



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Synthetic model microswimmers near walls

Ketzetzi, S.

Citation

Ketzetzi, S. (2021, June 29). *Synthetic model microswimmers near walls. Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3185906>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3185906>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/3185906> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Ketzetzi, S.

Title: Synthetic model microswimmers near walls

Issue date: 2021-06-29

Samenvatting

Van zwermen vogels in de lucht, scholen vissen in het water, kleine kolonies bacteriën in de bodem, tot cellen in het menselijk lichaam: levende organismen zijn door de eeuwen heen geëvolueerd om zichzelf op te bouwen en in stand te houden. Wetenschappers – en in het bijzonder, natuurkundigen – beschouwen deze organismen vaak als *levende materialen*. Deze materialen hebben opmerkelijke eigenschappen: ze kunnen van vorm veranderen, assembleren, organiseren en zelfs zichzelf genezen, om maar een paar voorbeelden te noemen. Levende materialen maken gebruik van deze speciale eigenschappen om te reageren op prikkels uit hun omgeving. Een goed voorbeeld hiervan zijn bacteriën. Bacteriën gebruiken een mechanisme dat chemotaxis¹ wordt genoemd: om zichzelf te voeden of te beschermen, voelen de bacteriën met kleine flagella (of zweepstaartjes) of de hoeveelheid voedselmoleculen of gifstoffen in een bepaalde richting toeneemt. Op dezelfde manier beweegt ook bijvoorbeeld sperma zich naar het ei en jagen witte bloedcellen achter bacteriën aan.

Wetenschappers putten inspiratie uit levende materialen om microscopisch kleine deeltjes te maken die zich autonoom kunnen verplaatsen in complexe omgevingen. Deze materialen, bekend als *synthetische microzweimmers*, kunnen zeer nuttig zijn voor industriële toepassingen. Ze zouden bijvoorbeeld kunnen worden gebruikt in de biogeneeskunde en microchirurgie, om medicijnen te transporteren en af te leveren op specifieke locaties in het lichaam. Verder kunnen ze worden toegepast bij milieusanering, om de bron van vervuiling in vervuild water te lokaliseren en af te breken.

Voor dit proefschrift hebben we in het laboratorium synthetische deeltjes gemaakt met afmetingen van ongeveer drie micrometer. Deeltjes van deze grootte worden *colloïden* genoemd: ze zijn zo klein dat ze niet met het blote oog kunnen worden waargenomen, maar met behulp van een microscoop kunnen we ze in beeld brengen. Normaal gesproken, wanneer de colloïden zich in een vloeistof bevinden, bewegen ze willekeurig. Deze willekeurige beweging staat bekend als de Brownse beweging of diffusie. Hier hebben we, door de oppervlakte-eigenschappen van de colloïden aan te passen, hun willekeurige beweging juist onderdrukt. In plaats daarvan hebben we colloïden gemaakt die zichzelf kunnen voortbewegen. We hebben hiervoor de helft van hun oppervlak met het metaal platina bedekt en hebben ook een kleine hoeveelheid waterstofperoxide toegevoegd aan de vloeistof waarin de colloïdale deeltjes zich bevonden. In deze

¹Van het Oudgriekse woord $\tau\acute{\alpha}\xi\varsigma$, wat rangschikking, ordening betekent

vloeistof stuwen de met platina bedekte colloïden zich voort met de platina-zijde op de rug, vanwege een katalytisch proces dat plaatsvindt op het platina. Om deze reden worden deze deeltjes *katalytische microzwemmers* genoemd en kunnen ze in experimentele studies worden gebruikt als modellen voor synthetische microzwemmers. In het kort werkt hun voorstuwingsmechanisme als volgt: het platina oppervlak werkt als een katalysator die het waterstofperoxide in de oplossing afbreekt. Dit is een chemisch reactieproces, waarbij de reactieproducten ontstaan aan het platina oppervlak. Simpel gezegd is waterstofperoxide een *brandstof* die door het colloïdale deeltje wordt verbruikt om zichzelf vooruit te duwen. Feitelijk gebeurt dit doordat de reactieproducten een interactie aangaan met het deeltje; dit zorgt ervoor dat de vloeistof in één richting rond het deeltje beweegt en deze dus naar voren wordt geduwd, wat resulteert in voortstuwung. Dit bewegingsmechanisme is vergelijkbaar met *zelf-forese*^{2,3,4}, maar voor deze colloïden zijn de exacte details van het mechanisme nog niet bekend.

Wanneer we onze synthetische zwemmers aan een oplossing van waterstofperoxide in water toevoegen, hebben ze de neiging om naar beneden te zwemmen, richting de bodem. Wanneer ze deze bereiken, verlaten ze de bodem niet meer en bewegen ze zichzelf evenwijdig aan het bodemoppervlak. In **hoofdstuk 2** hebben we met behulp van microscopie de zwemmers in beeld gebracht, om te meten hoe snel ze langs de bodem bewegen. We gebruikten eerst een bodem van glas, een oppervlak dat onderzoekers in de regel voor microscopie gebruiken. Vervolgens hebben we in een aantal experimenten het oppervlak van de glazen wand aangepast en ook hebben we wanden van andere materialen gebruikt. We ontdekten dat de zwemmers met verschillende snelheden boven de bodem bewegen afhankelijk van het gebruikte oppervlak: soms sneller en soms langzamer dan boven de glazen wand. Onze hypothese was dat dit gebeurde omdat sommige oppervlakken glibberiger waren dan andere: de glibberigere bodems lieten de vloeistof gemakkelijker langs het oppervlak stromen. Daarentegen ondervond de vloeistof meer weerstand langs oppervlakken die minder glibberig waren, waardoor de zwemmers erboven langzamer gingen bewegen. Dit zou kunnen verklaren waarom verschillende onderzoekers hebben opgemerkt dat vergelijkbare zwemmers zich met verschillende snelheden bewegen. Dit werk hielp ons te begrijpen dat nabijgelegen oppervlakken de beweging van synthetische microzwemmers kunnen beïnvloeden, iets wat al eerder bekend was voor biologische microzwemmers.

²Uit het Oudgrieks: *φόρησις*, afgeleid van het werkwoord *φέρω*, wat zoals als dragen of brengen betekent

³In het algemeen beschrijft forese de migratie van colloïden in een vloeistof

⁴Het voorvoegsel *zelf-* wordt hier gebruikt omdat het deeltje de voortstuwung zelf veroorzaakt, zonder externe aandrijving

Voor **hoofdstuk 3**, waren we geïnteresseerd in het meten van de afstand tussen de zwemmers en de bodem. We ontdekten een eenvoudige methode om de hoogte van een zwemmer te meten, met behulp van een bolvormig deeltje wat zich boven het oppervlak beweegt. Zoals eerder besproken, diffunderen normale colloïden (niet zwemmers) willekeurig in een vloeistof. Kwantitatieve wiskundige relaties laten zien dat hun verspreiding langzamer is wanneer ze zich dicht bij het oppervlak bevinden. Hierdoor kan met behulp van de snelheid van de verspreiding rechtstreeks een hoogte vanaf de bodem worden uitgerekend. Deze willekeurige beweging is nog steeds, hoewel in mindere mate, aanwezig voor de zwemmers, en we kunnen de verspreiding als gevolg van deze bewegingen berekenen uit de microscopiemetingen. Door een kwantitatieve wiskundige formule te gebruiken, hebben we de hoogte berekend op basis van de diffusie van de zwemmers. We ontdekten dat de colloïden heel dicht op de bodem bewogen, op een hoogte van ongeveer 300 nanometer, een afstand die veel kleiner is dan de grootte van onze zwemmers. Tot onze verbazing ontdekten we ook dat de afstand bijna constant bleef als we verschillende parameters van de experimenten veranderden, zoals de grootte van de zwemmers of hun elektrische lading. We hebben deze neiging van de zwemmers om parallel aan, en op vaste hoogte van de bodem te bewegen “ypsotaxis”⁵ genoemd. Ons werk toonde opnieuw aan dat nabije oppervlakken het gedrag van de synthetische zwemmers beïnvloeden. Dit heeft ons uiteindelijk geholpen om nieuwe verklaringen voor hun bewegingsmechanisme voor te stellen.

In **hoofdstuk 4**, hebben we een 3D-printtechniek gebruikt om obstakels voor de zwemmers op het oppervlak te printen en zo ook te bevestigen. Deze obstakels waren groter dan onze zwemmers en hadden ofwel ronde vormen, of vormen die op pinda’s leken. Als de zwemmers parallel boven het oppervlak bewogen, kwamen ze soms de obstakels tegen en begonnen ze eromheen te cirkelen. We ontdekten dat wanneer meer zwemmers om hetzelfde obstakel cirkelden, ze sneller bewogen dan wanneer één zwemmer alleen in een baan om hetzelfde (soort) obstakel cirkelde. Het was erg interessant om zo een bepaalde manier van samenwerking tussen synthetische zwemmers te vinden, omdat dit tot nu toe alleen werd gevonden tussen biologische zwemmers, zoals bacteriën. Bovendien verzamelden de zwemmers zich bij elkaar en vormden ze op die manier lange ketens, welke zichzelf als geheel voortbewogen rond de obstakels. Ten slotte ontdekten we dat de kromming van de pinda-vormige obstakels het gedrag van de lange ketens beïnvloedde. Deze vondst kan leiden tot verscheidene mogelijke toepassingen: we zouden strategieën kunnen bedenken om de kromming van het oppervlak te gebruiken als een hulpmiddel om de beweging van de zwemmers te beheersen.

⁵Van het Griekse woord *ύψος* voor hoogte

In **hoofdstuk 5**, hebben we een tweede methode ontwikkeld om afstanden tussen colloïdale deeltjes en oppervlakken te meten. Deze techniek is, in tegenstelling tot die van hoofdstuk 3, gebaseerd op holografische microscopie. Het kan worden gebruikt om de hoogte vanaf de wand te meten voor elk colloïdaal deeltje — niet alleen bolvormige deeltjes — zolang het oppervlak van het deeltje maar overal hetzelfde is. Hoewel we het niet konden gebruiken voor de bolvormige colloïden met een platina-zijde, hebben we het wel gebruikt om het gedrag van colloïden met complexere vormen te bestuderen. We richtten ons op colloïdale deeltjes die eruit zagen als halters, die in oplossing naar de bodem zakten. Voor het maken van de halterdeeltjes hebben we altijd twee even grote bollen aan elkaar vastgemaakt. We ontdekten dat de beweging van de halters in water boven het oppervlak afhankelijk was van de onder van de halter. De kleinere halterdeeltjes positioneerden zichzelf een specifieke hoek ten opzichte van de wand. Dit gebeurde niet voor grotere halters van hetzelfde materiaal: deze oriënteerden zich bijna parallel aan de bodem. Ons werk heeft aangetoond dat niet-bolvormige colloïden zich op complexe manieren gedragen in de buurt van een oppervlak. Deze vondst kan ons in de toekomst helpen modellen te maken, die de beweging in de buurt van een oppervlak van colloïden met willekeurige vormen beter kunnen voorspellen.

In **hoofdstuk 6**, werden we geïnspireerd door biologische microzwemmers met niet-triviale vormen. Onderzoekers verwachten dat vorm belangrijk is: verschillende vormen kunnen biologische zwemmers bijvoorbeeld helpen gemakkelijker te navigeren in complexe omgevingen. We waren benieuwd hoe vorm de beweging van synthetische zwemmers beïnvloedt. Om deze reden hebben we haltervormige colloïden gebruikt gemaakt van twee deeltjes met verschillende afmetingen. We voegden platina toe aan één kant van de halters en plaatsten ze vervolgens in de waterstofperoxide-brandstof. De symmetrische halterdeeltjes stuwden zichzelf voort in de richting van de zijde waar geen platinalaag was aangebracht en in een rechte beweging. In tegenstelling tot de symmetrische halters, bewogen de asymmetrische halterzwemmers zich in cirkels. Onze bevinding kwam overeen met eerder onderzoek en bevestigde dat de vorm van de zwemmer de bewegingsrichting bepaalt.

Samenvattend heeft het werk dat we in dit proefschrift beschreven ons geholpen te begrijpen hoe synthetische zwemmers zich gedragen en welke verschillende factoren hun snelheid en bewegingsrichting beïnvloeden. Dit nieuwe begrip kan nuttig zijn voor het gebruik van katalytische zwemmers als modellen voor microzwemmers voor onderzoeksdoeleinden, en in het algemeen voor het gebruik van synthetische zwemmers in toekomstige toepassingen. Aangezien van synthetische microzwemmers wordt verwacht dat ze taken zouden kunnen uitvoeren in complexe omgevingen, kan ons werk helpen bij het voorspellen en beheersen van de beweging van zwemmers in verschillende omgevingen.