

Chemische Feitelijkheden

#342
Editie 85
april 2018

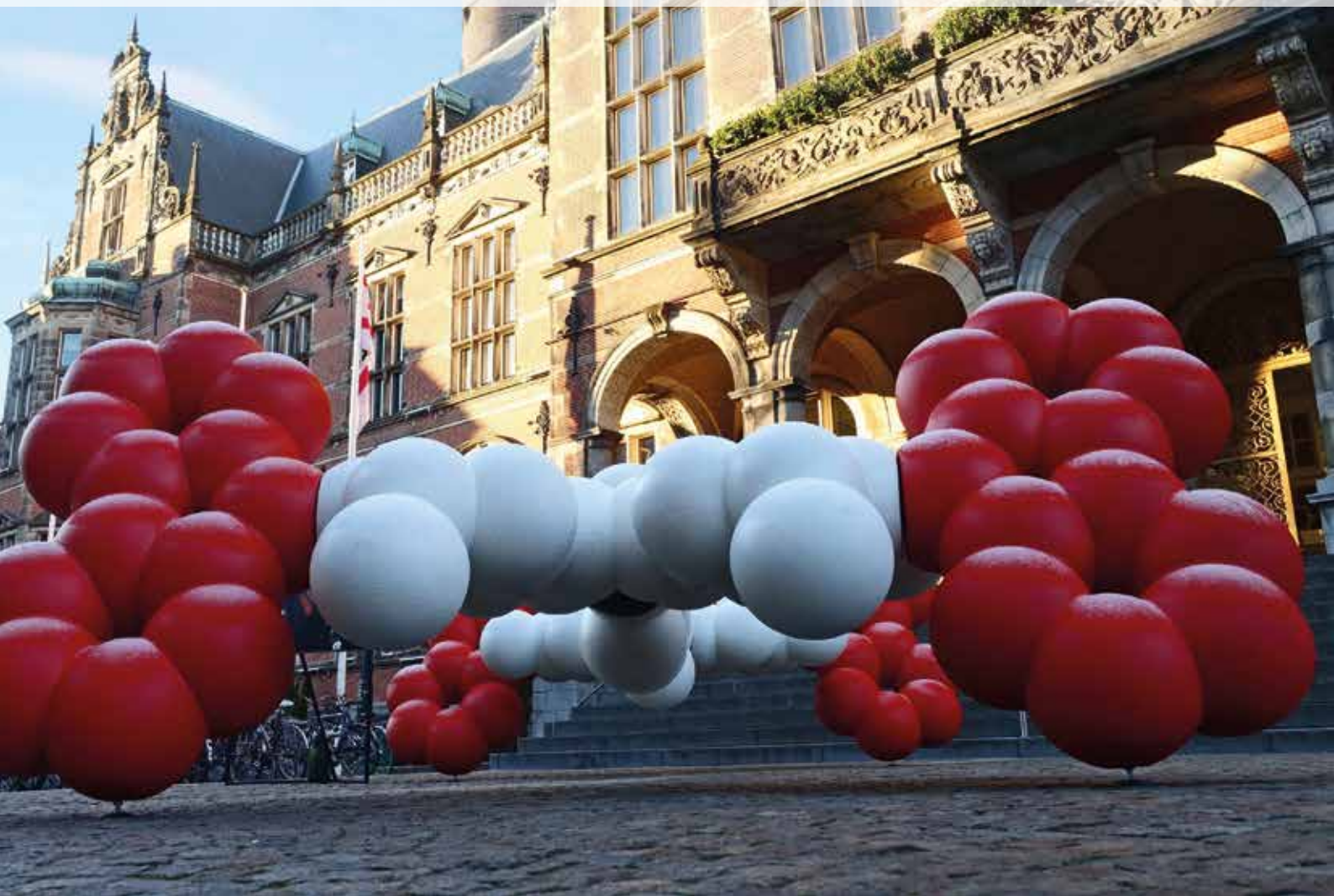
Arno van 't Hoog

Nanomotoren

Nieuwe nanomachines

Als je er goed over nadenkt, zijn mensen gewoon een grote verzameling van moleculaire motoren. Wie zijn arm optilt, activeert namelijk miljarden myosine-motoreiwitten, die piepkleine stapjes van 10 nm maken. En de binnenkant van onze cellen lijkt op een logistiek centrum waar lopende banden en vrachtwagens goederen ophalen en afleveren.

Chemici en materiaalwetenschappers proberen zulke functies te vangen in nieuwe moleculen en structuren. Dat lukt vaak al heel aardig, getuige diverse moleculaire schakelaars en zelfs een bewegende nano-auto. Toch moet de wetenschap nog veel obstakels overwinnen. In de nanowereld gedragen technische ontwerpen zich namelijk heel anders dan je zou verwachten.



Nieuwe nanoma

Alles in de biologie wordt vanuit de nanowereld gedreven door moleculaire motoren. Kunnen we die kennis vertalen in toepassingen? Diverse prototypes leveren al opmerkelijke prestaties, van gif opsporen en afbreken, via eiwitten bouwen van tot kankercellen doorboren.

Leven is bewegen, en zonder beweging geen leven. Het is zo'n universele wetmatigheid dat het haast een Cruyffiaanse uitspraak lijkt. Neem een eenvoudige celdeling, waarvan er in ons lichaam dagelijks miljarden plaatsvinden. Een onzichtbare machinerie verpakt en sorteert 2 m kronkelend DNA netjes in twee gelijke sets compacte chromosomen en transporteert die in tegengestelde richting naar het uiteinde van de cel.

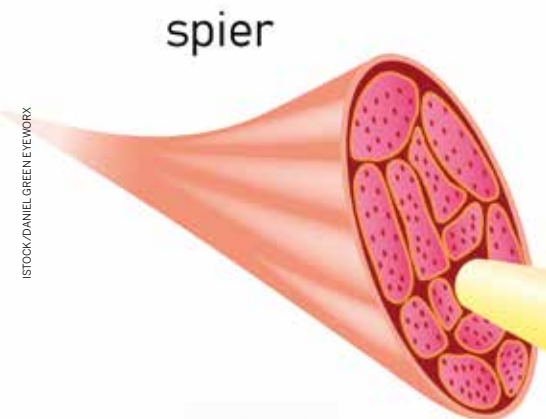
Hoe dat precies in zijn werk gaat, begint duidelijk te worden. In 2018 zagen onderzoekers van de Technische Universiteit Delft met een speciale microscoopstechniek hoe een zogenoemd condensine-eiwit een stuk DNA tot een lus trekt, een belangrijke handeling in het verpakkingsproces van DNA in een chromosoom. Condensine heeft twee lange armen die het DNA herhaaldelijk vastpakken en met grote slagen binnenhalen. De energie voor die grijp- en trekbeweging haalt condensine uit de universele energiedrager in de cel: ATP.

Als een treintje

Het gegeven dat moleculaire motoren de chemische energie uit ATP omzetten in een eenvoudige beweging ligt aan de basis van het leven. We staan er niet vaak bij stil, maar het functioneren van elke cel draait om zulke eiwitten die nanotaakjes uitvoeren. Moleculaire motoren grijpen, trekken, koppelen en sleuren van alles als een treintje over eiwitrails in de cel. Ze transporteren bijvoorbeeld RNA uit de kern en verplaatsen eiwitcomplexen naar de juiste

plek. Het zijn dezelfde onzichtbare motoren die cellen insnoeren tijdens de deling, of witte bloedcellen 'voetjes' geven om richting een bacterie te kruipen. Binnen het machinepark met moleculaire motoren bestaan allerlei varianten, namelijk veertig myosines, veertig kinesines en twaalf dyneïnes.

De motoreiwitten regelen eindeloos veel processen, maar een van de meest zichtbare zijn spierbewegingen. Die ontstaan door stapsgewijze 'loopbeweging' van het motoreiwit myosine II. Een enkel myosine-motoreiwit beweegt maar 5 tot 10 nm en creëert een nauwelijks meetbare kracht. Maar de gecombineerde beweging van tien bil-



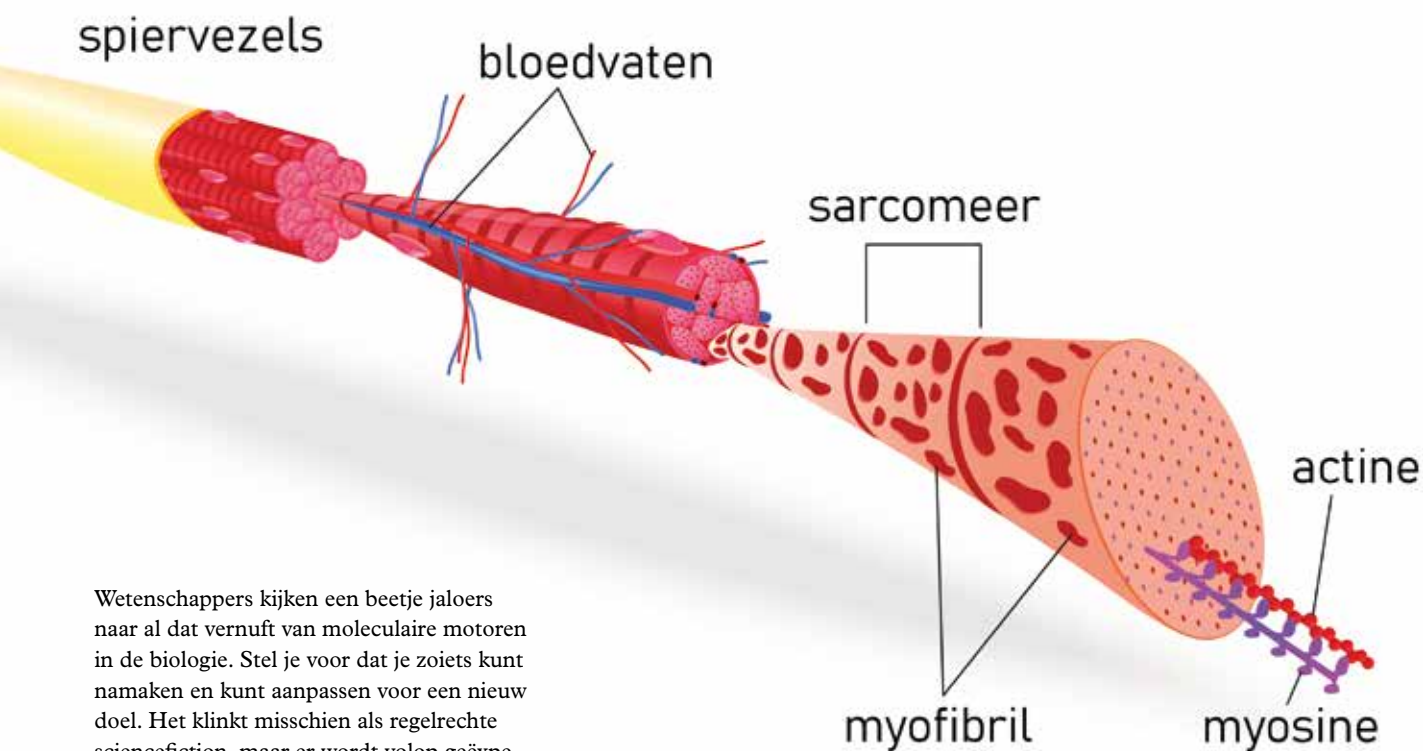
joen van zulke motoreiwitten kan een gewicht van 5 kg verplaatsen. Bundel flink wat myosine-motoreiwitten in lange spiervezels, hecht ze vast aan botten en gewrichten, en je krijgt voldoende trekkracht om een boodschappentas te tillen. Precies dat samenspel van ontelbaar veel onzichtbare moleculaire nanomotortjes creëert in ons dagelijks leven beweging en functies: van ademhalen en slikken tot lopen en springen.

► Cellulaire treintjes

Cellen in ons lichaam kunnen rare vormen aannemen, en moleculaire motoren moeten de verste uithoeken van die vormen weten te bereiken. Het meest extreem zijn waarschijnlijk de motorneuronen die vanuit de onderrug spieren in de voeten aansturen. Ze hebben een lengte van ongeveer 1 m. Het cellichaam met celkern van waaruit alles wordt geregeld zit aan een uiteinde en is piepklein in verhouding tot de enorme zenuwvezel. Stel dat het cellichaam het formaat van een pingpongbal zou hebben, dan is de zenuwvezel maar liefst 380 m lang.

Deze verhoudingen laten zien hoe belangrijk moleculaire motoren zijn. In het cellichaam worden bijvoorbeeld eiwitten en blaasjes met neurotransmitters gemaakt, die samen met complete mitochondriën naar het uiteinde van de zenuw moeten worden getransporteerd. Om dat voor elkaar te krijgen, lopen microtubuli als een soort eiwitrails over de hele lengte van de zenuwvezel. Motoreiwitten als kinesines en dyneïnes haken met een uiteinde vast aan de vracht en nemen het op transport via de microtubuli. Dit verloopt met een snelheid van 5 tot 40 cm per dag. Ook vervoeren motoreiwitten blaasjes met afval weer terug naar het cellichaam. Dat zulk transport van levensbelang is, blijkt bij het ontstaan van neurodegeneratieve ziektes als ALS en parkinson. Zodra de beweging van moleculaire transportmotoren wordt gehinderd, ontstaan allerlei afwijkingen, waardoor motorneuronen en andere zenuwcellen uiteindelijk te gronde gaan.

chines



Wetenschappers kijken een beetje jaloers naar al dat vernuft van moleculaire motoren in de biologie. Stel je voor dat je zoiets kunt namaken en kunt aanpassen voor een nieuw doel. Het klinkt misschien als regelrechte sciencefiction, maar er wordt volop geëxperimenteerd met de bouw en ontwikkeling van kunstmatige moleculaire motoren. Dat de Groningse hoogleraar Ben Feringa in 2016 de Nobelprijs ontving voor zijn pionierswerk aan een deelgebied van nanomotoren, geeft aan dat er al flinke stappen zijn gezet en welke potentie men ziet. Zijn onderzoek werd bij het brede publiek vooral bekend door de ontwikkeling van een nano-auto (zie illustratie op pagina 5).

Niet uit een visioen

Het onderzoek waar Feringa samen met Jean-Pierre Sauvage en Sir Fraser Stoddart de Nobelprijs voor ontving, ontstond niet uit een sciencefictionachtig visioen. Zoals vaker in de wetenschap, leidt fundamenteel onderzoek eerst tot verrassende inzichten

en later pas tot toepassingen. Zo werkte Jean-Pierre Sauvage begin 1980 aan fotochemie: door licht gestimuleerde chemische reacties. Bij een van die reacties wist hij met een koper-ion als centrum twee ringvormige moleculen op elkaar te laten inhaken, als twee schakels in een ketting. Zulke moleculen heten catenanen, van het Latijnse woord voor ketting: *catena*.

Het schakelen van ringvormige moleculen was weliswaar eerder gelukt – de term catenaan is al in 1960 verzonnen – maar de opbrengst was altijd heel laag. De kopermethode van Sauvage gaf een grote opbrengst en daarmee opende hij een nieuw onderzoeksveld van knoop- en vlechtche-

mie. Tegelijkertijd realiseerde hij zich dat er meer mogelijkheden waren. Moleculen die mechanisch aan elkaar gekoppeld zijn, maar ten opzichte van elkaar kunnen bewegen, hebben immers de kenmerken van radertjes in een machine. Dat principe liet hij in 1994 zien door het ene ringmolecuul stapsgewijs ten opzichte van het andere te laten draaien.

Het laboratorium van Fraser Stoddart ontwikkelde ongeveer tegelijkertijd een ander prototype moleculaire motor, toen hij een ring rond een staafvormig molecuul wist te sluiten. Zo ontstond een zogenoemd rotaxaan, een afkomstig van het Latijn voor wiel (*rota*) en as (*axis*).

De staaf heeft brede uiteindes, waardoor de ring er niet vanaf kan schuiven. Een paar jaar later lukte het Stoddart om de ring stapsgewijs te laten bewegen langs de as.

Met de basisstructuur van rotaxanen zijn meer biologische structuren gemaakt, zoals twee rotaxaan-moleculen die langs elkaar glijden, als het motoreiwit myosine in een spiervezel. Er is in 2013 zelfs een moleculaire machine gemaakt die globaal hetzelfde doet als een ribosoom – de eiwitfabriek in de cel: via ingenieuze synthesestappen rijgt het aminozuren aaneen tot een klein peptide.

► De spermot helpt

De spermot is een van de meer tot de verbeelding sprekende nanomotortoepassingen van de afgelopen jaren. Het idee is dat ontwikkeling van de spermot een nieuwe onvruchtbaarheidsbehandeling kan opleveren: de spermot neemt spermacellen met afwijkingen of geringe zwemkracht op sleeptouw en prikt ze in de eicel.

Sperma-injectie wordt soms al toegepast onder de noemer ICSI, maar dan hanteert een mens een dunne pipet die de spermacel op de juiste plek aflevert. De groep van de Duitse onderzoeker Oliver Schmidt ontwikkelde in 2015 een spiraalvormig polymeer waarvan een uiteinde precies achter het kopje van een spermacel blijft steken. Het polymeer is voorzien van een dunne metaallaag, waardoor het in een roterend magnetisch veld gaat bewegen. Onder de microscoop in een schaalte runderspermacellen ziet het principe van de spermot er veelbelovend uit. Het spiraaltje komt roterend om zijn lengteas aangezwommen, schuift om de staart van een wat mank bewegende spermacel, neemt het dikkopje mee op transport en levert het af bij de eicel. Het belangrijkste volgens de onderzoekers is dat je deze techniek kunt gebruiken onder de omstandigheden waarmee nu al in het ziekenhuis eicellen en spermacellen worden gemanipuleerd. Of deze techniek ooit de labfase ontgroeit, moet de komende jaren blijken.

Lichtpuls

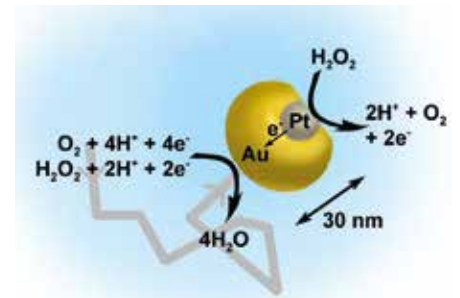
De eerste moleculaire motor staat op naam van Ben Feringa. Hij wist na jaren experimenteren in 1999 de draairichting in een molecuul te controleren met lichtpuls. Het molecuul dat hij daarvoor gebruikte heeft twee platte delen, die lijken op bladen van een rotor, gekoppeld door een dubbele binding die dienstdoet als as. Normaal gesproken draaien beide uiteindes willekeurig ten opzichte van elkaar, maar met slimme chemische trucs kon hij de draairichting controleren. Een omwenteling vraagt vier opeenvolgende stappen, waarbij de energie wordt geleverd door afwisseling van licht en warmte. Dat klinkt traag en omslachtig, maar na een reeks verbeteringen draait de motor inmiddels twaalf miljoen omwentelingen per seconde. Vier van zulke motoren gekoppeld aan een moleculair chassis leverde 's werelds eerste nanoauto.

Feringa's benadering is niet de enige manier om dit te realiseren. Er zijn twee fundamenteel verschillende startpunten om een moleculaire motor of machine te ontwerpen. De ene strategie probeert concepten uit onze wereld na te bootsen op nanoschaal (*technomimetics*). Je kunt zoals de groep van Feringa de draaibeweging van een wiel nabootsen met een wentelende beweging van een molecuul. Koppel twee van zulke moleculen aan een grotere structuur en je krijgt een moleculaire kruiwagen. Op die manier zijn er op nanoschaal ook schakelaars, zuigers of een moleculaire lift nagebootst.

De andere strategie wil juist inspiratie putten uit de biologie (*biomimetics*). Door de bouw en organisatie van moleculaire motoren uit de cel te doorgronden, hopen onderzoekers die kennis te vertalen in het ontwerp van nieuwe machines.

Zwaartekracht

Beide strategieën hebben voor- en nadelen. Uitgaan van machines en mechanismen uit onze wereld begint met goed omschreven kennis, maar tegelijkertijd werken veel logische principes uit onze belevingswereld niet op nanoschaal. Een nano-auto gaat bijvoorbeeld niet uit zichzelf bewegen als je het vlak waarop hij staat schuin zet, zoals een echte auto op een helling. De interactie met het oppervlak is op nanoschaal relatief vele malen sterker dan de invloed van de zwaartekracht. Het effect van de zwaartekracht doet zich gelden via de



De beweging van een bolvormig nanodeeltje van goud en platina in waterstofperoxide wordt veroorzaakt door zogenoemde zelfelektroforese (zie tekst).

massa van een object en een nano-ootje heeft dat nauwelijks. Een slingerende pendule die in onze leefwereld een staartklok aandrijft, heeft op nanoschaal te weinig massa en wordt bovendien geremd door botsende moleculen. En het namaken van een nanomotorblok op basis van brandstof is bij voorbaat onmogelijk.

Op nanoschaal gooien meer onverwachte verschijnselen roet in het eten. In onze beleving is water bijvoorbeeld zacht en vloeibaar, maar voor een nanomachine is het eerder een ballenbak waarvan de ballen heen en weer schieten. Nanomachines in een waterige omgeving botsen per seconde honderden keren op wild bewegende watermoleculen en andere deeltjes, waardoor ze doorlopend van richting veranderen. Dat deeltjesbombardement resulteert in een zogenoemde Brownse beweging: een willekeurige dronkenmansroute die in niets lijkt op een doelgerichte koers die je van een nanomachine zou verwachten. Motoreiwitten in onze cellen hebben manieren gevonden om in zo'n vreemde omgeving efficiënt te werken. Toch leidt het bestuderen van motoreiwitten nog niet direct tot eenvoudig te kopiëren ontwerpregels voor door mensen gemaakte nanomachines. Motoreiwitten en de machinerie van cellen zijn zo complex dat het vooralsnog nauwelijks mogelijk blijkt om er echt ontwerp- en bouwlessen uit te trekken. De biologie levert vooralsnog vooral inspiratie.

Doelgericht

Het onderzoek aan voortstuwing heeft de aandacht van veel chemici en materiaalwetenschappers. Een nanomachine die nuttig werk kan verrichten, moet allereerst kunnen bewegen. Als dat lukt, komt doelgerichte sturing aan de orde, en tot slot het

afleveren van vracht, zoals medicijnen of andere activiteiten, zoals het gericht afbreken van gifstoffen.

Vooral op het vlak van voortstuwing en gerichte beweging van nanomotoren en machines is in het fundamentele onderzoek al veel geprobeerd. Een zo'n categorie van voortbewegende nanodeeltjes zijn cilindrische motoren: dunne nanodeeltjes van verschillende materialen die reageren op geluidsgolven en magnetisme. Zo hebben onderzoekers nanodeeltjes in een cel weten te krijgen en een spermacel op sleeptouw genomen richting een eicel.

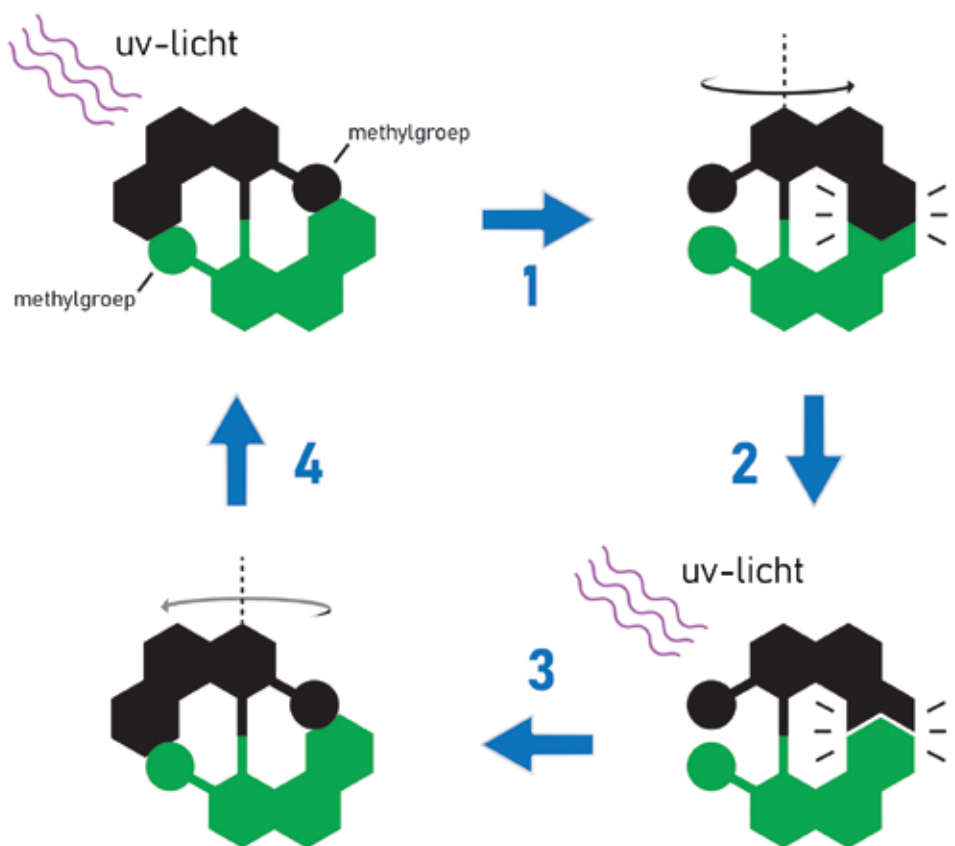
Voortstuwing ontstaat ook door chemische reacties. Zo bereiken massieve nanostaafjes van half goud en half platina in een oplossing van waterstofperoxide een snelheid van twintigmaal de eigen lengte per seconde. Die snelheid is vergelijkbaar met een mens die 80 km/h zwemt. De beweging ontstaat door het fenomeen van zelfelektroforese: de chemische reacties aan het platina en het gouden uiteinde brengen een vloeistofstroom langs het oppervlak op gang. Het aardige van deze staafjes is dat ze bewegen in de richting van de hoogste concentratie waterstofperoxide. In de biologie is die zogenoemde chemotaxis bekend van bacteriën, die zwemmen naar de plek met de meeste suikers en andere voedingsstoffen.

Nanoraketaandrijving

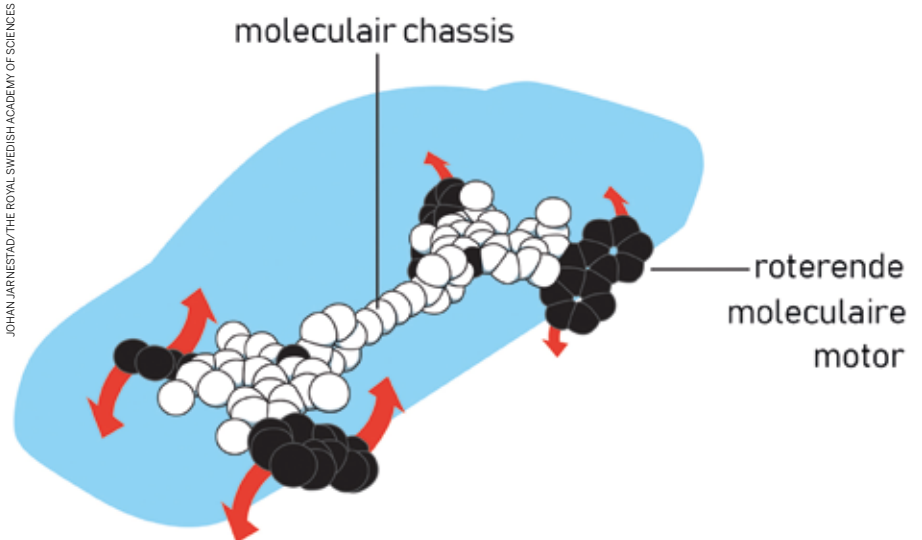
Voortstuwing kun je ook bereiken door opgerolde nanostructuren te maken waar binnenin chemische reacties plaatsvinden, waardoor aan een uiteinde van het buisje een stroompje zuurstof- en waterstofbellen ontstaat. Het is het voortstuwingsmechanisme dat het meest lijkt op nanoraketaandrijving.

Een deeltje hoeft overigens geen staaf- of buisvorm te hebben; er is ook veel ervaring opgedaan met voortbeweging van bolvormige deeltjes. Als je nanobolletjes van titaniumdioxide beschijnt met uv-licht, induceren ze de vorming van radicalen in water of methanol. Via diffusie van die geladen reactieproducten vertaalt de fotochemische reactie zich in mechanische beweging van het deeltje.

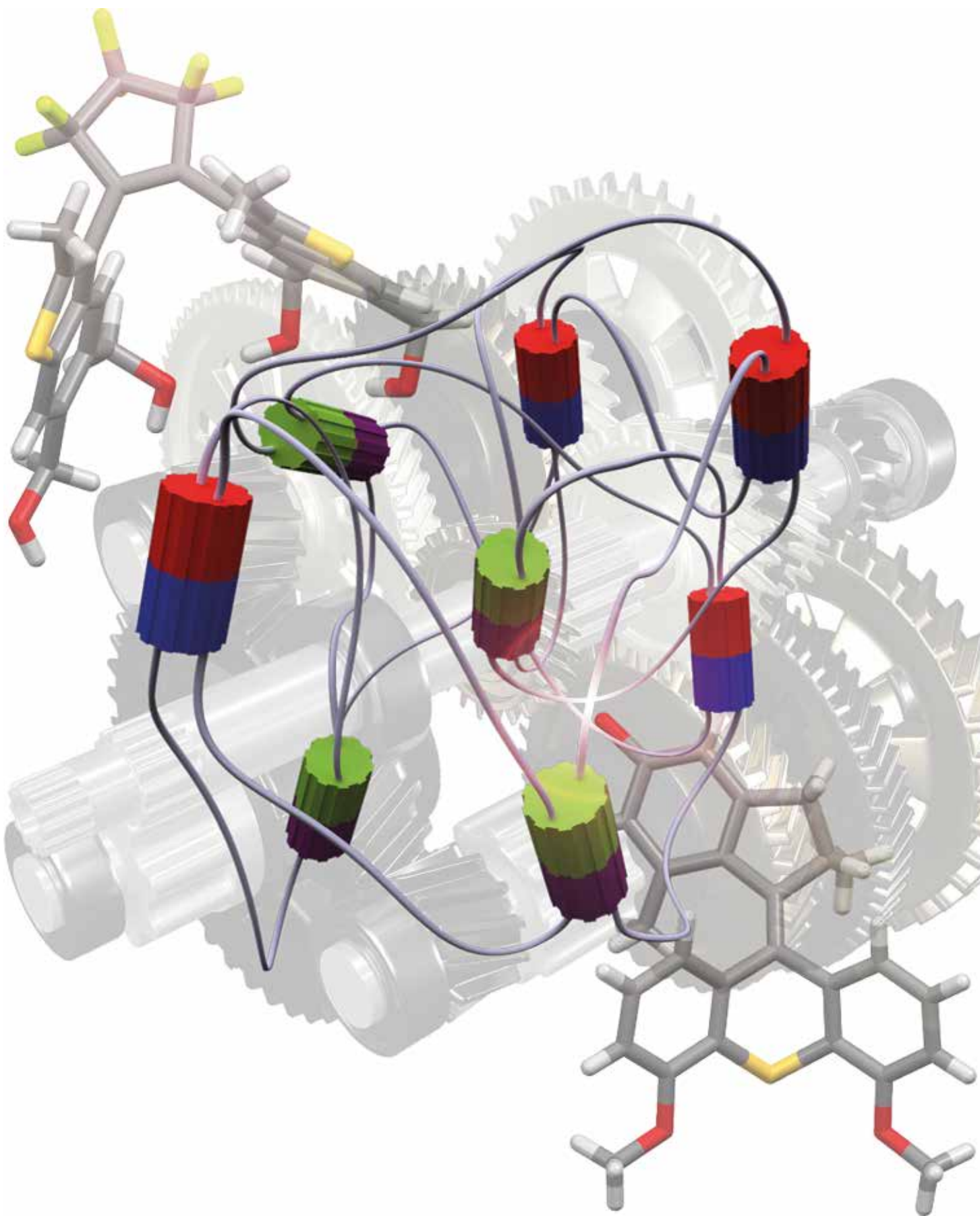
De toepassingen van dat soort inzichten zit in combinaties van verschillende materialen. Amerikaanse nanotechnologen hebben bijvoorbeeld een micromotor gemaakt die zichzelf voortbeweegt in zeewater en tege-



JOHAN JARNESTAD/THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Schematische weergave van de werking van de nano-auto van de Nederlandse Nobelprijswinnaar Ben Feringa (2016). (1) Uv-licht doet een van de beide 'chemische rotorbladen' 180° draaien, wat zorgt voor spanning in het molecuul. (2) De spanning wordt losgelaten als de ene rotor over de andere heen schiet. (3) Uv-licht leidt tot een tweede rotatie van 180°. (4) De temperatuur wordt verhoogd, waardoor de methylgroepen over de rotorbladen schuiven. Razendsnelle herhaling van dit proces leidt tot een wielachtige beweging.



De combinatie van motor en modulator van Nicolas Giuseppone levert een nieuw soort materiaal dat onder invloed van licht herhaaldelijk kan krimpen en ontspannen; dat geeft het idee van een koppeling waarin arbeid twee kanten op verricht kan worden.

lijktijd onder invloed van zonlicht stoffen uit chemische wapens afbreekt. (De deeltjes vallen buiten de categorie 'nanomotoren' omdat ze die door hun formaat – enkele micrometers in doorsnede – ontstijgen.) Een voorbeeld van zo'n deeltje bevat een kern van magnesium met een mantel van titaniumoxide en goud. De magnesiumkern reageert met water, waarbij waterstof vrijkomt. Die stroom verlaat het bolletje via een klein gaatje en stuwt het deeltje voort. Op de buitenkant zitten titaniumdioxide en goud die onder invloed van uv-licht onder meer peroxideradicalen maken, die met zenuwgassen en anthraxsporen reageren.

Het interessante van deze aanpak is dat zulke zwemmende katalytische deeltjes niet op een plaats blijven hangen of vermenging vereisen: ze mengen zichzelf voortdurend door de oplossing. Ook zijn er geen 'stuwstoffen' als waterstofperoxide nodig. De deeltjes bewegen door water uit de omgeving te verbruiken en stoppen daarmee als het magnesium binnenin is opgebruikt.

Zulke nano- en micromotoren met een chemisch-reactieve voorstuwning zijn niet echt aantrekkelijk voor toepassingen in levende systemen. Op dat gebied valt er wellicht meer te verwachten van nanobuisjes die voorzien zijn van enzymen. In 2008 testte de onderzoeksgroep van Ben Feringa een ontwerp waarbij ze twee enzymen – glucoseoxidase en catalase – aan een koolstofnanobuisje koppelden. Die enzymen vormen de motor die suiker stapsgewijs afbreekt, wat resulteert in een voorstuwning door zuurstof. Verder is er geëxperimenteerd met DNA-nanomotoren die voor kruipen als een worm. Zulke technieken werken in ieder geval in een reactorbuis, maar het is nog onduidelijk of ze een langer verblijf in een cel zouden overleven. In cellen zitten enzymen die vrij DNA gretig verslinden.

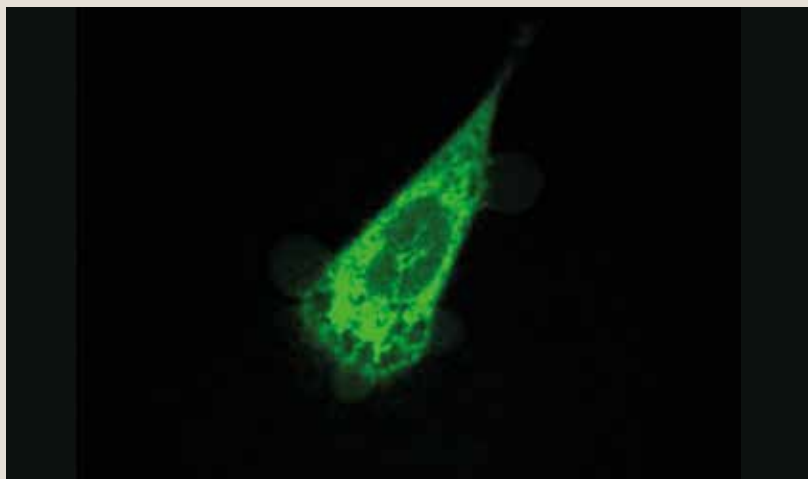
Macrowereld

Het interessante van moleculaire motoren in de biologie is de vertaling van beweging op nanoschaal naar grote bewegingen in de macrowereld. De voorbeelden hierboven gaan voornamelijk nog om kleine deeltjes die onzichtbare handelingen verrichten, maar wetenschappers werken ook al aan moleculaire motoren die mogelijk ooit meer grootschalige arbeid kunnen verzett-

► Moleculaire boormachine

Je kunt een moleculair motortje gebruiken om een nano-auto voort te bewegen, maar zulke machines hebben veel meer interessante mogelijkheden. De Amerikaanse onderzoeksgroep van James Tour liet in 2017 zien dat je er ook een gaatje mee kunt boren in het celmembraan. Boren is misschien niet de juiste omschrijving: de motor gaat zodra hij met uv-licht wordt beschenen miljoenen keren per seconde om zijn as draaien. Die wilde beweging verstoort de organisatie van de vloeibare lipidenlaag van het celmembraan, waar de motortjes uiteindelijk doorheen ploegen. Het resultaat is dat cellen hun vorm en inhoud verliezen (zie de uitstulpingen in de afbeelding), waardoor ze uiteindelijk sterven.

Het is een toepassing die mogelijk zijn weg gaat vinden in de behandeling van kanker. Want als je specifieke peptides aan de motoren plakt, binden ze specifiek aan een bepaald soort cel. De onderzoekers verwachten dat het systeem ook in het menselijk lichaam moet kunnen werken, als de draaibeweging op een andere manier in gang wordt gezet dan met ultraviolet licht. Aanjagen van de motortjes met infrarood licht of radiogolven is daarbij een optie.



ten, zoals myosine zich doet gelden in onze spierbewegingen.

Een Franse onderzoeksgroep onder leiding van Nicolas Guseppone werkt bijvoorbeeld aan gels met moleculaire motoren die onder invloed van licht krimpen en ontspannen. De gel werkt op basis van twee motorunits, die aan elkaar zijn gekoppeld door lange polymeerketens. De ene motorunit gaat gestaag ronddraaien als hij wordt beschenen met uv-licht. De polymeerketens die aan de motor vastzitten draaien als twee draden om elkaar heen en worden daardoor geleidelijk korter: de gel krimpt. Als vervolgens de uvlamp wordt uitgeschakeld en een witte lamp gaat aan, komt de motorunit aan de andere kant in beweging. Deze modulator draait in de tegengestelde richting, waardoor de polymeerketens weer ontvlechten en de gel uitzet.

De combinatie van motor en modulator levert een nieuw soort materiaal dat onder invloed van licht herhaaldelijk kan krimpen

en ontspannen. Al kan het nog niet veel werk verzetten, het materiaal heeft in de verte eigenschappen van spierweefsel. De onderzoekers kunnen zelfs spelen met intensiteit en kleur van het licht, waardoor motorunit en modulator tegelijkertijd blijven draaien. Er vindt dan doorlopend omzetting plaats van lichtenergie in beweging, een vorm van aandrijving die wellicht in de toekomst andere moleculaire motoronderdelen in beweging kan zetten.

Het belangrijkste van dit concept is dat het illustreert dat het zo mogelijk is om de effecten van de werking van moleculaire motoren om te keren. Veel moleculaire mechanismen bewegen maar een kant op, maar deze nieuwe schakeloplossing maakt aan die beperking een einde. Een combinatie van motor en modulator voorziet de moleculaire gereedschapskist van een koppeling met achteruitversnelling, en daarmee kunnen wetenschappers weer worden nadenken over een reeks nieuwe ontwerpen. ●



SOXEL & GEES DEKKER LAB., TU DELFT

De onderzoeksgroep van biofysicus Cees Dekker aan de TU Delft haalde in februari het wetenschappelijke tijdschrift *Science* met de ontdekking dat het eiwit condensine bindt aan DNA en in staat is daaroverheen te bewegen. De ontdekking is een stevige ondersteuning van het zogenoemde *loop extrusion*-model, waarbij condensine als een moleculair motortje de DNA-streng door een gat in zichzelf heentrekt, zodat het mooie lussen vormt waarmee het netjes kan worden opgevouwen als chromosoom (zie de link hieronder voor een animatiefilmpje).

► www.youtube.com/watch?v=zd2l-Yq_35Y&feature=youtu.be

Voor op school:

1. Geef in je eigen woorden een omschrijving van nanotechnologie.
2. Wat is de rol van moleculaire motoren in ons lichaam? Geef een aantal voorbeelden.
3. Van welke energiebronnen kan een moleculaire motor gebruikmaken?
4. Noem een aantal mogelijke toepassingen van een moleculaire motor.
5. Wat is een spermabot en hoe werkt die?
6. Waarvoor staat de afkorting ATP? Raadpleeg *Binas* tabel 67L.
7. Wat is het verschil tussen een catenaan en een rotaxaan?
8. Geef het ontstaan van een peptidebinding weer in een reactievergelijking. Gebruik structuurformules.
9. Wat zijn de twee fundamenteel verschillende startpunten om een moleculaire motor of machine te ontwerpen?
10. Tot welke categorie behoort de groep van Ben Feringa?
11. Geef twee voorbeelden van 'logische principes uit onze belevingswereld' die niet werken op nanoschaal.
12. Waarom zijn motoreiwitten vooralsnog slechts een bron van inspiratie?
13. Wat is chemotaxis? Raadpleeg internetbronnen, bijvoorbeeld Wikipedia.

Meer weten?

- Feringa, B.L. (2017) The art of building small: from molecular switches to motors (Nobel lecture) *Angew. Chem. Int. Ed.* 56: 11060 – 11078
- Wong, F. et al (2016) Synthetic Micro/Nanomotors and Pumps: Fabrication and Applications. *Annual Review of Materials Research* 46: 407-432
- www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2016/, Nobelprijs Chemie 2016.

Editie

Nanomotoren

editie 85 | nummer 342 | april 2018

www.chemischefeitelijkheden.nl

Coverbeeld: een groot model van de nano-auto van Ben Feringa was als eerbetoon aan de Nobelprijswinnaar enkele dagen te zien op de Grote Markt in Groningen (RUG/Peter van der Sijde)

Colofon

Over Chemische Feitelijkheden

Chemische Feitelijkheden is een actuele encyclopedie over moleculen, mensen, materialen en milieu. Het is een losbladige uitgave van de KNCV en verschijnt driemaal per jaar met in totaal tien onderwerpen.

KNCV

Redactie

dr. Erwin Boutsma (hoofdredacteur), drs. Franny Scholte (eindredacteur),
Arno van 't Hoog (tekst), Henk Ubbels (vragen en correctie)

Vormgeving & Opmaak

Marije van de Linde/Content Innovators

Uitgever

Roeland Dobbelaer, Vakbladen.com
Postbus 19949, 2500 CX Den Haag
info@betapublishers.nl

Abonnementen

MijnTijdschrift.com

088-2266626

chemischefeitelijkheden@mijntijdschrift.com

Wij hanteren de opzegregels uit het verbintenissenrecht. Wij gaan ervan uit dat Chemische Feitelijkheden altijd wordt ontvangen uit hoofde van het beroep. Hierdoor wordt het abonnement automatisch met een jaar verlengd tenzij twee maanden vóór de einddatum een opzegging is ontvangen. Een abonnement op Chemische Feitelijkheden geeft via de website toegang tot tien nieuwe edities per jaar en het totale online archief. Daarnaast ontvangen abonnees in drie zendingen per jaar de losbladige edities.

Tarieven (2018)

Voor particulieren: online toegang met inlogcode en papieren editie (inclusief verzamelmap) kost € 87,75*; leden van de KNCV, KVCV en NVON krijgen € 10 korting.

Voor bedrijven en (onderwijs)instellingen: onbeperkt toegang tot de digitale edities op basis van IP-adres en papieren editie in drievoud (inclusief verzamelmappen) kost € 262,50*.

Losse nummers kosten € 9,95* per stuk en zijn te bestellen bij Abonnementenland.

*Bij betaling per acceptgiro wordt € 2,95 administratiekosten in rekening gebracht.