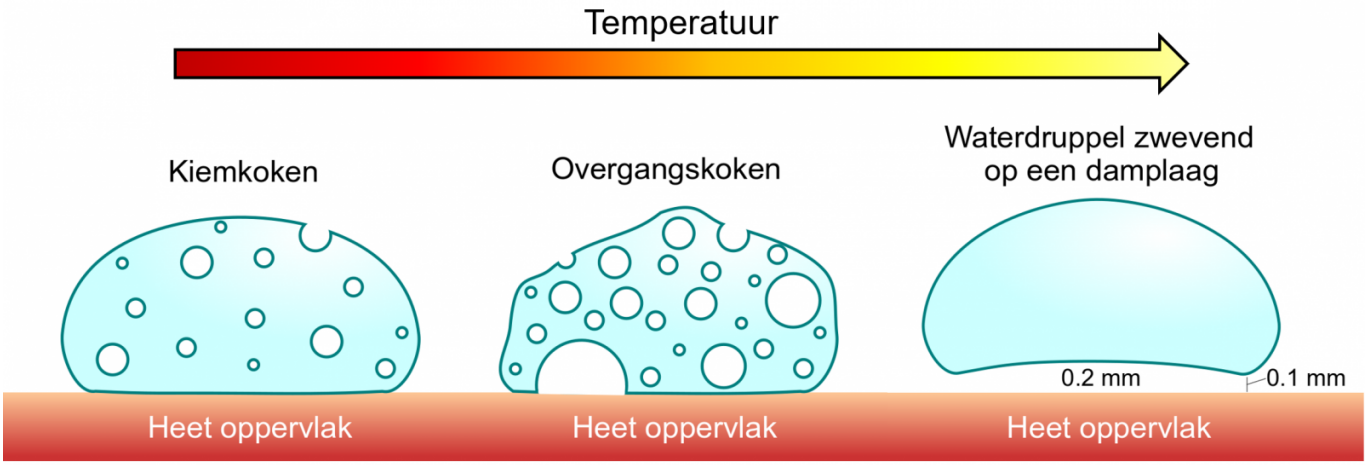
Leidenfrost-effect: meer dan zwevende druppels

Een manier om te kijken of een pan heet genoeg is als je wilt gaan koken, is om er wat druppels water op te gooien. Koken en verdampen de druppels snel, dan is de temperatuur van de pan zeker boven de 100°C. Als de pan echter maar heet genoeg is, zul je iets merkwaardigs zien: de druppels lijken wel over de pan heen te zweven! Dit heet het Leidenfrost-effect, en je kan er verrassend veel leuke dingen mee doen.

Het Leidenfrost-effect

Het merkwaardige rondzweven van de druppels is vernoemd naar de Duitser Johann Gottlob Leidenfrost, die dit effect in de 18e eeuw beschreef in zijn boek *Een traktaat over enkele eigenschappen van gewoon water*. Afbeelding 1 laat zien wat er gebeurt wanneer een druppel in contact komt met een oppervlak boven het kookpunt van de vloeistof waaruit de druppel bestaat. Net boven het kookpunt zal een waterdruppel “kiemkoken”, wat betekent dat er kleine bubbels ontstaan in de vloeistof, en die zo verdampt. Bij nog hogere temperaturen ontstaan er snel veel grote bubbels, waardoor de druppel uiteenspat; deze onstabiele fase heet “overgangskoken”.

Bij nóg hogere temperaturen, boven het zogeheten Leidenfrost-punt, verdampt de onderste laag van de druppel zo snel dat hiermee de vloeistof erboven geïsoleerd wordt van het hete oppervlak. Druppels die neerkomen op een heet oppervlak boven het Leidenfrost-punt, zweven dus eigenlijk rond op een damplaag van hun eigen makelij. Ze verdampen nog wel, maar veel langzamer dan voorheen omdat ze zo goed geïsoleerd zijn.



Afbeelding 1. Wat er gebeurt met een druppel op een hete plaat.Links is de temperatuur van de plaat net boven het kookpunt, rechts boven het Leidenfrost-punt, wat voor water rond 200°C ligt. Afbeelding: Jans Henke, aangepast naar een origineel van Vystrix Nexoth.

Als je dit experiment thuis probeert met druppels water in een pan, zul je merken dat de druppels soms snel in een rechte lijn versnellen, maar vaak ook onregelmatig bewegen. Dit heeft alles te maken met de grootte van de druppels. Een groep Franse onderzoekers bestudeerde de vloeistofstroming binnen de druppels [1] en lieten zo zien dat kleine druppels (~2 mm breed) van binnen een circulaire stroming hebben waardoor de druppels in één bepaalde richting bewegen, als een soort miniscuul wiel (zie video 1, hieronder). In iets grotere druppels (~5 mm breed) ontstaan twee circulaire stromingen die elkaar als het ware opheffen, waardoor zo'n druppel alleen beweegt door toevallige ongelijkmatigheden in bijvoorbeeld de vorm ervan. In nóg grotere druppels is de interne stroming veel ingewikkelder en wordt die turbulent, waardoor de druppels zich helemaal onregelmatig gedragen.

Video 1. Kleine Leidenfrost-druppels gedragen zich als wielenVideo: APS Physics

Leidenfrost-druppels kunnen een tijd lang rondzweven, maar er komt altijd wel een eind aan hun rit. Ze kunnen in principe gewoon helemaal verdampen, maar in de praktijk is dit niet wat er gebeurt. In mei van dit jaar lieten onderzoekers zien dat kleine druppels zoveel energie kunnen krijgen dat ze zwaartekracht kunnen overwinnen en geheel van de hete plaat omhoogschieten, als mini-raketjes [2]. Grotere druppels blijven wel op de plaat liggen, maar zullen na enige tijd toch het hete oppervlak raken en ondergaan dan een ware explosie! Dat

ze toch de plaat raken komt door contaminanten (vervuilingen) in de vloeistof, die zich opbouwen rond de buitenkant van de druppel en hiermee de snelheid van verdamping verminderen. Zulke explosies veroorzaken een knettergeluid.

Het nut van het Leidenfrost-effect

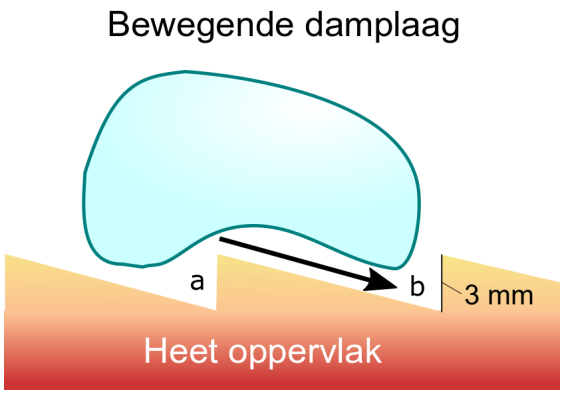
Hierboven hadden we het steeds over water, op een oppervlak van boven de 200°C, maar het effect werkt natuurlijk ook met andere vloeistoffen. Neem vloeibaar stikstof, wat een temperatuur van 77 Kelvin, oftewel -196°C heeft. (Dit is het kookpunt van vloeibaar stikstof.) Als de stikstof in contact komt met iets wat kamertemperatuur heeft, zoals de vloer, gebeurt er precies hetzelfde als bij het water in de pan (zie bijvoorbeeld deze video). Dit is ook de reden dat je in een laboratorium waarin vloeibaar stikstof gebruikt wordt meestal geen beschermende handschoenen aan hoeft te doen: het Leidenfrost-effect beschermt je al genoeg!

Het effect staat er overigens ook om bekend dat je erdoor een natte hand kort in contact kan brengen met gesmolten metaal, zonder dat je verbrandt. Dit komt omdat de laag water op je hand onmiddelijk verdampt, en je daardoor – heel even – beschermt tegen de extreme hitte van het gesmolten metaal. (Zie bijvoorbeeld deze video, of deze.) Hierbij is het wel belangrijk dat er geen gesmolten metaal achterblijft op je huid, anders verbrand je natuurlijk wel. Waarschijnlijk overbodig om te zeggen: *don't try this at home!*

Het is natuurlijk grappig dat druppels snel rond kunnen zweven, en dat je je hand in hele koude of juist hele hete vloeistoffen kan steken, maar het is pas recent dat wetenschappers serieuzer over mogelijke (technologische) toepassingen van het Leidefrost-effect hebben nagedacht. Laten we eens kijken naar drie recente 'uitbreidingen' van het Leidenfrost-effect, en waar deze nuttig voor zouden kunnen zijn.

Zwevende druppels aansturen

Wetenschappers ontdekten in 2005 dat ze de zwevende druppels kunnen aansturen door ze op een heet oppervlak met schuine richels erin te leggen [3]. Het idee is dat de damplaag door de richels liever één kant op beweegt dan de ander, en zo de druppel met zich meeneemt – zie afbeelding 2. Met zulke richels kun je druppels zelfs schuin omhoog transporteren!



Afbeelding 2. Hoe je een zwevende druppel een gekozen richting op kan sturen.De damp onder de druppel beweegt bij voorkeur naar lage-druksgebieden. Rond punt *a* in de figuur kan de damp snel langs de richel onder de druppel vandaan schieten, omdat er een grotere ruimte tussen de druppel en het oppervlak zit. Aan de rechterkant van de top van de richel beweegt de damp echter richting punt *b*, het dichstbijzijnde lage-drukgebied. Met deze beweging sleurt de damplaag de druppel met zich mee (zie pijl). Afbeelding: Jans Henke.

De onderzoekers, die dit effect beschreven in een artikel in *Physical Review Letters* [3], bedachten dat het gebruikt zou kunnen worden om computerchips af te koelen. Hoewel we zo ver nog niet zijn, is het natuurkundigen van de University of Bath al wel gelukt om druppels door een doolhof te sturen en ze te gebruiken om een thermostaat te bouwen.

Het inverse Leidenfrost-effect

Een andere eervolle vermelding gaat uit naar onderzoekers van onder andere de Universiteit Twente, die het zogenaamde ‘inverse’ Leidenfrost-effect bestudeerden [4]. Ze deponeerden een druppel alcohol op kamertemperatuur bovenop vloeibaar stikstof. Het stikstof verdampt dan onder de druppel alcohol, en laat de druppel zweven. Dit effect is ‘invers’ omdat nu niet de druppel zelf verdampt, maar het oppervlak. Hoe dit werkt, en waar we het effect voor zouden kunnen gebruiken in een toepassing rond cryogene conservering van biologisch materiaal, wordt verder uitgelegd in de video hieronder.

Video 2. Het inverse Leidenfrost-effect.Video van YouTubekanaal Veritasium.

Zachte robots

Een laatste variant van het effect is het zogeheten ‘elastische’ Leidenfrost-effect, in 2017

beschreven door onderzoekers van Universiteit Leiden en het AMOLF-instituut in Amsterdam [5]. Hier worden geen vloeistoffen gebruikt, maar zogeheten hydrogel-balletjes. Deze bestaan voornamelijk uit water en kunnen dus verdampen, maar ze kunnen ook elastisch vervormen. Dit voegt een extra dimensie toe aan het Leidenfrost-fenomeen en heeft wellicht toepassingen in het gebied van zachte robots. De onderstaande video geeft verdere uitleg:

Video 3. Het elastische Leidenfrost effect.

Video van Leiden Institute of Physics.

Kortom: het Leidenfrost-effect is niet alleen leuk natuurkundig ‘speelgoed’ voor waaghalzen, het verrassende effect heeft ook allerlei nuttige toepassingsmogelijkheden – en wie weet worden er daar in de toekomst nog wel veel meer van bedacht.

Referenties

[1] A. Bouillant, T. Mouterde, P. Bourrianne, A. Lagarde, C. Clanet & D. Quéré. (2018). Leidenfrost wheels. *Nature Physics* **14**, 1188–1192. https://doi.org/10.1038/s41567-018-0275-9

[2] S. Lyu, V. Mathai, Y. Wang, B. Sobac, P. Colinet, D. Lohse & C. Sun. (2019). Final fate of a Leidenfrost droplet: Explosion or takeoff. *Science Advances* **5**(5), eaav8081. https://doi.org/10.1126/sciadv.aav8081

[3] H. Linke, B. J. Alemán, L. D. Melling, M. J. Taormina, M. J. Francis, C. C. Dow-Hygelund, V. Narayanan, R. P. Taylor, & A. Stout. (2006). Self-propelled Leidenfrost droplets. *Physical Review Letters* **96**, 154502. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.154502

[4] A. Gauthier, C. Diddens, R. Proville, D. Lohse & D. van der Meer. (2019). Self-propulsion of inverse Leidenfrost drops on a cryogenic bath. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116**(4), 1174–1179. https://doi.org/10.1073/pnas.1812288116

[5] S. Waitukaitis, A. Zuiderwijk, A. Souslov, C. Coulais, M. van Hecke. (2017). Coupling the Leidenfrost effect and elastic deformations to power sustained bouncing. *Nature Physics*, **13**, 1095–1099. https://doi.org/10.1038/nphys4194