

Auteur: Florian Muijres | Foto: Unsplash - David Clode

Hoe insecten vliegen



Vliegende insecten zijn zeer kleine biologische vliegmachientjes, die vliegen door hun vleugels snel heen en weer te slaan. De resulterende aerodynamische krachten gebruiken ze niet alleen om in de lucht te blijven, maar ook om te sturen [1]. Deze directe aansturing maakt ze zeer manoeuvreerbaar, iets wat je goed kunt ervaren als je tevergeefs een vlieg probeert te vangen [2].

De paradox van vliegende insecten

Het ongewone vliegsysteem van insecten, waarbij sommige insecten tot wel duizend keer per minuut met hun vleugels slaan, berust ook op ongewone aerodynamische effecten. Dit werd duidelijk toen in de jaren veertig van de vorige eeuw de Franse zoöloog en ingenieur Antoine Magnan de aerodynamica van vliegende insecten bestudeerde [3]. Hij paste de toen bekende aerodynamische theorieën voor vliegtuigen toe op de vleugelslag van bijen. De resulterende aerodynamische krachten waren niet groot genoeg voor gewichtsondersteuning. Vandaar de bekende uitdrukking ‘een bij kan niet vliegen’, met natuurlijk de belangrijke maar vaak vergeten toevoeging ‘volgens conventionele aerodynamische theorieën’. Deze paradox leidde tot een nieuw onderzoeksveld: de bio-aerodynamica van natuurlijke vliegers, waarbij fysici, ingenieurs en biologen samenwerken om te ontrafelen hoe het fysisch mogelijk is dat insecten, vogels en vleermuizen kunnen vliegen [4]. In dit onderzoek wordt veel gebruikgemaakt van hogesnelheidsvideografie om de vleugelbewegingen van dieren vast te leggen (video in [5], figuur 1a) [1]. De onderliggende aerodynamica kan dan bestudeerd worden door het visualiseren van de luchtbewegingen rond het dier [6] of door gebruik te maken van robotische of computermodellen [1,7]. Robotische modellen bestaan uit een dynamisch geschaalde robot die de vleugelslagbewegingen van het dier nauwkeurig reproduceren. De aerodynamica kan dan door middel van krachtsensoren en vloeistofvisualisatietechnieken onderzocht worden (figuur 1b). Bij computermodellen gebeurt dit *in silico* door middel van *computational fluid dynamics* (CFD) methodiek (figuur 3).

Door gebruik te maken van deze technieken weten we nu redelijk goed hoe bijen en andere vliegende dieren in de lucht kunnen blijven, maar ook waarom ze zo enorm goed kunnen manoeuvreren [1]. Het blijkt dat vliegende dieren, en vooral insecten, gebruikmaken van een aantal onstabiele aerodynamische mechanismen die grotendeels onbekend waren [8]. Insecten passen die toe door snel met hun vleugels heen en weer te slaan.

Vliegkinematica van insecten ontrafeld

Als je een film in slow motion van een vliegend insect bekijkt (video in [5]), zie je dat het dier zijn vleugels niet op en neer slaat, maar vooral van voor naar achter en weer terug. Tijdens deze vleugelslag staat de vleugel ook bijna loodrecht op de bewegingsrichting, met onderlinge hoeken van vaak meer dan 45 graden (figuur 1). Deze invalshoek is vele malen hoger dan die van bijvoorbeeld een helikopter of vliegtuig, en dit resulteert vervolgens in heel andere luchtbewegingen rond de vleugel. Ook zijn de hoekversnelingen van de flappende insectenvleugel zeer groot, soms wel in de miljoenen radialen per seconde kwadraat (rad/s^2) [7]. Deze grote versnelingen geven weer andere interessante onstabiele aerodynamische effecten. Echter, door deze complexe vleugelbewegingen zijn de luchtbewegingen rond de vleugel ook zeer complex en daardoor is het moeilijk om het relatief belang van de verschillende onstabiele aerodynamische mechanismen voor het insect te bepalen.

Onstabiele aerodynamische mechanismen

Hieronder bespreek ik de verschillende mechanismen op volgorde van hun belang voor de gewichtsondersteuning bij de meest onderzochte

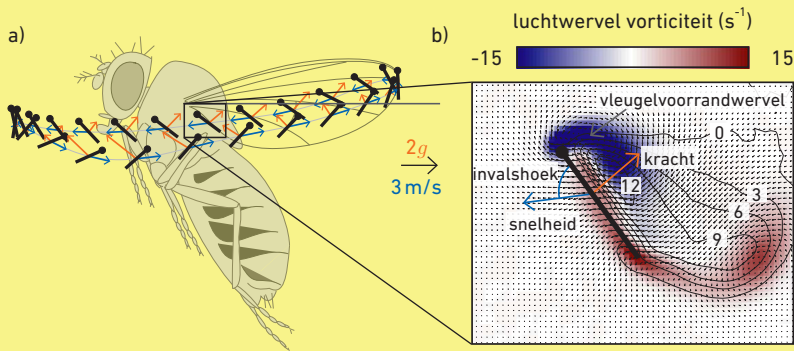
insecten. Voor bijvoorbeeld manoeuvreerbaarheid ligt het relatieve belang van deze mechanismen vaak anders.

1. Vleugelvoorrandswervel (leading edge vortex)

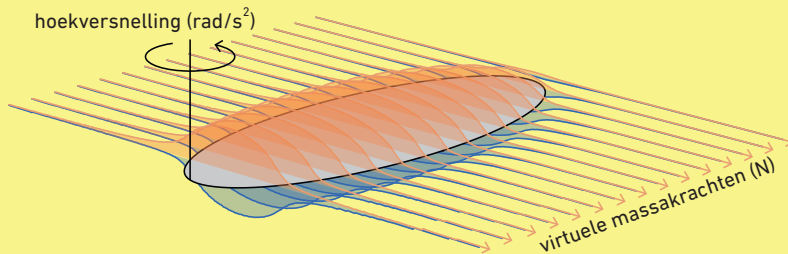
Vliegtuig- en helikoptervleugels opereren met lage invalshoeken, waardoor de luchtstroom over de vleugel blijft aanliggen aan de vleugel. Daardoor produceert de vleugel een hoge opwaartse liftkracht en een lage luchtweerstand. Maar de vleugels van insecten flapperen met hoge invalshoeken door de lucht (figuur 1a). Hierdoor laat de luchtstroom direct los van de vleugelvoorrand en volgt de luchtstroom het vleugeloppervlak niet meer (figuur 1b). Maar verrassend genoeg buigt de lucht zich stroomafwaarts weer terug naar de vleugel, en gaat aanliggen vóór de vleugelachterrand. In het losgelaten deel ontstaat een roterende luchtstroom, de zogenaamde vleugelvoorrandswervel. Deze bestaat uit een minuscule lagedrukgebiedje boven de vleugel dat het insect aan voldoende opwaartse krachten helpt om in de lucht te blijven. Dit mechanisme is eerst ontdekt bij de pijlstaartmot en fruitvlieg (figuur 1) [8], en later ook bij vogels en vleermuizen [6]. Nu wordt het gezien als het voornaamste onstabiele aerodynamische mechanisme dat zweven en langzaam vliegen van dieren mogelijk maakt. Het wordt nu zelfs ook gebruikt door op insecten geïnspireerde vliegende robots [8].

2. Rotationale lift

Insectenvleugels flappen continu heen en weer met een hoge invalshoek. Bij het van richting veranderen roteert de vleugel snel om zijn lange as, om zodoende weer een positieve invalshoek te hebben bij de terugslagbeweging van de vleugel (figuur 1a). Deze zogenaamde pitchrotatie zorgt



Figuur 1. a) Insecten slaan hun vleugels heen en weer op hoge frequenties (200 Hz voor de afgebeelde fruitvlieg) [1]. De vleugel wordt aangegeven met een zwarte lijn, waarbij de cirkel de vleugelvoorrand is. De vleugel staat onder een hoge invalshoek ten opzichte van de bewegingsrichting (blauwe pijlen). b) Bij deze grote invalshoek produceert de vleugel een vleugelvoorrandswirl en relatief grote aerodynamische krachten (oranje pijlen). De luchtwervels rond de vleugel worden gevisualiseerd door middel van vorticeit (zie kleurlegenda), waarbij de vleugelvoorrandswirl blauw is.



Figuur 2. Tijdens de vleugelslagbeweging roteert een insectenvleugel om het rotatiepunt. Bij deze beweging sleept de vleugel lucht met zich mee, aangegeven met de oranje en blauwe lijnen. Als de vleugel versnelt dan oefent deze lucht een virtuele massakracht uit op de vleugel [7].

voor extra aerodynamische krachtproductie, die uit twee componenten bestaat [10]: een kracht die enkel afhangt van de pitchsnelheid en een component die afhangt van de interactie tussen de vleugelslagnsnelheid en de pitchsnelheid. Dit laatste mechanisme is vooral van groot belang voor de manoeuvreerbaarheid van insecten [1]. Door een minuscule aanpassing van de timing van de vleugelpitchbeweging ten opzichte van de vleugelslag kan het insect de opwaartse kracht laten toe- of afnemen. Door dit symmetrisch te doen met beide vleugels kan het dier zijn neus optrekken of juist laten dalen. Door dit asymmetrisch te doen kan het heel snel een rolbeweging inzetten. In fruitvliegen verklaart rotationele lift ongeveer 20% van de opwaartse liftkracht.

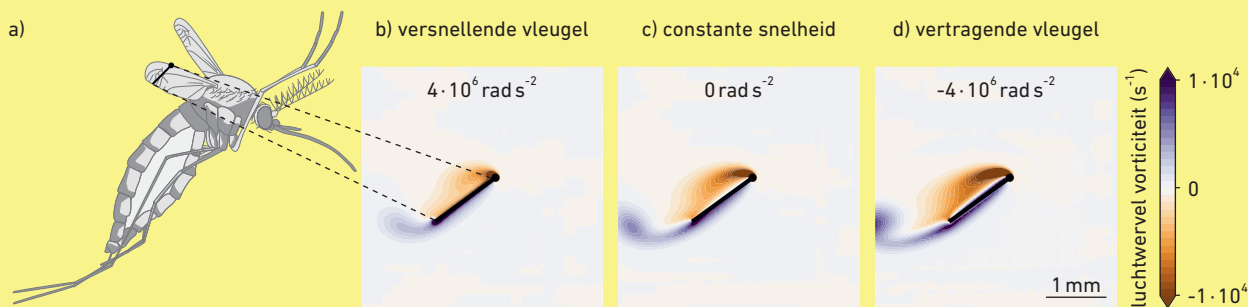
3. Virtuele massakrachten

Zoals eerder benoemd, produceren insecten door de hoge vleugelflapfrequentie ook zeer hoge versnellingen van de vleugels. Hierbij zijn muggen een van de recordhouders, want met flapfrequenties boven de 600 Hz halen de vleugels hoekversnellingen tot wel vier miljoen radialen per seconde in het kwadraat (rad/s^2) [7]. Deze hoge versnellingen resulteren direct in versnellingsgerelateerde aerodynamische krachten op de insectenvleugel. Een vleugel die door de lucht beweegt neemt in zijn zog een hoeveelheid lucht met zich mee (figuur 2). De massa van deze lucht wordt de toegevoegde of virtuele massa genoemd. Als een vleugel versnelt dan oefent deze lucht een kracht op de vleugel uit, de virtuele massakracht. Deze kan

simpelweg berekend worden met de tweede bewegingswet van Newton als $F_{\text{virtueel}} = m_{\text{virtueel}} \cdot a_{\text{vleugel}}$, waarbij m_{virtueel} de virtuele massa is en a_{vleugel} de versnellingsvector van de vleugel. Een vleugel die symmetrisch heen en weer beweegt zou netto geen aerodynamische toegevoegde massakracht produceren, omdat de versnellingskrachten en vertragingsskracht aan het begin en eind van de vleugelslag elkaar geheel opheffen. Maar de grootte van het toegevoegde luchtvolume is ook afhankelijk van de invalshoek van de vleugel: bij een hoge invalshoek heeft de vleugel een groter zog en is dus ook de virtuele massa groter. Hierdoor kan een vliegend insect toegevoegde massakrachten gebruiken als aandrijfkracht en stuurkracht. Dit is vooral van belang voor hoogfrequent flappende vliegers zoals de mug, bij wie toegevoegde massakrachten tot wel 30% bijdragen aan de totale aerodynamische krachten op de vleugel.

4. Wagnereffect

Als een vleugel vanuit een rustpositie in beweging komt, ontstaat er geleidelijk een luchtstroming rond de vleugel die een aerodynamische kracht oplevert. Door de traagheid van de lucht gebeurt dit geleidelijk en daardoor produceert de versnellende vleugel lagere krachten dan je zou verwachten gebaseerd op de instantane snelheid van de vleugel. Dit traagheidseffect wordt het Wagnereffect genoemd. Insecten vliegen door hun vleugel heen en weer te slaan. Hierdoor start de vleugel iedere vleugelslagbeweging weer vrijwel vanuit stilstand. Door het Wagnereffect zijn dus de krachten aan het begin van de vleugelslagbeweging kleiner dan verwacht. Maar aan het eind van de vleugelslagbeweging vertraagt de vleugel en door hetzelfde Wagnereffect zijn de krachten tijdens deze vertraging groter dan je zou verwachten gebaseerd op de verlaging in snelheid. Dit fysische mechanisme is het best te visualiseren door de vleugelvoorrandswirl te vergelijken van insectenvleugels die versnellen, vertragen en met een constante



Figuur 3. a) Een mug slaat zijn vleugels wel zeshonderd keer per seconde heen en weer. De hoge vleugelslagversnellingen en -vertragingen, van tot wel vier miljoen radialen per seconde in het kwadraat, leveren een groot Wagnereffect op [7]. b-d) Luchtwervels rond de muggenvleugel tijdens de versnelling aan het begin van de vleugelslag (b), tijdens een constante snelheid halverwege (c) en tijdens de vertraging aan het eind van de vleugelslag (d). De vleugel wordt aangegeven met een zwarte lijn, waarbij de cirkel de vleugelvoorrands is. De wervels worden gevisualiseerd door middel van vorticeit volgens de kleurlegenda rechts. De vleugelvoorrandswervel (in oranje) is het kleinst bij een versnellende vleugel (b) en het grootst bij de vertragende vleugel (d). Dit komt door het Wagnereffect [7]. Voor de vergelijking bewegen alle vleugels in (b-d) op dezelfde snelheid.

snelheid bewegen (figuur 3). Je ziet dan dat deze wervel het grootst is bij de vertragende vleugel en het kleinst bij de versnellende vleugel. Dit is een direct gevolg van het Wagnereffect. Het Wagnereffect kan goed gemodelleerd worden als een interactie tussen de snelheid en versnelling van de vleugel [7]. Daarom zijn deze krachten het grootst bij hoogfrequent flappende vleugels, zoals die van muggen. Bij deze muggen draagt het Wagnereffect ongeveer 20% bij aan de totale aerodynamische krachten op de vleugel [7].

5. Interactie van de vleugel met zijn zog

Tijdens het vliegen slaan de vleugels van insecten continu heen en weer. Hierdoor beweegt de vleugel niet door onverstoord lucht, maar continu door het zog van de vorige vleugelslagbeweging. Het zog van een flappende vleugel is zeer complex en bestaat uit een neerwaartse luchtstroom en verschillende luchtwervels die losgelaten zijn van de vleugel aan het eind van de vorige vleugelslag. De belangrijkste wervels hierbij zijn de vleugelvoorrandswervel en de vleugeltipwervel. Als de vleugel door dit zog beweegt geeft dit aerodynamische vleugel-zog-interactiekrachten. Afhankelijk van de exacte positionering van de vleugel ten opzichte van

het zog, kunnen deze interactiekrachten leiden tot zowel verhoging als verlaging van de totale aerodynamische krachten. Door een nauwkeurig gepositioneerde vleugelslagbeweging kan het insect de zogwervels hergebruiken voor de huidige vleugelslag. Hierdoor kan het de snelheid waarmee de vleugelvoorrandswervel zich ontwikkelt vergroten en dus de negatieve effecten van het Wagnereffect verkleinen (figuur 3). De ingewikkelde vleugel-zoginteractie maakt het moeilijk dit aerodynamisch mechanisme te bestuderen. Daarom is dit een actief onderzoeksveld.

Samenvatting

De fysica van het vliegen van insecten is complex en totaal anders dan bij vliegtuigen en helikopters. Insecten slaan hun vleugels zeer snel heen en weer, en maken hierdoor gebruik van een reeks onstabiele aerodynamische mechanismen. Deze hangen af van de snelheid én de versnellingen waarmee de vleugel slaat en roteert, en worden gebruikt voor zowel de aandrijving als de sturing van de vlucht. Door deze directe aansturing kunnen insecten uitstekend manoeuvreren. Daarom dient het vliegapparaat van insecten en andere vliegende dieren als bio-inspiratie voor vliegende robots [9], die met fladderende vleugels ook zeer goed kunnen manoeuvreren.

Florian Muijres is hoogleraar Experimentele Zoölogie aan de Wageningen Universiteit. Hij bestudeert de biomechanica en aerodynamica van vliegende vogels, vleermuizen en insecten. Hierbij filmt hij deze vliegende dieren met hogesnelheids-camera's en modelleert hij de aerodynamica met robots en computersimulaties. florian.muijres@wur.nl

REFERENTIES

- 1 M.H. Dickinson en F.T. Muijres, *The aerodynamics and control of free flight maneuvers in Drosophila*, *Philos. Trans. R. Soc. London B* **371**, 20150388 (2016).
- 2 F.T. Muijres, M.J. Elzinga, J.M. Melis en M.H. Dickinson, *Flies Evade Looming Targets by Executing Rapid Visually Directed Banked Turns*, *Science* **344**, 172-177 (2014).
- 3 A. Magnan, *Le vol des insectes* (1934).
- 4 R. Dudley, *The biomechanics of insect flight: form, function, evolution* (2002).
- 5 Mug: www.youtube.com/watch?v=4EGuXf7Fcow. Fruitvlieg: www.youtube.com/watch?v=mZJQFOw9JHU.
- 6 F.T. Muijres, *Feathers by day, membranes by night - Aerodynamic performance in bird and bat flight* (2011).
- 7 W.G. van Veen, J.L. van Leeuwen, B.W. van Oudheusden en F.T. Muijres, *The unsteady aerodynamics of insect wings with rotational stroke accelerations, a systematic numerical study*, *J. Fluid Mech.* **936**, A3 1-45 (2022).
- 8 S.P. Sane, *The aerodynamics of insect flight*. *J. Exp. Biol.* **206**, 4191-4208 (2003).
- 9 M. Karasek, F.T. Muijres, C. De Wagter, B.D. W. Remes en G.C.H.E. de Croon, *A tailless aerial robotic flapper reveals that flies use torque coupling in rapid banked turns*, *Science* **361**, 1089-1094 (2018).
- 10 W.G. Van Veen, J.L. Van Leeuwen en F.T.A. Muijres, *Chordwise offset of the wing-pitch axis enhances rotational aerodynamic forces on insect wings: A numerical study*, *J. R. Soc. Interface* **16** (2019).