 5.4 Een systeem van willekeurig bewegende moleculen in een bak.

De tweede hoofdwet is niet zomaar een wet, het is een hoofdwet: hij is dus zeer belangrijk. Deze wet verklaart waarom een gebroken vaas niet zomaar weer in elkaar springt (de entropie van een gebroken vaas is groter). Het is niet onmogelijk dat dit gebeurt, het is gewoonweg zeer, zeer onwaarschijnlijk. De tweede hoofdwet verklaart ook waarom warmte niet van een koud object naar een warm object stroomt (de entropie van twee even warme ob-

jecten is groter dan die van een warm en een koud object). Deze processen zijn (bijna) onomkeerbaar. Hierdoor geeft de tweede hoofdwet een richting aan van de tijd. Als je een filmpje ziet van een vaas die breekt en eentje waarin de scherven weer een vaas gaan vormen (de tijd is omgekeerd), haal jij direct het goede filmpje eruit. De tweede hoofdwet van de thermodynamica vertelt je dat je gelijk hebt.

De tweede hoofdwet is zeer belangrijk voor leven. De wet zegt dat we energie nodig hebben om de gestructureerde, georganiseerde en complexe verzameling atomen die we zijn te blijven. Een belangrijke eigenschap van leven is: energie kunnen gebruiken om zichzelf te structureren tot een georganiseerd complex geheel.

Begrippen

Microtoestand
Macrotoestand
Multipliciteit
Entropie
Tweede hoofdwet van de thermodynamica

Samenvatting

Een **microtoestand** is de beschrijving van een specifieke, gedetailleerde toestand van een systeem, op kleinere (micro)schaal.
Een **macrotoestand** daarentegen beschrijft de macroscopische eigenschappen van een systeem, zoals de temperatuur of de druk.

Meestal corresponderen meerdere microtoestanden met een enkele macrotoestand. Het aantal microtoestanden dat correspondeert met één macrotoestand noemen we de **multipliciteit** Ω.

De definitie van **entropie** is:

$$S = k \cdot \ln \Omega$$

De **tweede hoofdwet van de thermodynamica** stelt: de entropie van een geïsoleerd systeem dat niet in evenwicht is zal altijd toenemen.

Als we de entropie toch willen laten afnemen, kost dit energie. Het oorspronkelijke systeem is dan niet meer geïsoleerd van de omgeving. Wij voegen immers energie aan het systeem toe.

Opgaven

bij §5.3

33
Een druppel groene inkt valt in een bak met helder water. Beschrijf met de kennis van hoofdstuk 2 wat er zal gebeuren. Leg nu uit wat er gebeurt. Gebruik in je antwoord het begrip entropie.

34
Je hebt een blokje metaal.

a. Hoe kun je de entropie van het blokje metaal laten toenemen?

b. Hoe kun je de entropie van het blokje metaal laten afnemen?

35

Leg uit op welke manier in de volgende situaties de entropie van het universum is toegenomen.

a. Je bakt een brood.
b. Je eet het brood op.
c. Je roert zout door kraanwater.
d. Er valt een ei stuk op de grond.
e. Een watergolf komt tot stilstand op een zandkasteel.
f. Je zaagt een boom om.
g. Een auto verbrandt benzine.

36 Discussiestelling

Bespreek in een groepje de volgende vragen:

- Als je de plaats en snelheid van elk onderdeel, elk atoom van een systeem weet, kun je dan de toekomst van dat systeem voorspellen?
- Heeft een opgeruimde kamer meer of minder entropie dan een rommelige?
- Wat betekent het dat de tweede hoofdwet van de thermodynamica gebaseerd is op statistiek?

37

Een klasgenoot vertelt dat het even waarschijnlijk is dat alle luchtmoleculen in een kamer zich in één hoek bevinden (en de rest van de kamer geen lucht bevat: vacuüm) als de situatie waarin ze allemaal uniform verspreid zijn door de gehele kamer. Is dit juist? Waarom kom je de situatie die jouw klasgenoot beschrijft zo weinig tegen?

38

Zegt de tweede hoofdwet van de thermodynamica dat het universum zich naar een meer geordende toestand ontwikkelt, of naar toestand met meer wanorde?

39

Waarom zeggen we dat een stof die zich in de vloeibare fase bevindt, wanordelijker is dan dezelfde stof in de vaste fase?

40

Je gooit met twee dobbelstenen.

a. Bereken de multipliciteit van de worp “12”, oftewel hoeveel microtoestanden corresponderen er met de macrotoestand 12?
b. Bereken de multipliciteit van de worp “7”.
c. Bereken de multipliciteit van de worp “3”.
d. Bereken van de worpen “12” , “7” en “3” de entropie. Vanuit het oogpunt van entropie, wat is de meest wanordelijke toestand, wat is de meest geordende toestand?

41

Stel je voor: je gooit vier munten op. Vervolgens noteer je de uitkomst: het aantal keer "kop" (K) en het aantal keer "munt" (M).

a. Maak een tabel van alle mogelijke macrotoestanden en de microtoestanden die hierbij horen. Als voorbeeld: KKMK en KMKK zijn twee microtoestanden die corresponderen met de macrotoestand "Eén keer munt en drie keer kop".
b. Wat is de meest waarschijnlijke uitkomst?
c. Bereken van elke macrotoestand de multipliciteit (het aantal microtoestanden per macrotoestand) en de entropie.
d. Wat is de meest geordende toestand?
e. Wat is de meest wanordelijke toestand?

42

Stel je voor: je trekt willekeurig vier kaarten van een compleet pak speelkaarten (52 stuks).

a. Je krijgt vier boeren. Hoeveel microtoestanden corresponderen er met de macrotoestand "vier boeren"?

Je trekt nu willekeurig twee kaarten van een compleet pak speelkaarten (52 stuks).

b. Je krijgt twee azen. Hoeveel microtoestanden corresponderen er met de macrotoestand "twee azen"?
c. Welke macrotoestand is waarschijnlijker? Komt deze conclusie overeen met de waarde die er in poker aan deze twee "handen" toegekend wordt (een paar azen is minder waard dan een carré boeren)?

43

a. Bespreek het verband tussen de tweede hoofdwet van de thermodynamica en levende systemen.
b. Als systemen de neiging hebben, van ordelijk naar wanordelijk te evolueren, hoe verklaar je dan groei, ontwikkeling en toenemende complexiteit in levende organismen?