

Ontwikkeling van een microvliegtuig met flappende vleugels gebaseerd op de Rosse kolibrie

Frederik Leys

Thesis voorgedragen tot het
behalen van de graad van Master
in de ingenieurswetenschappen:
werktuigkunde

Promotor:

Prof. dr. ir. D. Vandepitte

Assessoren:

Prof. dr. ir. D. Reynaerts
Prof. dr. ir. J. De Schutter

© Copyright K.U.Leuven

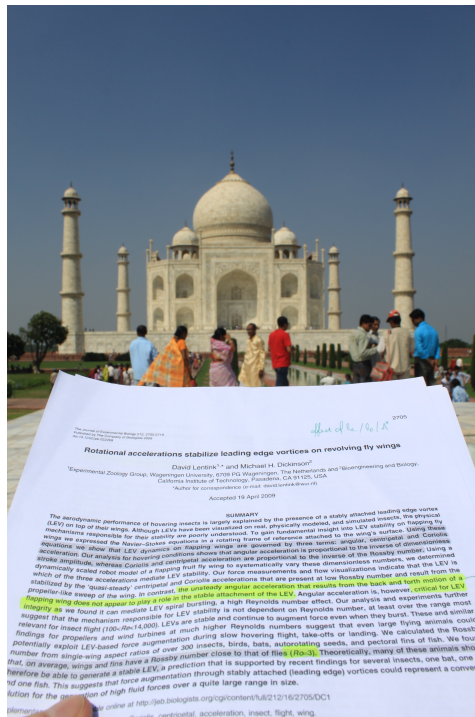
Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot het Departement Werktuigkunde, Celestijnenlaan 300, B-3001 Heverlee.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

Voorwoord

Het maken van mijn masterproef was de meest intense, maar ook de leukste ervaring binnen mijn opleiding als ingenieur aan de Katholieke Universiteit Leuven.

De literatuurstudie voor deze masterproef mocht ik maken tijdens mijn Erasmus Mundus uitwisseling in India [35] aan de Anna University. Dit was een ongelooflijk intense en unieke ervaring (getuige de foto hieronder), waar ik met veel weemoed aan terugdenk.



Figuur 1: Ook tijdens een bezoek aan de Taj Mahal was er tijd om te thesissen, getuige deze foto met op de voorgrond een paper over de invloed van het Reynoldsgetal op de stabilisatie van de aanvalsbordwervel [34].

Bepaalde dingen die ik in India heb gezien, hebben mij echter ook diep geraakt. Ze hebben me niet alleen het belang doen beseffen van de maatschappelijke solidariteit waarvan we hier in België kunnen genieten. Ze hebben me ook doen beseffen dat veel dingen die we hier als vanzelfsprekend beschouwen niet vanzelfsprekend zijn. Studeren en het maken van een masterproef horen daarbij en zijn privileges waarvoor je, als student, dankbaar moet zijn.

Een groot deel van deze dankbaarheid gaat uit naar de personen die hebben bijgedragen tot de realisatie van deze masterproef:

Prof. dr. ir. D. Vandepitte Bedankt om mij te willen begeleiden bij het maken van deze masterproef waarvan ik het onderwerp zelf heb mogen aanbrengen. Bedankt ook voor de vrijheid die u mij gaf bij het maken ervan. En tenslotte, bedankt om mij tweewekelijks te hebben willen ontvangen. Uw inbreng gedurende die momenten was voor mij telkens zeer nuttig. Het maken van mijn thesis was trouwens het leukste wat ik binnen mijn opleiding als ingenieur ervoer en dat heb ik grotendeels aan u te danken.

Prof. dr. ir. D. Reynaerts - Prof. dr. ir. J. De Schutter Het is een eer dat jullie als assessor willen waken en oordelen over mijn werk.

Mr. C. Senthil Kumar - Mr. V. Arumugam Thanks for supporting me in making a literature study for this masterpaper during my Erasmus stay at Anna University.

D. Bastiaansen - B. Van Soom - M. Vanierschot - T. Waumans - Yen Bedankt voor jullie ondersteuning bij het maken van de proefopstelling. Zonder jullie assistentie had deze niet verwezenlijkt kunnen worden.

M. Lombaerts - P. Gysel Bedankt aan het FabLab-team voor het maken van de vele prototypes en het vissen in de bak met base naar de kleine stukjes die steeds ontsnapten.

Tenslotte wil ik de mensen bedanken die mijn thesis hebben nagelezen. Jullie hebben niet alleen mijn beperkt schrijftalent mooi weten te verdoezelen, maar ook het beste in mij naar boven gehaald met jullie kritische opmerkingen.

Frederik Leys

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	iv
Lijst van figuren en tabellen	v
1 Inleiding en basisbegrippen	1
1.1 Probleemstelling en situering	1
1.2 Doelstelling	4
1.3 Basisbegrippen	7
1.4 Besluit van dit hoofdstuk	10
1.5 Overzicht	10
2 Aerodynamica	11
2.1 Karakterisering van de aerodynamica rond flappende vleugels door middel van dimensieloze getallen	11
2.2 Niet-stationaire aerodynamische wervelverschijnselen	15
2.3 Invloed van de pitchbeweging op de liftkracht	17
2.4 Besluit van dit hoofdstuk	21
3 Vleugelbeweging en vleugelmorfologie	23
3.1 Beschrijving van de vleugelbeweging, aan de hand van de slag-, pitch- en deviatiehoek	23
3.2 Invloed van de vleugelbeweging op de liftkracht	27
3.3 Invloed van de vleugelmorfologie op de liftkracht	32
3.4 Besluit van dit hoofdstuk	34
4 Functioneel prototype	35
4.1 Overbrengingsmechanisme	35
4.2 Vleugels	41
4.3 Lichaam en staart	42
4.4 Vermogensysteem	43
4.5 Besluit van dit hoofdstuk	47
5 Experimenteel onderzoek	49
5.1 Meetapparatuur en methode	49
5.2 Resultaten	54
5.3 Besluit van dit hoofdstuk	62
6 Besluit	65

INHOUDSOPGAVE

6.1	Algemeen	65
6.2	Constructie	66
6.3	Bevindingen uit de experimenten	66
6.4	Aanbevelingen	67
	Bibliografie	69

Samenvatting

Flappende vleugelpropulsie, zoals deze waarvan insecten en kolibries gebruik maken, is erg efficiënt bij kleine afmetingen en maakt complexe vliegmanoeuvres mogelijk. Deze eigenschappen maken van microvliegtuigen met flappende vleugels een veelbelovend concept voor microvliegtuigen die bijvoorbeeld binnen in gebouwen moeten kunnen opereren.

De Rosse kolibrie is door zijn afmetingen en zijn vliegprestaties een ideaal voorbeeld voor de ontwikkeling van een microvliegtuig met flappende vleugels. Bovendien is dit één van de weinige soorten waarvan de vleugelbeweging grondig bestudeerd is. Om gebruik te maken van liftversterkende aerodynamische verschijnselen die kunnen optreden rond flappende vleugels, is een complexe vleugelbeweging vereist. Deze is echter moeilijk mechanisch te realiseren, waardoor bestaande microvliegtuigen met flappende vleugels beduidend minder liftkracht genereren dan hun biologische tegenhangers. De vleugelbeweging van het microvliegtuig met flappende vleugels dat voor deze masterproef ontwikkeld is, sluit nauw aan bij deze van de Rosse kolibrie en levert gelijkaardige prestaties. Een resultaat dat in geen enkel ander wetenschappelijk onderzoek wordt geëvenaard.

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

1	Ook tijdens een bezoek aan de Taj Mahal was er tijd om te thesissen, getuige deze foto met op de voorgrond een paper over de invloed van het Reynoldsgetal op de stabilisatie van de aanvalsboordwervel [34].	i
1.1	Links een afbeelding van de ornithopter van Gustave Trouvé [38], het eerste microvliegtuig met flappende vleugels, dat in staat was te vliegen (1870). Rechts de DELFLY MICRO [25], het kleinste microvliegtuig met flappende vleugels en camera.	3
1.2	Een overzicht van de voornaamste microvliegtuigen met klappende en flappende vleugels. De meerderheid gebruikt klappende vleugels. (uit [30]).	4
1.3	Links de <i>Manduca sexta</i> [5]. Rechts de Rosse kolibrie [6].	6
1.4	Beschrijving van de vleugelmorfologie [31].	7
1.5	De basiskenmerken van een insectenvleugel: geen vleugelkromming, een scherpe en stijve aanvalsboord, vleugelnerven en een zeer dun membraan als vleugeloppervlak [4].	8
1.6	Links: Insecten en kolibries bewegen hun vleugels in een horizontaal vlak. Hierbij zijn vier fases te onderscheiden: de buikwaartse slag, de supinatie, de rugwaartse slag en de pronatie [14]. Rechts: door de combinatie van slag- en deviatiebeweging volgen de vleugeltippen een vleugeltiptraject in de vorm van een liggende 8 [41].	9
2.1	Het Reynoldsgetalspectrum van insecten varieert van 10 tot 10^4 [48]. . .	13
2.2	De aanvalsboordwervel die ontstaat als de aanvalshoek groter is dan de kritische aanvalshoek. [2].	16
2.3	Zowel bij flappende vleugels (links [27]) als bij deltavleugels (rechts [3]) wervelt de aanvalsboordwervel onder invloed van een spangewijze stroming als een groeiende spiraal over de vleugel richting vleugeltip. . .	17
2.4	Figuur (a) geeft het tijdsverloop van de grootte van de verschillende krachten weer op een bewegende vleugel. De rode lijn geeft de resulterende kracht weer. De blauwe lijn enkel de component tengevolge van de slagbeweging en de zwarte lijn enkel de component tengevolge van de liftkracht door rotatiecirculatie en zogvangst. Figuur (b) geeft de richting aan van de resulterende kracht (uit [26]).	18

2.5	Analoog aan 2.4 maar dan nu voor drie verschillende gevallen van de fase tussen slag- en pitchbeweging. Figuur (a) geeft het tijdsverloop weer van de grootte van de verschillende krachten op een flappende vleugel. De rode lijn geeft de resulterende kracht weer. De blauwe lijn enkel de component tengevolge van de slagbeweging en de zwarte lijn enkel de component tengevolge van de liftkracht door rotatiecirculatie en zogvangst. Figuur (b) geeft de richting aan van de resulterende kracht. Een voorijlend pitchbeweging heeft een positief effect op de liftkracht (uit [26]).	19
2.6	Een illustratie van het zogvangst fenomeen. (A) Supinatie, (B) begin van de rugwaartse slag, (C) momentopname vroeg in de rugwaartse slag. (A) Het zog veroorzaakt door de voorgaande slag (CWV) beweegt op het einde van de vleugelsslag richting de vleugel. Als de vleugel door het zog beweegt (B) en (C) verhoogt de relatieve aanstroomsnelheid, wat een verhoogde liftwerking veroorzaakt. (uit [48])	20
3.1	De vleugelbeweging ten opzichte van het lichaam kan omschreven worden aan de hand van drie hoeken: de slaghoek (ϕ), de deviatiehoek (θ) en de pitchhoek (α). (uit [41])	24
3.2	Links: de insecten in deze figuur zijn zo gekozen dat ze een breed Reynoldsgetalspectrum omvatten. Rechts: deze insecten beschikken over een opvallend gelijkaardig tijdsverloop van slag-, deviatie- en pitchhoek. (uit [21])	26
3.3	Het tijdsverloop van de slaghoek en de pitchhoek zoals opgemeten bij de Rosse kolibrie. (afgeleid uit [52])	27
3.4	De invloed van de flapfrequentie op de liftkracht. De liftkracht neemt exponentieel toe met de flapfrequentie. (uit [41])	28
3.5	De invloed van de aanvalshoek bij midslag op de liftkracht. De optimale aanvalshoek bij midslag situeert zich rond 45° . (uit [41])	29
3.6	Naargelang de supinatie of pronatie voor, tijdens of na het omkeren van de slagbewegingsrichting gebeurt, spreekt men respectievelijk over een voorijlende, symmetrische of na-ijlende pitchbeweging. (uit [45])	30
3.7	De invloed van het faseverschil tussen slag- en pitchbeweging voor twee verschillende vleugelvormen. Beide vleugelvormen bereiken een optimum bij een, met 2,5% of 9° , voorijlende pichtbeweging. (uit [17])	31
3.8	De kreukeling van het vleugeloppervlak die men kan waarnemen bij insectenvleugels doet de gevoeligheid voor variaties in het Reynoldsgetal sterk afnemen. (uit [50])	34
3.9	Overzicht van de bevindingen in verband met de vleugelbeweging. . . .	34
4.1	De vleugelbeweging van de Rosse kolibrie vergeleken met deze van het vereenvoudigd kinematisch model. De deviatiehoek is niet weergegeven omdat deze wordt verwaarloosd. De slaghoeken zijn nagenoeg aan elkaar gelijk.	37

4.2	Het slagnokmechanisme schematisch voorgesteld. De rode vorm is de slagnok, de groene lijnen zijn de kabels, de blauwe vorm is het vleugelwiel en de driehoek is de vleugel.	38
4.3	De linkse figuur geeft de slagnok weer en de positie van de punten A, B, C en D berekend voor een sinusoïdaal slaghoekverloop en een bepaalde slagamplitude. De figuur rechts toont het bekomen slaghoekverloop vergeleken met het gewenste verloop.	39
4.4	De zwarte staafjes zijn bevestigd aan de vleugel en glijden langs de pitchnok.	41
4.5	Links de vorm van de vleugel van de Rosse kolibrie (zie voetnoot). Rechts de gefabriceerde vleugel. De aanvalsboord en de nerven bestaan uit carbon en het membraan is uit MYLAR.	42
4.6	De motorkarakteristieken van de geselecteerde motor [9].	44
4.7	Een afbeelding van de geselecteerde batterij (type 2) [15].	46
4.8	de <i>Hip Hop II Rabbit Micro Receiver</i> met een massa van 115 mg [15].	46
4.9	Het microvliegtuig met flappende vleugels met een vleugelspanwijdte van 113 mm en een gewicht van 4,15g.	48
5.1	Links: Voor de experimenten is het microvliegtuig (zonder staart) bevestigd op een constructie waarmee de spanning in de kabel kan worden aangepast. Dit geheel is gemonteerd op de krachtcel die ingeklemd is in een bankschroef. Rechts een detailweergave van het microvliegtuig op de kabelspanner.	50
5.2	Een typische krachtmeting: de bovenste figuur geeft de krachtmeting gedurende 60 seconden weer. Tussen het starten en het stoppen van de flapbeweging treedt er een regimetoestand op die is uitvergroot in het onderste deel van de figuur.	51
5.3	Twee simultane hogesnelheidsopnames: links een zijaanzicht en rechts een vooraanzicht. De vleugelbeweging wordt gemeten op basis van drie gemarkeerde punten.	52
5.4	Een fragment uit een typische geluidsopname. In de blauwe band is de tijd weergegeven tot op 0,1s. De pijltjes geven de flapcycli aan. Er zijn in dit fragment, dat ongeveer 0,5s duurt, 17 flapcyli te zien.	53
5.5	De invloed van de pitchnok op de aanvalshoek bij midslag. Links de vorm van de pitchnokken berekend voor verschillende aanvalshoeken bij midslag. Het verschil zit hem voornamelijk in de radiale afstand van de buitenste rand. Rechts de gemeten pitchhoek en slaghoek voor de verschillende pitchnokken. De aanvalshoek bij midslag kan, zoals in 3.1 besproken is, bekomen worden uit de pitchhoek bij midslag (bij ongeveer 25% en 75% van de slagbeweging).	55
5.6	De invloed van de pitchnok op de fase tussen pitch- en slagbeweging: Links de vorm van de pitchnokken berekend voor verschillende faseverschillen. Rechts de gemeten pitchhoek en slaghoek voor de verschillende pitchnokken.	56

5.7	De invloed van de voedingsspanning op de flapfrequentie (links) en van de flapfrequentie op de liftkracht (rechts), zoals dit effect is gemeten voor de geteste pitchnokken.	57
5.8	De invloed van de voedingsspanning op de liftkracht, zoals dit effect is gemeten voor de geteste pitchnokken.	58
5.9	(a) De liftkracht als functie van de flapfrequentie, zoals dit effect is gemeten voor verschillende fases tussen pitch- en slagbeweging, (b) de liftkracht als functie van de fase tussen pitch- en slagbeweging, zoals dit effect is gemeten bij een voedingsspanning van 3,5 V.	59
5.10	(a) De liftkracht als functie van de frequentie, zoals dit effect is gemeten voor verschillende aanvalshoeken bij midslag, (b) de liftkracht als functie van de aanvalshoek bij midslag, zoals dit effect is gemeten is bij een voedingsspanning van 3,5 V.	60
5.11	De liftkracht en de voedingsstroom als functie van de voedingsspanning, zoals dit effect is gemeten voor pitchnok PA 33°. De stippellijnen staan voor de maximale stroom (en liftkracht) die verschillende types van batterijen kunnen leveren.	61

Lijst van tabellen

1.1	Alhoewel de Rosse kolibrie en de <i>Manduca sexta</i> over vergelijkbare vleugellengtes beschikken, zijn er ook duidelijke verschillen zoals de massa.	6
2.1	Het Reynoldsgetal, de gereduceerde frequentie en de parameters waaruit deze berekend zijn voor de insecten uit figuur 2.1.	14
2.2	Het Reynoldsgetal, de gereduceerde frequentie en de parameters waaruit deze berekend zijn voor de Rosse kolibrie en het ontworpen microvliegtuig met flappende vleugels.	14
3.1	De voornaamste aspecten van de vleugelbeweging van de Rosse kolibrie (uit [52]).	27
3.2	De voornaamste aspecten van de vleugelmorfologie van de Rosse kolibrie. Deze dienen als richtwaarde voor het vleugelontwerp van het microvliegtuig met flappende vleugels. De gegevens komen uit onderzoek van Tobalske [52].	33
4.1	Samenvatting van de voornaamste eigenschappen van de vleugels, vergeleken met de richtwaarde zoals in hoofdstuk 3 bepaald.	41
4.2	Een vergelijking van de verschillende types motoren die getest zijn. De laatste genereert een beduidend hogere flapfrequentie.	43
4.3	Een vergelijking van de verschillende types tandwieloverbrengingen die getest zijn. Enkel de laatste was robuust genoeg.	45
4.4	Een vergelijking van de verschillende types lipo-batterijen die getest zijn. Type 2 is de enige die een voldoende hoge ontladingsstroom levert.	45
4.5	De gewichtsverdeling onder de componenten.	48

5.1	De berekende waarden (b) en de gemeten waarden (g) van de parameters die de vleugelbeweging bepalen voor de pitchnokken in figuur 5.5a. . . .	55
5.2	De berekende waarden (b) en de gemeten waarden (g) van de parameters die de vleugelbeweging bepalen voor de pitchnokken in figuur 5.6a. Een positief faseverschil duidt op een voorijlende pitchbeweging.	56
5.3	De parameters van de vleugelbeweging die gecreëerd worden door pitchnok PA 33° bij een voedingsspanning van 3,5V.	63

Hoofdstuk 1

Inleiding en basisbegrippen

1.1 Probleemstelling en situering

Microvliegtuigen met flappende vleugels zijn onbemande vliegtuigen met beperkte afmetingen die, in tegenstelling tot microvliegtuigen met gefixeerde vleugels, niet alleen liftkracht, maar ook stuwkracht ontwikkelen door het flappen met hun vleugels. De laatste jaren is de interesse in de ontwikkeling van microvliegtuigen met flappende vleugels fel toegenomen. Hiervoor zijn er verschillende redenen.

Ten eerste zijn er de recente bevindingen¹ omtrent de aerodynamische verschijnselen rond flappende vleugels. Deze bevindingen voeden de overtuiging dat, bij beperkte afmetingen, flappende vleugels efficiënter zijn dan gefixeerde of roterende vleugels. Ten tweede zorgen recente technologische ontwikkelingen, bijvoorbeeld deze in de micro-elektronica, ervoor dat ook de praktische realisatie van microvliegtuigen met flappende vleugels binnen handbereik ligt.

Tenslotte is ook de interesse in de toepassing van microvliegtuigen toegenomen. Instanties zoals het DARPA [10] zorgen voor een financiële injectie in het onderzoek.

1.1.1 Waarom flappende vleugels?

Verschillende eigenschappen onderscheiden microvliegtuigen met flappende vleugels van microvliegtuigen met gefixeerde of roterende vleugels.

Een breed scala aan vliegmanoeuvres

Whether cruising through an open field or circling a garbage can, flies impress us with their remarkable aerodynamic maneuverability [42].

Met hun flappende vleugels zijn insecten, maar ook kleine vogels zoals kolibries, in staat tot een breed scala aan vliegmanoeuvres. Zo zijn ze in staat om te hoveren, zijwaarts te vliegen, ondersteboven te landen en zelfs achterwaarts op te stijgen [26].

¹beschreven in hoofdstuk 2

Bovendien zijn ze niet gedwongen tot minimale vliegsnelheden en kunnen ze hun vliegsnelheid vrij variëren van 0 tot meer dan 12m/s. [52]

Een hoge aerodynamische efficiëntie

Bij lage vliegsnelheden en kleine vleugelafmetingen (regimes gekenmerkt door een laag Reynoldsgetal²) daalt de aerodynamische efficiëntie van microvliegtuigen met gefixeerde of roterende vleugels dramatisch [59]. Daarentegen neemt de aerodynamische efficiëntie van microvliegtuigen met flappende vleugels onder deze omstandigheden juist toe [31, 48].

Overige eigenschappen

Andere eigenschappen die vaak vermeld worden, zijn de mogelijkheid tot onopvallend opereren en het vermijden van gevaarlijk roterende vleugels.

Toepassingsdomeinen

Door de bovenstaande eigenschappen, met name het breed scala aan vliegmanoeuvres en de hoge aerodynamische efficiëntie in regimes gekenmerkt door een laag Reynoldsgetal, zijn microvliegtuigen met flappende vleugels uiterst geschikt om te vliegen binnen in gebouwen, bossen, tunnels, grotten of op andere terreinen waar een lage vliegsnelheid en een hoge manoeuvreerbaarheid nodig zijn.

Door hun hoge efficiëntie in regimes gekenmerkt door een laag Reynoldsgetal zijn microvliegtuigen met flappende vleugels ook erg geschikt voor plaatsen waar een dunne atmosfeer heerst, zoals bijvoorbeeld op Mars [39].

1.1.2 Overzicht van het onderzoek rond microvliegtuigen met flappende vleugels

De laatste jaren gebeurt er veel onderzoek rond flappende vleugels en hun toepassing op microvliegtuigen.

Onderzoek naar de aerodynamische verschijnselen rond flappende vleugels

Ellington verrichtte begin jaren tachtig pionierswerk in het onderzoek naar de aerodynamische verschijnselen rond flappende vleugels en vermeldde als eerste de stabilisatie van de aanvalsboordwervel³ [28].

In meer recent onderzoek gebruikte Dickinson een dynamisch schaalmodel van een flappende vleugel ondergedompeld in een tank gevuld met olie [26]. Met deze

²gedefinieerd in 2.1.1

³gedefinieerd in 2.2.1

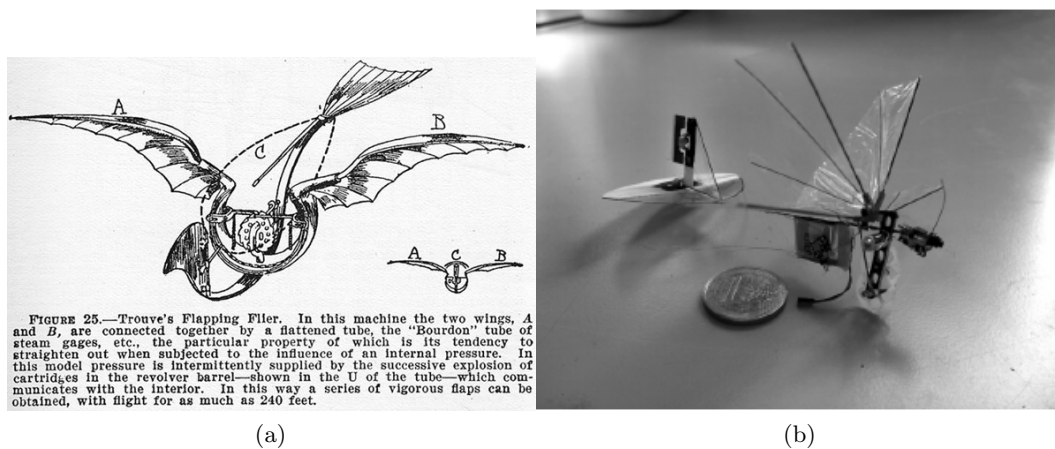
opstelling stelde ze als eerste zovangst⁴ en liftkracht door rotatiecirculatie⁵ vast. Deze bevindingen werden bevestigd door numerieke simulaties van Liu [20].

Onderzoek rond de ontwikkeling van flappende microvliegtuigen

De mens laat zich al minstens sinds Leonardo da Vinci inspireren door de natuur om vliegtuigen te bouwen met flappende vleugels. In 1870 bouwde Gustave Trouvé het eerste vliegtuig met flappende vleugels dat ook kon vliegen [38] (figuur 1.1a).

Meer recent bouwden onderzoekers aan de TU Delft een microvliegtuig met klappende⁶ vleugels dat autonoom kan vliegen met behulp van beeldherkenning [25] (figuur 1.1b).

Momenteel lijkt het onderzoek zich toe te spitsen op het gebruik van resonantiestructuren om de vleugels aan te drijven. Baanbrekend onderzoek hieromtrent gebeurt door Wood aan de universiteit van Harvard [58]. Tabel 1.2 geeft een overzicht van de voornaamste microvliegtuigen met klappende en flappende vleugels die bekend zijn in de literatuur. Deze lijst kan nog aangevuld worden met [44] en met het microvliegtuig van AEROVIRONMENT [1], waarover niets gepubliceerd is.



Figuur 1.1: Links een afbeelding van de ornithopter van Gustave Trouvé [38], het eerste microvliegtuig met flappende vleugels, dat in staat was te vliegen (1870). Rechts de DELFLY MICRO [25], het kleinste microvliegtuig met flappende vleugels en camera.

⁴beschreven in 2.3.2 op pagina 19

⁵beschreven in 2.3.1 op pagina 18

⁶Het verschil tussen flappende en klappende vleugels komt aan bod in 1.2.3.

Category	Name	DOF	Weight (g)	Span (in)	Length (in)
<i>Clapping Wing MAVs</i>	Wright State University	2	12.56	7.9	9
	I-Fly I-bird/fairy/wings (wingsmaster ornithopters)	2	12	10.5	8.25
	Delfly I	3	30	19.69	20
	Delfly II (hover)	3	16.07	11.02	11
	Delfly II (forward)				
	Delfly Micro	3	3.07	3.94	4
	NPS Flier Dr. Jones	2	12.4	10.6	7.09
	OSFC Flier	2	1.47	2.36	2.76
	Flytech Dragonfly	2	28.35	12.3	16.5
	<i>Flapping Wing MAVs</i>	I-Fly Vamp/Wasp	2	13	10.5
Microbat (UF/DARPA)		2	12.5	9.06	6
UMD small bird		2	16.3	13.5	8
UMD big bird		2	47	22.5	10.5
<i>Animals</i>	Northern Oriole	many	35	10.5	7
	Ruby-Throated Hummingbird	many	3	4	3.5
	Northern Cardinal	many	45	11	8.5
	Canary	many	23	6.5	5

Figuur 1.2: Een overzicht van de voornaamste microvliegtuigen met klappende en flappende vleugels. De meerderheid gebruikt klappende vleugels. (uit [30]).

1.2 Doelstelling

Door de moeilijkheid om de complexe vleugelbeweging van insecten of kolibries adequaat na te bootsen, blijven microvliegtuigen met flappende vleugels achter op hun biologische tegenhangers. Een grote uitdaging is dus het ontwerpen van een lichtgewicht mechanisme dat in staat is tot het adequaat uitvoeren van de complexe vleugelbeweging. Dit is dan ook de voornaamste doelstelling van deze masterproef.

Omwille van de beperkte tijd beschikbaar voor deze masterproef, is er gekozen om in eerste instantie te focussen op de ontwikkeling van een microvliegtuig met flappende vleugels dat ter plaatse kan blijven hangen in de lucht door evenveel liftkracht te genereren als de massa van het microvliegtuig. Deze vliegmodus noemen we in het vervolg van de tekst *hoveren*. De aanpassingen die nodig zijn om te manoeuvreren kunnen dan eventueel in een volgend project gebeuren.

Initieel was de doelstelling van deze masterproef omschreven als het ontwikkelen van een microvliegtuig met flappende vleugels. Na de literatuurstudie is er, op basis van de situering, de technische beperkingen en bestaand onderzoek, besloten om de afmetingen en de vleugelbeweging van het microvliegtuig te baseren op deze van de Rosse kolibrie. De bedenkingen die tot dit besluit hebben geleid staan onder 1.2.1, 1.2.2, 1.2.3 en 1.2.4 samengevat.

1.2.1 Een bovengrens voor de vleugelspanwijdte

Daar het vliegen binnen in gebouwen mogelijk één van de voornaamste toepassingen is van een microvliegtuig met flappende vleugels, is het belangrijk dat de afmetingen en in het bijzonder de vleugelspanwijdte (zoals gedefinieerd in 1.3.1) beperkt zijn. Bovendien blijkt uit onderzoek dat de liftversterkende aerodynamische mechanismen die nodig zijn om efficiënt te hoveren, enkel optreden in regimes gekenmerkt door een laag Reynoldsgetal [34]. Dit werpt een tweede beperking op voor de vleugelafmetingen.

1.2.2 Een ondergrens voor het gewicht

De massa bepaalt de ondergrens voor de afmetingen van een microvliegtuig met flappende vleugels. Een realistische ondergrens voor de massa van het microvliegtuig met flappende vleugels dat we willen ontwikkelen, schatten we aan de hand van de massa van reeds bestaande microvliegtuigen met flappende vleugels en hun componenten. Bij wijze van voorbeeld beschouwen we de DelFly Micro [25] (figuur 1.1b). Met een vleugelspanwijdte van 10 cm en een massa van 3,07g is dit één van de kleinste microvliegtuigen met klappende vleugels. Omdat de DelFly Micro vervaardigd is uit betaalbare componenten, kunnen we veronderstellen dat de ontwikkeling van een microvliegtuig met een gelijkaardig gewicht van om en bij de 3g mogelijk moet zijn.

1.2.3 Klappende of flappende vleugels?

Zoals in tabel 1.2 te zien is, maken de meeste microvliegtuigen gebruik van klappende vleugels. Dit is een tweedekker concept waarbij men aan weerszijden van het microvliegtuig een paar vleugels boven elkaar plaatst. De vleugels klappen tegen elkaar door in tegenfase rond dezelfde as te roteren. Voor dit project wordt er echter bewust gekozen voor één paar flappende vleugels en dit om twee redenen.

Ten eerste is het nog niet aangetoond dat ook bij klappende vleugels de liftversterkende aerodynamische mechanismen ⁷ optreden, die nodig zijn om efficiënt te vliegen. Bovendien is de flapamplitude bij een constructie met klappende vleugels beperkt tot maximaal 90°. Omdat de flapamplitude een belangrijke factor is bij het creëren van de liftversterkende mechanismen, is het eerder waarschijnlijk dat liftversterkende mechanismen niet optreden bij microvliegtuigen met klappende vleugels.

⁷worden uitgebreid beschreven in hoofdstuk 2

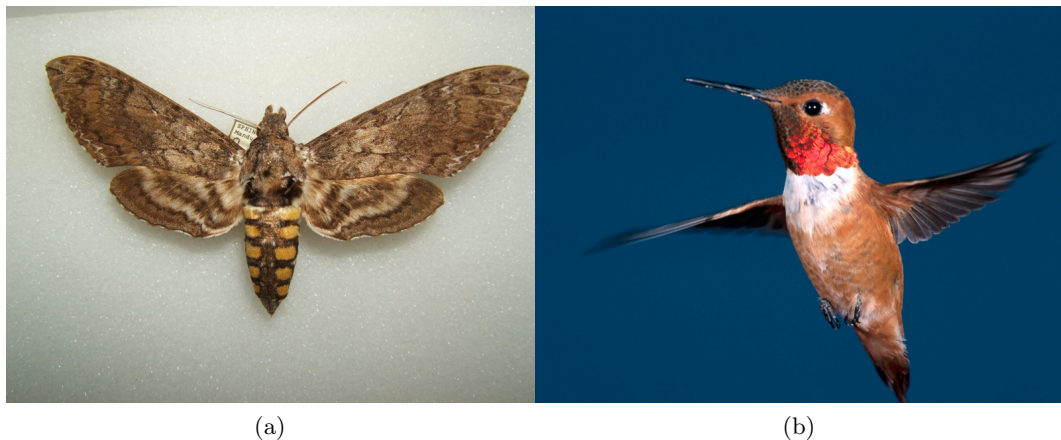
Ten tweede is het niet aangetoond dat microvliegtuigen met klappende vleugels, wat manoeuvreren betreft, over hetzelfde potentieel beschikken als biologische vliegers die overigens allemaal over flappende vleugels beschikken.

In de natuur gebeurt het manoeuvreren door een specifieke asymmetrische vleugelbeweging, waarbij beide vleugels een andere beweging maken. Het is betwifelbaar dat microvliegtuigen met klappende vleugels dit ook kunnen.

1.2.4 Inspiratie uit de natuur

Insecten, vogels en vleermuizen hebben zich door miljoenen jaren evolutie ontwikkeld tot erg efficiënte “vliegmachines”, die in staat zijn tot ongeëvenaarde vliegmanoeuvres. Het ligt dus voor de hand om ons voor de optimalisatie van de vleugelbeweging te baseren op waarnemingen uit de natuur.

Van slechts weinig biologische soorten is de vleugelbeweging grondig onderzocht. Slechts twee kunnen hierbij als voorbeeld dienen: de *Manduca sexta* en de Rosse kolibrie. De vleugelbeweging van de *Manduca sexta* (figuur 1.3a), een nachtvlinder met een vleugelspanwijdte tussen de 90 en de 120mm [5], is bestudeerd door Ellington [57]. De vleugelbeweging van de Rosse kolibrie (figuur 1.3b), met een vleugelspanwijdte van 110 cm, is bestudeerd door Tobalske [52]



Figuur 1.3: Links de *Manduca sexta* [5]. Rechts de Rosse kolibrie [6].

	massa	vleugellengte	vleugeloppervlak	flapfrequentie
Rosse kolibrie	3,4g	47mm	5,2cm ²	41Hz
<i>Manduca sexta</i>	1,6g	50mm	9cm ²	25Hz

Tabel 1.1: Alhoewel de Rosse kolibrie en de *Manduca sexta* over vergelijkbare vleugellengtes beschikken, zijn er ook duidelijke verschillen zoals de massa.

Alhoewel beide soorten over ruwweg dezelfde vleugelspanwijdte beschikken, zijn er ook grote verschillen tussen vleugelmorfologie en vleugelbeweging waar te nemen. De voornaamste staan samengevat in tabel 1.1. Hieruit blijkt dat de Rosse kolibrie in staat is tot het liften van een veel groter lichaamsgewicht dan de *Manduca sexta*. Dit lichaamsgewicht is bovendien ook groter dan de ondergrens voor het gewicht van het microvliegtuig met flappende vleugels dat we hierboven bepaald hebben (3g). We kunnen hieruit besluiten dat we ons voor de vleugelbeweging kunnen baseren op deze van de Rosse kolibrie.

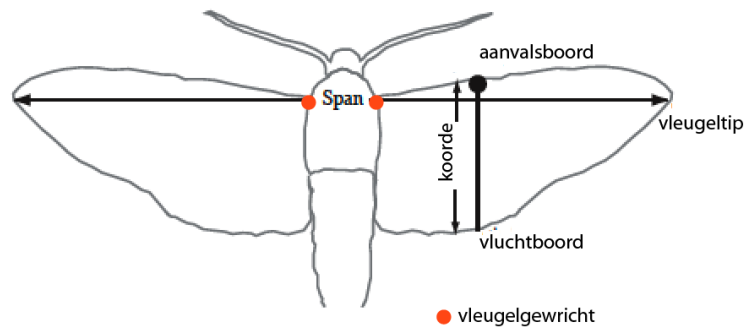
1.3 Basisbegrippen

1.3.1 Beschrijving van de vleugelmorfologie

Vleugels van insecten en kolibries maken gebruik van andere aerodynamische mechanismen dan conventionele vliegtuigen met gefixeerde vleugels. Om optimaal gebruik te maken van deze aerodynamische mechanismen, beschikken ze over vleugels die sterk verschillen van conventionele vliegtuigvleugels.

Vleugels van insecten en kolibries beschikken over een scherpe aanvalsboord [53], zijn over heel het oppervlak dun, hebben een verwaarloosbare vleugelkromming en beschikken in het algemeen over een lage aspect ratio.

Voor bepaalde soorten, zoals de *manduca sexta* vervormen de vleugels aanzienlijk tijdens het flappen. Uit onderzoek [23] blijkt dat deze vervorming bijna volledig door inertiekrachten wordt bepaald en dat de invloed van aerodynamische krachten op de vervorming verwaarloosbaar is. Dit betekent dat er slecht een beperkte aero-elastische koppeling optreedt [24].



Figuur 1.4: Beschrijving van de vleugelmorfologie [31].

Terminologie

De terminologie die we hier hanteren voor de beschrijving van de vorm van flappende vleugels is gebaseerd op deze voor conventionele gefixeerde vleugels. Voor sommige begrippen zijn er echter aangepaste definities nodig. Hieronder volgt een overzicht

van enkele vaak terugkomende begrippen. (figuur 1.4)

- Het vleugelgewricht is het punt waar de vleugel aan het lichaam is gehecht en van waaruit de vleugel in beweging wordt gezet.
- De vleugellengte is de afstand tussen het vleugelgewricht en de vleugeltip.
- De vleugelspanwijdte refereert naar de afstand tussen de twee vleugeltippen wanneer de vleugels lateraal in elkaars verlengde liggen. Hierbij mag men de afstand tussen de twee vleugelgewrichten niet vergeten.
- De vleugelkooorde van biologische vleugels varieert aanzienlijk tussen vleugelbasis en vleugeltip. Daarom nemen we de gemiddelde kooorde als referentiekooorde.
- De aspect ratio is de verhouding tussen de vleugellengte en de gemiddelde vleugelkooorde.

De structuur van een insectenvleugel is duidelijk zichtbaar op figuur 1.5. De basiskenmerken zijn: een stijve aanvalsboord die zorgt voor stijfheid in de lengteas van de vleugel; vleugelnerven die zorgen voor de stijfheid in de richting van de kooorde en een zeer dun membraan als vleugeloppervlak.



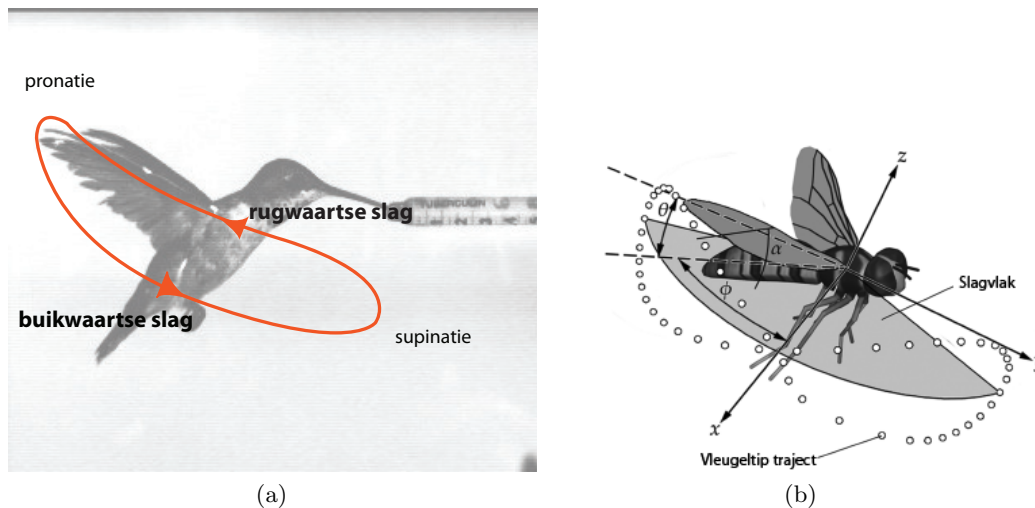
Figuur 1.5: De basiskenmerken van een insectenvleugel: geen vleugelkromming, een scherpe en stijve aanvalsboord, vleugelnerven en een zeer dun membraan als vleugeloppervlak [4].

1.3.2 Beschrijving van de vleugelbeweging van flappende vleugels

De meeste vogels flappen hun vleugels in een ongeveer verticaal vlak. Insecten en kolibries, die gebruik maken van andere aerodynamische mechanismen, flappen hun vleugels, bij het hoveren, echter in een vlak dat bijna horizontaal ligt, zoals in figuur

1.6a weergegeven. Dit vlak noemt het slagvlak en is gedefinieerd door drie punten: het vleugelgewricht en de positie van de vleugeltip bij maximale vleugeluitwijking in buikwaartse en in rugwaartse slag.

Vier achtereenvolgende fasen onderscheiden zich in de vleugelbeweging van insecten en kolibries. De buikwaartse slag, de supinatie, de rugwaartse slag en de pronatie. Figuur 1.6a geeft aan dat de vleugels bij de overgang tussen buikwaartse en rugwaartse slag een rotatie rond de lengteas van hun vleugels maken. Door deze rotatie beschikken de vleugels gedurende zowel de buikwaartse als de rugwaartse slag over de optimale aanvalshoek. De rotatie bij de overgang van buikwaartse naar rugwaartse slag wordt de supinatie genoemd, de rotatie bij de overgang van rugwaartse naar buikwaartse slag de pronatie.



Figuur 1.6: Links: Insecten en kolibries bewegen hun vleugels in een horizontaal vlak. Hierbij zijn vier fasen te onderscheiden: de buikwaartse slag, de supinatie, de rugwaartse slag en de pronatie [14]. Rechts: door de combinatie van slag- en deviatiebeweging volgen de vleugeltippen een vleugeltiptraject in de vorm van een liggende 8 [41].

De vleugelbeweging kan gezien worden als een combinatie van drie deelbewegingen: de slag-, de pitch- en de deviatiebeweging. De slagbeweging voert de rugwaartse en de buikwaartse slag uit in het slagvlak. De pitchbeweging voert de supinatie en de pronatie uit. De deviatiebeweging tenslotte, doet de vleugel gedurende de slagbeweging afwijken van het slagvlak.

De vleugeltip volgt zo een bepaald traject, het zogenaamde vleugeltiptraject. Het vleugeltiptraject is verschillend van soort tot soort, maar volgt in het algemeen een traject in de vorm van een liggende 8, zoals afgebeeld in figuur 1.6b.

1.4 Besluit van dit hoofdstuk

1.4.1 Waarom flappende vleugels

In vergelijking met alternatieven die gebruik maken van gefixeerde, roterende of klappende vleugels, zijn microvliegtuigen met flappende vleugel niet alleen efficiënter in regimes die gekenmerkt worden door een laag Reynoldsgetal. Ze zijn ook in staat tot een beduidend breder scala aan manoeuvres. Hierdoor zijn ze bij uitstek geschikt om te opereren binnen in gebouwen.

1.4.2 Doelstelling

Er is gekozen om het ontwerp van het microvliegtuig met flappende vleugels te baseren op de Rosse kolibrie. Hierbij leggen we de focus op de ontwikkeling van een lichtgewicht mechanisme dat in staat is tot het adequaat nabootsen van de vleugelbeweging waargenomen bij de Rosse kolibrie tijdens het hoveren.

1.5 Overzicht

Hoofdstuk twee geeft een overzicht van de aerodynamische verschijnselen rond flappende vleugels. Dit hoofdstuk dient voornamelijk om de bevindingen in de andere hoofdstukken beter te begrijpen.

In hoofdstuk drie gaan we dieper in op de vleugelbeweging. Er is, door middel van een literatuurstudie, onderzocht wat de invloed is van verschillende aspecten van de vleugelbeweging op de aerodynamica rond flappende vleugels.

Hoofdstuk vier beschrijft het ontwikkelde microvliegtuig met flappende vleugels. Het ontwerp steunt op de bevindingen uit hoofdstuk twee en hoofdstuk drie.

In hoofdstuk vijf staat het experimenteel onderzoek beschreven dat is uitgevoerd op het ontwikkelde microvliegtuig met flappende vleugels. Dit onderzoek stelt ons in staat het ontwerp van het microvliegtuig met flappende vleugels te verbeteren door ondermeer na te gaan wat de invloed is van verschillende aspecten van de vleugelbeweging op de liftkracht.

Tot slot eindigen we in hoofdstuk zes met het algemeen besluit. Hierin staan niet enkel de bevindingen uit deze masterproef, maar ook de aanbevelingen voor mogelijke toekomstige projecten.

Hoofdstuk 2

Aerodynamica

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de aerodynamica rond flappende vleugels en dient als achtergrondkennis bij het vervolg van de tekst.

Het merendeel van het onderzoek over de aerodynamica rond flappende vleugels gaat over de aerodynamica rond insectenvleugels. Uit deze onderzoeken blijkt dat insecten gebruik maken van enkele liftversterkende mechanismen die ervoor zorgen dat ze een liftkracht ontwikkelen die vele malen hoger is dan deze rond conventionele vleugels in een stationaire stroming.

Veel van de insecten in deze onderzoeken beschikken echter over beduidend kleinere vleugelafmetingen en beduidend hogere flapfrequenties dan deze van het microvliegtuig met flappende vleugels dat gebaseerd is op de Rosse kolibrie.

Desalniettemin tonen we in de volgende paragraaf met behulp van dimensieloze getallen aan dat de stroming rond de vleugels van het microvliegtuig erg gelijkaardig is aan deze rond insectenvleugels en dat het waarschijnlijk is dat ook het microvliegtuig gebruik maakt van dezelfde liftversterkende mechanismen als waarvan insecten gebruik maken.

Het laatste deel van dit hoofdstuk bespreekt de voornaamste van deze liftversterkende mechanismen.

2.1 Karakterisering van de aerodynamica rond flappende vleugels door middel van dimensieloze getallen

In combinatie met een geometrische en kinematische gelijkenis karakteriseren twee dimensieloze getallen de aerodynamica rond flappende vleugels tijdens het hoveren. Deze zijn het Reynoldsgetal en de gereduceerde frequentie [21, 37, 48].

2.1.1 Het Reynoldsgetal

Het Reynoldsgetal (Re) geeft de verhouding weer tussen de inertiekrachten en de viskeuze krachten die inwerken op de vleugels en bepaalt of een stroming laminair of

turbulent is [16]. Het Reynoldsgetal is als volgt gedefinieerd:

$$Re = \frac{U_{ref} L_{ref}}{\nu} \quad (2.1)$$

Waarbij ν de kinematische viscositeit is van lucht ($\nu = 15,4 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ bij $25^\circ C$), U_{ref} een referentiesnelheid en L_{ref} een referentielengte.

Om het Reynoldsgetal voor de stroming rond flappende vleugels te definiëren neemt men voor L_{ref} de gemiddelde vleugelkoorde c_m en voor de referentiesnelheid U_{ref} is de keuze afhankelijk van de vliegmodus. Indien mogelijk neemt men gewoonlijk de voorwaartse vliegsnelheid U_{vw} . Tijdens het hoveren is deze echter gelijk aan nul en neemt men de gemiddelde vleugeltipsnelheid $U_{wt,m}$ als referentiesnelheid:

$$U_{wt,m} = \omega_m L$$

Hierbij is L de vleugellengte en ω_m de gemiddelde hoeksnelheid, die bepaald wordt als volgt:

$$\omega_m = 2\Phi f$$

met Φ als de slagamplitude (gemeten in radialen) en f de flapfrequentie. Dit levert de volgende uitdrukkingen op voor het Reynoldsgetal tijdens het hoveren:

$$Re = \frac{U_{wt,m} c_m}{\nu} = \frac{2\Phi f L c_m}{\nu} = \frac{4\Phi f L^2 c_m}{\nu AR} \quad (2.2)$$

De laatste uitdrukking in vergelijking 2.2, waarbij AR de aspect ratio voorstelt, maakt het eenvoudiger om dieren van verschillende afmetingen te vergelijken. Bij insecten variëren de vleugelslagamplitude (Φ) en de aspect ratio immers niet significant [21]. De flapfrequentie neemt daarentegen sterk toe met dalende vleugellengte, wat resulteert in een Reynoldsgetalspectrum van 10 tot 10^4 (figuur 2.1). De insecten in deze figuur zijn zo gekozen dat ze een breed Reynoldsgetalspectrum omvatten.

2.1.2 Het Strouhalgetal en de gereduceerde frequentie

Het Strouhalgetal (St) geeft in het algemeen de mate van oscillering in een stroming weer en wordt gebruikt om het transiënte gedrag van een stroming te karakteriseren. Het Strouhalgetal is als volgt gedefinieerd:

$$St = \frac{f L_{ref}}{U_{ref}} \quad (2.3)$$

Waarbij f de flapfrequentie is van de oscillering, L_{ref} een referentielengte en U_{ref} een referentiesnelheid.

Om het Strouhalgetal van een stroming rond flappende vleugels te definiëren, neemt men voor f de flapfrequentie, voor L_{ref} de gemiddelde vleugelkoorde c_m en voor U_{ref} de voorwaartse vliegsnelheid.

2.1. Karakterisering van de aerodynamica rond flappende vleugels door middel van dimensieloze getallen

Tijdens het hoveren is de voorwaartse vliegsnelheid echter gelijk aan nul en moet een ander dimensieloos getal gebruikt worden om het transiënte gedrag van de stroming te karakteriseren. Vaak gebruikt men hier dan de gereduceerde frequentie (k), die de verhouding weergeeft van de rotatiesnelheid tot de translatiesnelheid en als volgt gedefinieerd is [50]:

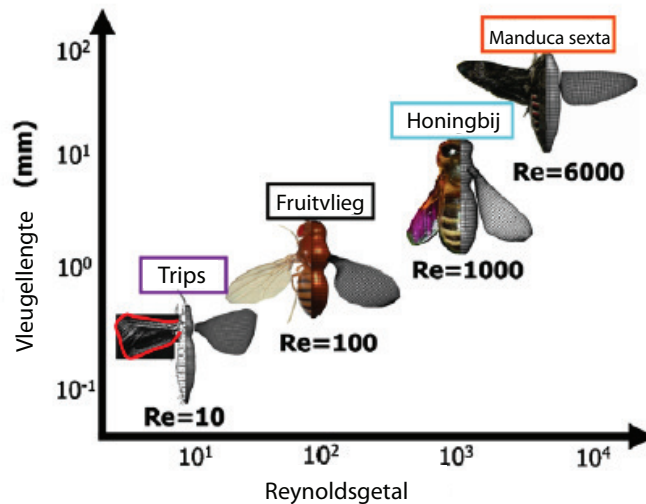
$$k = \frac{\pi f c_m}{U_{ref}} \quad (2.4)$$

Net zoals bij het Reynoldsgetal, neemt men voor U_{ref} de gemiddelde vleugeltipsnelheid $U_{wt,m} = 2AfL$, wat de volgende uitdrukking voor de gereduceerde frequentie oplevert:

$$k = \frac{\pi f c_m}{U_{ref}} = \frac{\pi c_m}{2\Phi L} = \frac{\pi}{\Phi AR} \quad (2.5)$$

2.1.3 Vergelijking van de dimensieloze getallen bij biologische vliegers met deze bij het microvliegtuig

Tabel 2.1 toont het Reynoldsgetal, de gereduceerde frequentie en de parameters waaruit deze berekend zijn voor de insecten uit figuur 2.1 die gekenmerkt worden door een beduidend verschillende vleugelafmeting.



Figuur 2.1: Het Reynoldsgetalspectrum van insecten varieert van 10 tot 10^4 [48].

	Trips [19, 51, 61]	Fruitvlieg [19, 29]	Honingbij [40]	Manduca [57]
vleugellengte (mm)	0,5	2,4	9,7	48,3
gemiddelde koorde mm	0,384	0,78	2,39	18,3
flapfrequentie (Hz)	200	218	230	26
slagamplitude (rad)	2,44	2,44	1,58	2,0
Reynoldsgetal	12	134	1123	6300
gereduceerde frequentie	0,25	0,21	0,25	0,30

Tabel 2.1: Het Reynoldsgetal, de gereduceerde frequentie en de parameters waaruit deze berekend zijn voor de insecten uit figuur 2.1.

Tabel 2.2 toont het Reynoldsgetal, de gereduceerde frequentie en de parameters waaruit deze berekend zijn voor de Rosse kolibrie en het ontworpen microvliegtuig met flappende vleugels.

	Rosse kolibrie [52]	microvliegtuig
vleugellengte (mm)	47	47
gemiddelde koorde mm	11	11
flapfrequentie (Hz)	41	33
slagamplitude (rad)	1,86	2,58
Reynoldsgetal	5131	5712
gereduceerde frequentie	0,20	0,15

Tabel 2.2: Het Reynoldsgetal, de gereduceerde frequentie en de parameters waaruit deze berekend zijn voor de Rosse kolibrie en het ontworpen microvliegtuig met flappende vleugels.

Het Reynoldsgetal

De Reynoldsgetalen in tabel 2.1 en 2.2 zijn erg klein in vergelijking met deze bij conventionele vliegtuigen en tonen aan dat de stroming rond flappende vleugels laminair is.

Het Reynoldsgetal van het microvliegtuig is vergelijkbaar met dit van de Rosse kolibrie. De relatief beperkte discrepantie resulteert uit het verschil in flapfrequentie, maar wordt gecompenseerd door de relatief grote slagamplitude van het microvliegtuig.

De gereduceerde frequentie

Door het verschil in slagamplitude wijkt de gereduceerde frequentie van het microvliegtuig niet enkel af van deze van de Rosse kolibrie, maar ook van de insecten

beschreven in tabel 2.1. Hierdoor kan het zijn dat de aerodynamica rond de flappende vleugels van het microvliegtuig afwijkt van deze rond de biologische vliegers. Om dit te bevestigen is er echter een onderzoek nodig van het stromingsveld rond de vleugels wat buiten het bereik van deze masterproef valt.

2.2 Niet-stationaire aerodynamische wervelverschijnselen

De liftkracht die vleugels van insecten of kolibries genereren is veel te groot om verklaard te kunnen worden door middel van conventionele stationaire aerodynamica. Ook het quasi-stationair model, waarbij men de beweging van de vleugel in rekening brengt, maar daarbij aanneemt dat de stroming rond de vleugel op elk ogenblik stationair is, onderschat systematisch de liftkracht die ontwikkeld wordt [31, 45, 54]. Uit onderzoek blijkt dat insecten en kolibries beroep doen op niet-stationaire aerodynamische wervelverschijnselen. De vier voornaamste zijn: een gestabiliseerde aanvalsboordwervel, liftkracht door rotatiecirculatie, zogvangst en virtuele massa.

2.2.1 Stabilisatie van de aanvalsboordwervel

De aanvalsboordwervel

Stabilisatie van de aanvalsboordwervel verklaart de zeer grote aanvalshoek van 45° die men bij insecten en kolibries waarneemt en die bij conventionele vliegtuigen overtrek veroorzaakt.

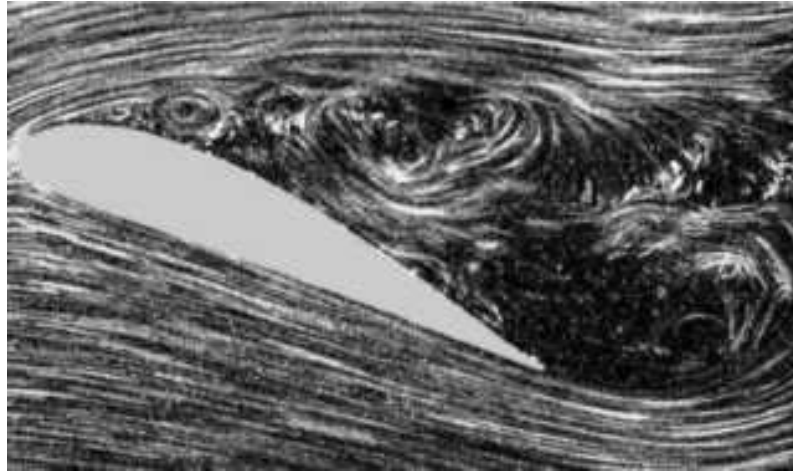
Stabilisatie van de aanvalsboordwervel verklaart ook de scherpe aanvalsboord waarover de vleugels van insecten en kolibries beschikken in tegenstelling tot de vleugels van conventionele vliegtuigen met gefixeerde vleugels die best over een stompe aanvalsboord beschikken [16].

In figuur 2.2 zien we boven de aanvalsboord van een vleugel een wervel ontstaan als de aanvalshoek groter is dan de kritische aanvalshoek. Deze wervel, die we hier de aanvalsboordwervel noemen, veroorzaakt een lage drukzone boven de vleugel die de liftkracht fors vergroot [49].

Het ontstaan van de aanvalsboordwervel moet, ondanks het positieve effect op de liftkracht, ten stelligste vermeden worden bij de translerende vleugels van een conventioneel vliegtuig. De reden hiervoor is dat de aanvalsboordwervel bij translerende vleugels snel aangroeit waarna de stroming zich niet meer kan vasthechten aan de vleugel en er niet meer voldaan is aan de Kutta voorwaarde¹, met overtrek tot gevolg.

Om het ontstaan van een aanvalsboordwervel te vermijden, beschikken conventionele vliegtuigvleugels over een stompe aanvalsboord en een beperkte aanvalshoek.

¹



Figuur 2.2: De aanvalsboordwervel die ontstaat als de aanvalshoek groter is dan de kritische aanvalshoek. [2]

Stabilisatie van de aanvalsboordwervel

Insecten creëren met hun vleugelbeweging een stroming vanuit de vleugelbasis richting vleugeltip. Deze spangewijze stroming draagt momentum over op de aanvalsboordwervel, waardoor deze als een groeiende spiraal over de vleugel richting vleugeltip wervelt. (zie figuur 2.3a).

Het gevolg hiervan is dat de aanvalsboordwervel trager aangroeit in de richting van de koorde waardoor er geen overtrek ontstaat. Zoals hierboven beschreven veroorzaakt de aanvalsboordwervel een lage drukzone boven de vleugel die de liftkracht fors vergroot [28].

Dit mechanisme waarbij een spangewijze stroming de aanvalsboordwervel stabiliseert, is ook waar te nemen bij een deltavleugel, van bijvoorbeeld een straaljager (figuur 2.3b).



Figuur 2.3: Zowel bij flappende vleugels (links [27]) als bij deltavleugels (rechts [3]) wervelt de aanvalsboordwervel onder invloed van een spangewijze stroming als een groeiende spiraal over de vleugel richting vleugeltip.

De wervelsterkte van de aanvalsboord neemt toe met de vleugelsnelheid en is bepalend voor de liftkracht. Als de vleugelsnelheid toeneemt, door bijvoorbeeld een stijging van de flapfrequentie of van de slagamplitude, vergroot de liftkracht die ontwikkeld wordt door de aanvalsboordwervel. [31].

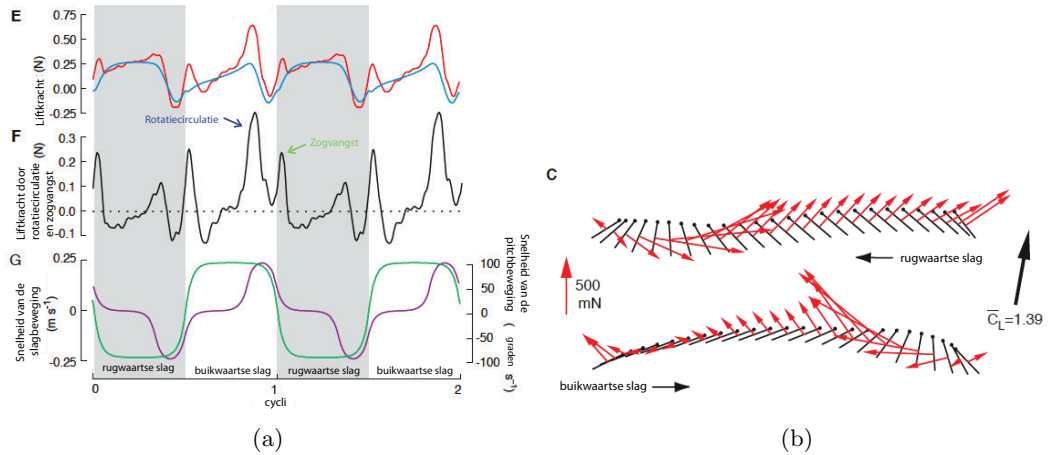
Uit onderzoek blijkt dat boven de vleugels van de Rosse kolibrie enkel gedurende de buikwaartse slag een gestabiliseerde aanvalsboordwervel ontstaat. Een gevolg hiervan is dat de Rosse kolibrie 75% van zijn gemiddelde liftkracht genereert gedurende de buikwaartse slag. [55]

Een diepgaand onderzoek van de aspecten die het stabiliseren van de aanvalsboordwervel beheersen is te vinden in het boek *Exploring the biofluidynamics of swimming and flight* van Lentink [33].

2.3 Invloed van de pitchbeweging op de liftkracht

Figuur 2.4a toont het tijdsverloop van de liftkracht ontwikkeld door een flappende vleugel. Deze is gemeten door Dickinson op een dynamisch schaalmodel van de vleugel van een fruitvlieg [26]. Zoals te zien is op de figuur treden er twee pieken in de liftkracht op. Eén vlak voor en één vlak nadat de vleugel van bewegingszin verandert. Deze pieken in de liftopwekking dragen maar liefst 35% bij tot de totale liftkracht [26]. Numerieke simulaties bevestigen deze waarnemingen. [21]

2. AERODYNAMICA



Figuur 2.4: Figuur (a) geeft het tijdsverloop van de grootte van de verschillende krachten weer op een bewegende vleugel. De rode lijn geeft de resulterende kracht weer. De blauwe lijn enkel de component tengevolge van de slagbeweging en de zwarte lijn enkel de component tengevolge van de liftkracht door rotatiecirculatie en zogvangst. Figuur (b) geeft de richting aan van de resulterende kracht (uit [26]).

In welke mate deze liftpieken ook optreden rond vleugels van een groter formaat, zoals deze van de Rosse kolibrie is nog niet grondig onderzocht. Uit PIV-metingen van het stromingsveld rond de vleugels van een Rosse kolibrie die hovert, kon men niet bewijzen dat deze liftpieken ook optreden rond de flappende vleugels van een Rosse kolibrie [55].

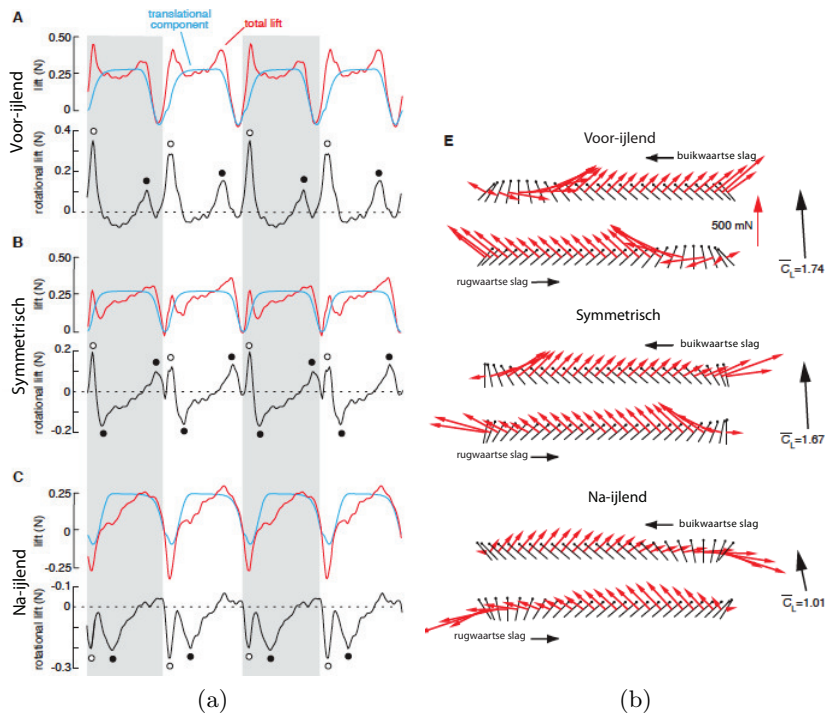
2.3.1 Liftkracht door rotatiecirculatie

Een mogelijke verklaring voor de piek in liftkracht vlak voor het omkeren van de bewegingszin van de vleugel is dat de rotatie van de vleugel als een extra bron dient voor de circulatie rond de vleugel. Dit effect is gelijkaardig aan het Magnuseffect [16] en noemt men gewoonlijk liftkracht door rotatiecirculatie [47].

Invloed van de fase tussen pitch- en slagbeweging op de liftkracht door rotatiecirculatie

De hoeveelheid rotatiecirculatie die ontwikkeld wordt, is afhankelijk van de fase tussen pitch- en slagbeweging. Uit onderzoek blijkt dat, in vergelijking met een symmetrische pitchbeweging, een voorijlende pitchbeweging meer liftkracht genereert door rotatiecirculatie. Een na-ijlende pitchbeweging daarentegen resulteert in een negatieve liftkracht door circulatie.

De gemiddelde liftkracht door rotatiecirculatie bij een voorijlende pitchbeweging is 1,7 keer hoger dan deze bij een na-ijlende pitchbeweging [26](figuur 2.5).



Figuur 2.5: Analoog aan 2.4 maar dan nu voor drie verschillende gevallen van de fase tussen slag- en pitchbeweging. Figuur (a) geeft het tijdsverloop weer van de grootte van de verschillende krachten op een flappende vleugel. De rode lijn geeft de resulterende kracht weer. De blauwe lijn enkel de component tengevolge van de slagbeweging en de zwarte lijn enkel de component tengevolge van de liftkracht door rotatiecirculatie en zogvangst. Figuur (b) geeft de richting aan van de resulterende kracht. Een voorijlend pitchbeweging heeft een positief effect op de liftkracht (uit [26]).

Invloed van de locatie van de rotatieas op de liftkracht door rotatiecirculatie

De liftkracht door rotatiecirculatie vermindert naarmate de rotatieas naar de vluchtboord verschuift. Hierbij treedt op ongeveer driekwart van de lengte van de koorde \bar{D} gemeten vanaf de aanvalsbord \bar{D} een tekenverandering op [26].

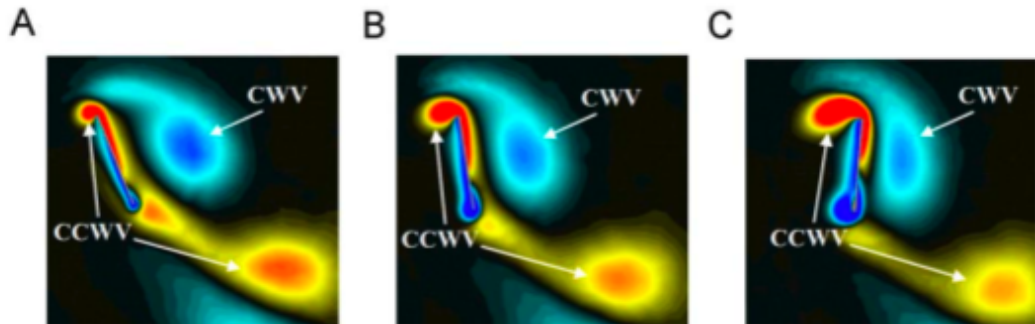
2.3.2 Liftkracht door virtuele massa of zogvangst

Voor de piek in liftkracht vlak na het omkeren van de bewegingszin van de vleugel zijn er twee mogelijke verklaringen: het fenomeen zogvangst en het fenomeen virtuele massa.

Zogvangst

Zogvangst is het merkwaardige vermogen van een insect om energie te extraheren uit zijn eigen zog. Aan het begin van een slag beweegt de vleugel zich door het

zog afkomstig van de vorige slag. Hierbij ondervindt deze een verhoogde effectieve stromingssnelheid, waardoor de liftkracht toeneemt (figuur 2.6).



Figuur 2.6: Een illustratie van het zogvangst fenomeen. (A) Supinatie, (B) begin van de rugwaartse slag, (C) momentopname vroeg in de rugwaartse slag. (A) Het zog veroorzaakt door de voorgaande slag (CWV) beweegt op het einde van de vleugelslag richting de vleugel. Als de vleugel door het zog beweegt (B) en (C) verhoogt de relatieve aanstroomsnelheid, wat een verhoogde liftwerking veroorzaakt. (uit [48])

Dickinson toonde aan dat een vleugel, nadat deze op het einde van een vleugelslag wordt stopgezet, nog gedurende een bepaalde periode liftkracht genereert. Dit experiment toont aan dat het zog geproduceerd door de beweging van de vleugel in de voorgaande slag dient als een energiebron voor het genereren van liftkracht aan het begin van de volgende slag [26].

Invloed van de fase tussen pitch- en slagbeweging op de liftkracht door zogvangst

De liftpiek veroorzaakt door zogvangst is groot en positief bij een voorijlende pitchbeweging, klein en positief bij een symmetrische pitchbeweging en klein en negatief bij een na-ijlende pitchbeweging [26].

2.3.3 Virtuele massa

Wanneer een voorwerp versnelt, ondervindt het een reactiekracht louter ten gevolge van het omgevende fluidum dat moet wijken voor het voorwerp. Deze reactiekracht noemt men de virtuele massa. Andere vaak voorkomende benamingen voor dit fenomeen zijn toegevoegde massa en acceleratiereactie.

Omdat een vleugel versnelt in het begin van een slagbeweging is deze ook onderhevig aan de virtuele massa wat door de oriëntatie van de vleugel een positief effect op de liftkracht heeft.

2.4 Besluit van dit hoofdstuk

De stroming rond de vleugels van het microvliegtuig met flappende vleugels wordt gekenmerkt door twee dimensieloze getallen: het Reynoldsgetal en de gereduceerde frequentie.

Het Reynoldsgetal bij het microvliegtuig met flappende vleugels bedraagt 5712, wat duidt op een laminaire stroming en is vergelijkbaar met het Reynoldsgetal bij de Rosse kolibrie (5131). De kleine discrepantie tussen de twee resulteert uit het verschil in flapfrequentie, maar wordt gecompenseerd door de relatief grote slagamplitude van het microvliegtuig. De gereduceerde frequentie bij het microvliegtuig met flappende vleugels bedraagt 0.15 en is lager dan deze bij insecten en bij de Rosse kolibrie. Om een uitspraak te doen over de consequenties van deze lagere gereduceerde frequentie is meer onderzoek nodig.

Liftversterkende mechanismes verklaren de grote liftkracht die waargenomen wordt bij insecten en kolibries. De voornaamste zijn: de stabilisatie van de aanvalsboordwervel, liftkracht door rotatiecirculatie, zogvangst en virtuele massa.

Het effect van de gestabiliseerde aanvalsboordwervel vergroot naarmate de snelheid van de vleugel toeneemt. Een grote flapfrequentie en een grote slagamplitude hebben daarom een gunstige invloed op de liftkracht.

De liftkracht door rotatiecirculatie en de liftkracht door zogvangst zijn het grootst bij een voorijlende pitchbeweging.

Hoofdstuk 3

Vleugelbeweging en vleugelmorfologie

In hoofdstuk 1 werd reeds een overzicht gegeven van de terminologie die we gebruiken om de vleugelbeweging en de vleugelmorfologie van flappende vleugels te beschrijven. In dit hoofdstuk beschrijven we eerst een manier om de vleugelbeweging te kwantificeren met behulp van drie hoeken: de slaghoek, de deviatiehoek en de pitchhoek. Daarna gaan we aan de hand van een literatuurstudie dieper in op de invloed van de vleugelbeweging en de vleugelmorfologie op de liftkracht.

De vleugelbeweging die bestudeerd wordt, is die van vleugels die flappen in een regime waarvoor de aerodynamica in het vorige hoofdstuk is beschreven.

De bedoeling van dit hoofdstuk is voornamelijk een inzicht te krijgen in de invloed die bepaalde aspecten van de vleugelbeweging hebben op de liftkracht.

Aan de hand van dit inzicht wordt in het volgend hoofdstuk een vereenvoudigd kinematisch model voor de vleugelbeweging opgesteld. Het is op basis van dit vereenvoudigd kinematisch model voor de vleugelbeweging dat we het overbrengingsmechanisme voor het microvliegtuig met flappende vleugels ontwerpen.

De bevindingen die hieronder staan beschreven komen niet enkel uit onderzoek op insecten en kolibries (bv. [52, 57]), maar ook uit experimenten op mechanische flapmechanismen (bv. [26, 41]) en van numerieke modellen (bv. [20]).

3.1 Beschrijving van de vleugelbeweging, aan de hand van de slag-, pitch- en deviatiehoek

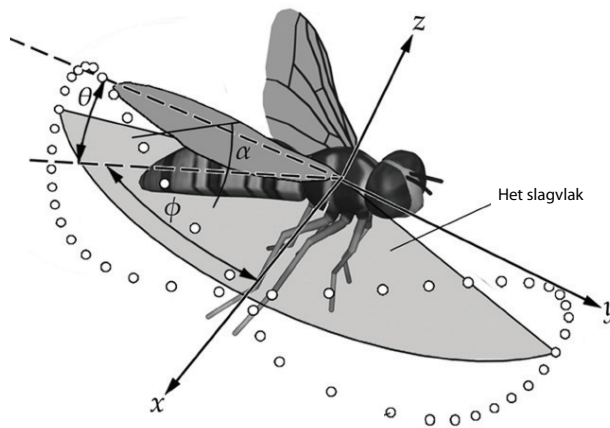
Voor het beschrijven van de vleugelbeweging bij het hoveren, moet geen rekening gehouden worden met de lichaamsbeweging. De vleugels zijn aan het lichaam bevestigd door middel van het vleugelgewricht, dat zich gedraagt als bolscharnier. Dit bolscharnier laat drie vrijheidsgraden van beweging toe ten opzichte van het lichaam. Hieronder beschrijven we een populaire manier om de positie en de beweging van het vleugelassenstelsel (en zo de vleugel) te bepalen ten opzichte van het referentieassenstelsel, dat vast verbonden is aan het lichaam.

De beschrijving maakt gebruik van drie zogenaamde Tait-Bryan hoeken [8] die we

hier respectievelijk de slaghoek, de deviatiehoek en de pitchhoek noemen.

Het referentieassenstelsel

Het referentieassenstelsel is een assenstelsel dat vast verbonden is aan het lichaam (figuur 3.1). De oorsprong van dit assenstelsel ligt in het vleugelgewricht. De x -as van dit referentieassenstelsel (x) ligt in het verlengde van de vleugel bij midslag¹. De y -as van dit referentiestelsel (y) staat loodrecht op de x -as en ligt in het slagvlak. (figuur 3.1). De z -as van dit referentiestelsel (z) staat loodrecht op het slagvlak.



Figuur 3.1: De vleugelbeweging ten opzichte van het lichaam kan omschreven worden aan de hand van drie hoeken: de slaghoek (ϕ), de deviatiehoek (θ) en de pitchhoek (α). (uit [41])

Het vleuglassenstelsel

Het vleuglassenstelsel is een assenstelsel dat vast verbonden is aan de vleugel. De oorsprong van dit stelsel ligt in het vleugelgewricht. De x -as van dit vleuglassenstelsel (X) ligt in het verlengde van de vleugel. De y -as van dit referentiestelsel (Y) staat loodrecht op de x -as en ligt in het vleugelvlak, dat bepaald wordt door de aanvalsboord en de koorde. De z -as van dit referentiestelsel (Z) staat loodrecht op het vleugelvlak.

¹Midslag is de positie waarbij de vleugels in elkaars verlengde liggen.

De slaghoek

Indien we het referentieassenstelsel initieel laten samenvallen met het vleugelassenstelsel, beschrijft de slaghoek (ϕ) de rotatie van de vleugel rond de z-as. De slaghoek determineert de slagbeweging van de vleugel en is nul bij midslag.

De deviatiehoek

De deviatiehoek (θ) beschrijft de rotatie van de vleugel rond de, door de slagbeweging geroteerde, Y-as. De deviatiehoek determineert de deviatiebeweging van de vleugel, de beweging die de vleugeltip doet afwijken uit het slagvlak. De deviatiehoek is nul wanneer de vleugeltip zich in het slagvlak bevindt.

De pitchhoek

De pitchhoek (α) beschrijft de rotatie van de vleugel rond de, door de slag- en deviatiebeweging geroteerde, X-as. De pitchhoek determineert de pitchbeweging van de vleugel, de beweging die de aanvalshoek van de vleugel bepaalt.

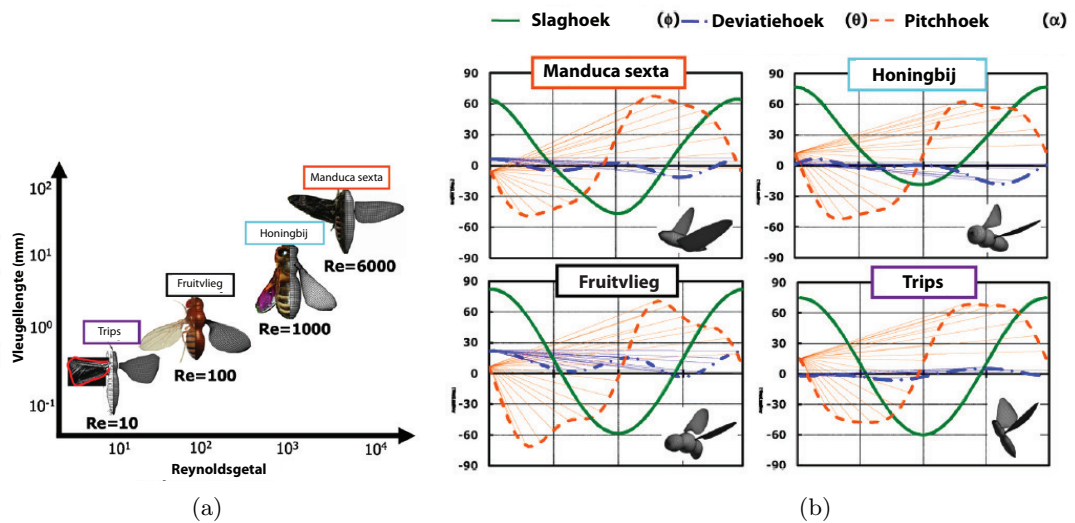
Zoals gedefinieerd in figuren 3.2b en 3.3 is de pitchhoek nul wanneer de aanvalshoek 90° is en varieert de pitchhoek rond 0° . Om echter eenvoudiger te kunnen vergelijken met de aanvalshoek van de vleugel laten we in hoofdstuk 5 het nulpunt voor de pitchhoek samenvallen met een aanvalshoek van 0° . Dit resulteert in een pitchhoek die varieert rond 90° (zie bijvoorbeeld figuur 5.5b op pagina 55).

De aanvalshoek is dan gelijk aan de pitchhoek indien de pitchhoek kleiner is dan 90° en gelijk aan de supplementaire hoek van de pitchhoek indien de pitchhoek groter is dan 90° .

3.1.1 Vleugelbewegingen opgemeten bij biologische vliegers

Insecten

Figuur 3.2b toont het tijdsverloop van de slag-, deviatie-, en pitchhoek voor vier verschillende soorten insecten. Zoals figuur 3.2a toont, zijn deze insecten zo gekozen dat een breed Reynoldsgetalspectrum vertegenwoordigd is.



Figuur 3.2: Links: de insecten in deze figuur zijn zo gekozen dat ze een breed Reynoldsgetalspectrum omvatten. Rechts: deze insecten beschikken over een opvallend gelijkaardig tijdsverloop van slag-, deviatie- en pitchhoek. (uit [21])

Ondanks de grote verschillen in Reynoldsgetal en flapfrequentie vertonen alle insecten een erg gelijkaardige vleugelbeweging gekenmerkt door:

- een sinusoidaal tijdsverloop van de slaghoek met een amplitude van meer dan 100° ;
- een sinusoidaal tijdsverloop van de deviatiehoek, met een zeer kleine amplitude en een frequentie dubbel zo groot als de frequentie van de slaghoek;
- een aanvalshoek bij midslag van ongeveer 45° .

De Rosse kolibrie

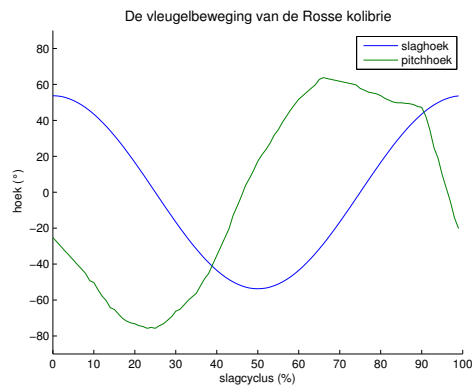
Tabel 3.1 vat de voornaamste parameters van de vleugelbeweging van de Rosse kolibrie samen, zoals beschreven in [52]. Figuur 3.3 toont de slaghoek en de pitchhoek die uit deze gegevens zijn afgeleid.

De vleugelbeweging van de Rosse kolibrie lijkt in grote mate op die waargenomen bij insecten. Het voornaamste verschil is de asymmetrie tussen buikwaartse en rugwaartse slag. Hiertoe is de Rosse kolibrie waarschijnlijk genoodzaakt omwille van de asymmetrie in de vleugelstructuur, waardoor de vleugel tijdens de buikwaartse slag anders vervormt dan tijdens de rugwaartse slag.

3.2. Invloed van de vleugelbeweging op de liftkracht

slagvlakhoek	43°
flapfrequentie	41Hz
slagamplitude	107°
aanvalshoek bij midbuikwaartse slag	26°
aanvalshoek bij midrugwaartse slag	56°

Tabel 3.1: De voornaamste aspecten van de vleugelbeweging van de Rosse kolibrie (uit [52]).



Figuur 3.3: Het tijdsverloop van de slaghoek en de pitchhoek zoals opgemeten bij de Rosse kolibrie. (afgeleid uit [52])

3.2 Invloed van de vleugelbeweging op de liftkracht

Door middel van een literatuurstudie bestuderen we hieronder de invloed van verschillende aspecten van de vleugelbeweging op de liftkracht. De bevindingen uit deze literatuurstudie stellen ons in staat om in het volgende hoofdstuk een vereenvoudigd kinematisch model op te stellen voor de vleugelbeweging.

Ook wordt kort onderzocht hoe biologische vliegers manoeuvreren, zodat ook hiermee rekening gehouden kan worden bij het ontwerp van het overbrengingsmechanisme.

3.2.1 Slagbeweging

De aspecten van de slagbeweging die we onderzoeken zijn: de oriëntatie van het slagvlak, de flapfrequentie, de slagamplitude en het tijdsverloop van de slaghoek.

De oriëntatie van het slagvlak

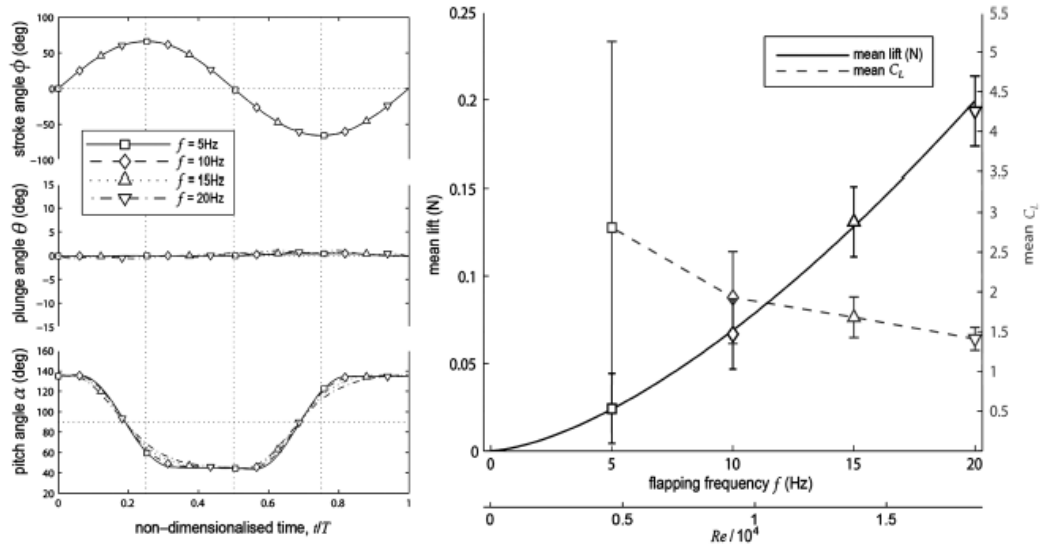
In tegenstelling tot het slagvlak bij vogels, is het slagvlak bij insecten en kolibries bijna horizontaal georiënteerd. Uit onderzoek blijkt dat de resulterende kracht die

door de vleugelbeweging wordt ontwikkeld zo goed als loodrecht op het slagvlak staat [54].

De flapfrequentie

Uit studies op insecten en kolibries blijkt dat de flapfrequentie varieert van 20Hz tot meer dan 200Hz en in het algemeen stijgt naarmate de vleugellengte afneemt. In tegenstelling tot wat men zou verwachten is de flapfrequentie voor een soort in alle omstandigheden dezelfde [52, 54]. Dit is echter niet zo verwonderlijk. Insecten flappen hun vleugels immers op de resonantiefrequentie van hun flapmechanisme [58]. Afwijken van de resonantiefrequentie zou een drastische stijging van de energieconsumptie betekenen.

Uit onderzoek blijkt dat de liftkracht exponentieel toeneemt met stijgende flapfrequentie [48] en dit met een exponent van iets minder dan 2 [17, 41]. Een verdubbeling van de flapfrequentie doet de liftkracht dus ruwweg toenemen met een factor 4. Bovendien is de liftkracht/aandrijfkoppel onafhankelijk van de flapfrequentie [17].



Figuur 3.4: De invloed van de flapfrequentie op de liftkracht. De liftkracht neemt exponentieel toe met de flapfrequentie. (uit [41])

De slagamplitude

Omwille van een versterkte aanvalsboordwervel² neemt de liftkracht lineair toe met de slagamplitude bij een constante flapfrequentie [17, 41, 48].

² beschreven in 2.2.1 op pagina 16

Het tijdsverloop van de slaghoek

Zoals hierboven te zien is in figuren 3.2b en 3.3 varieert de slaghoek ongeveer sinusoidaal in de tijd [17, 52].

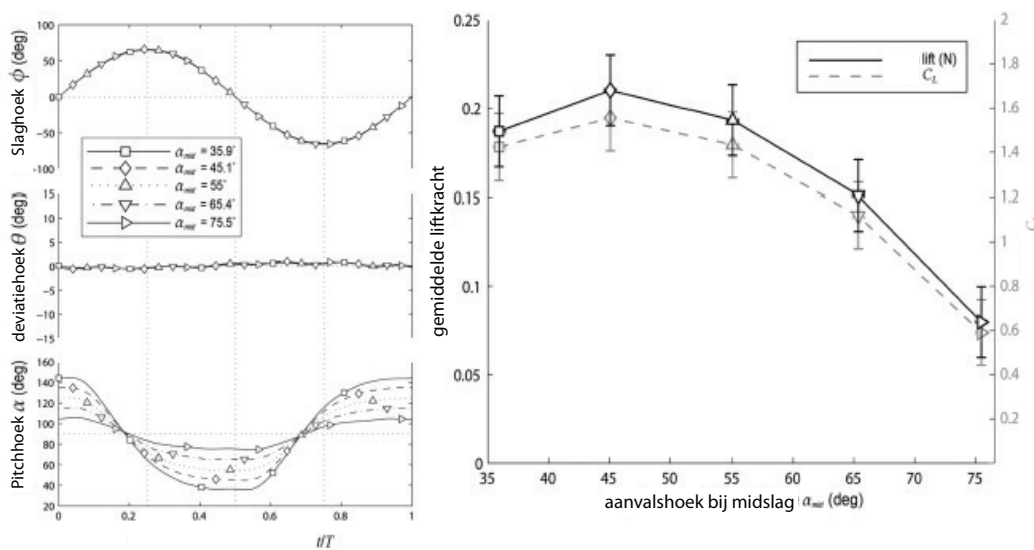
3.2.2 De pitchbeweging

De aspecten van de pitchbeweging die we onderzoeken zijn: de aanvalshoek bij midslag, het faseverschil tussen pitch- en slagbeweging, de pitchsnelheid, het tijdsverloop van de pitchhoek en de locatie van de pitchrotaties.

De aanvalshoek bij midslag

De aanvalshoek bij midslag die bij insecten en kolibries is opgemeten, situeert zich rond 45° en is vele malen groter dan bij conventionele vliegtuigen. De reden voor deze grote aanvalshoek staat beschreven in 2.2.1 op pagina 15.

Uit onderzoek blijkt ook dat een aanvalshoek bij midslag van 45° de meeste liftkracht oplevert [41, 46, 53, 56] (zie figuur 3.5).

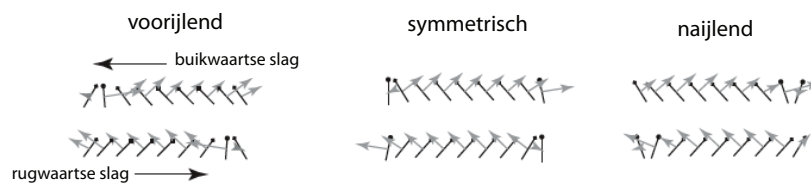


Figuur 3.5: De invloed van de aanvalshoek bij midslag op de liftkracht. De optimale aanvalshoek bij midslag situeert zich rond 45° . (uit [41])

Boven een aanvalshoek van 45° neemt de liftkracht sterk af met toenemende aanvalshoek. Uit onderzoek blijkt dat een te hoge aanvalshoek bij midslag voornamelijk een nadelige invloed heeft op de zogvangst en de stabilisatie van de aanvalsboordwervel [49].

Het faseverschil tussen pitch- en slagbeweging

Naargelang de supinatie of pronatie voor, tijdens of na het omkeren van de slagbewegingsrichting gebeurt, spreekt men respectievelijk over een voorijlende, symmetrische of na-ijlende pitchbeweging. (zie figuur 3.6)



Figuur 3.6: Naargelang de supinatie of pronatie voor, tijdens of na het omkeren van de slagbewegingsrichting gebeurt, spreekt men respectievelijk over een voorijlende, symmetrische of na-ijlende pitchbeweging. (uit [45])

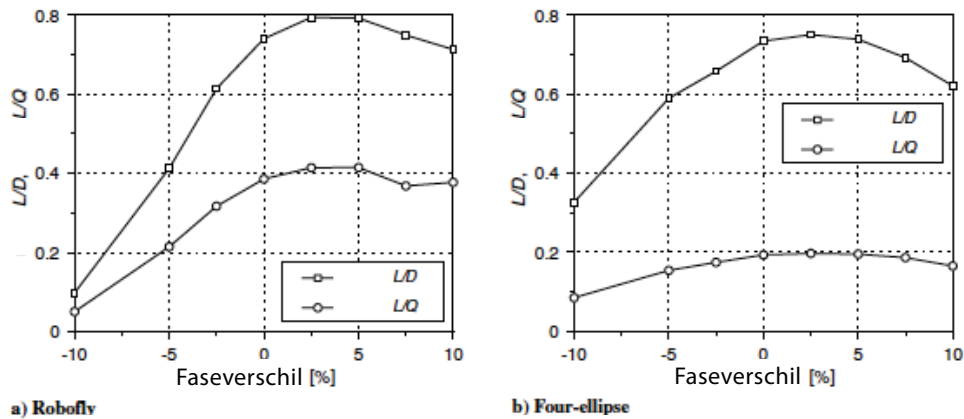
Uit onderzoek blijkt dat een voorijlende pitchbeweging meer liftkracht genereert dan een symmetrische. Een na-ijlende pitchbeweging daarentegen wekt net minder liftkracht op dan een symmetrische [17, 26, 41, 48].

Concreet blijkt de liftkracht het grootst wanneer de pitchbeweging ruwweg 9° voorijlt op de slagbeweging.

Het effect van een voorijlende pitchbeweging op de liftkracht is beduidend minder groot dan dit van de flapfrequentie, de slagamplitude of de aanvalshoek bij midslag. Omwille van twee redenen besteden we er hier toch ruim aandacht aan.

Ten eerste gebeurt de pitchbeweging bij zowat alle microvliegtuigen met flappende vleugels passief onder invloed van een samenspel tussen inertie en aerodynamische krachten. Dit heeft een na-ijlende pitchbeweging tot gevolg die een nadelige invloed heeft op de liftkracht [26].

Ten tweede is de invloed van de fase tussen pitch- en slagbeweging nog niet onderzocht op een microvliegtuig met flappende vleugels. Het ligt immers niet voor de hand om een overbrengingsmechanisme te ontwikkelen dat toelaat deze parameter te variëren.



Figuur 3.7: De invloed van het faseverschil tussen slag- en pitchbeweging voor twee verschillende vleugelvormen. Beide vleugelvormen bereiken een optimum bij een, met 2,5% of 9° , voorijlende pichtbeweging. (uit [17])

De pitchsnelheid

Bij eenzelfde fase tussen slag- en pitchbeweging, blijkt dat de pitchsnelheid een verwaarloosbare invloed heeft op de liftkracht [41].

Het tijdsverloop van de pitchhoek

Zoals hierboven te zien is in figuren 3.2b en 3.3 wijkt het tijdsverloop van de pitchhoek lichtjes af van een sinusoidaal tijdsverloop. De extrema zijn in het algemeen lichtjes afgetopt, wat resulteert in een constantere aanvalshoek rond midslag.

Bij de pitchbeweging van de Rosse kolibrie (zie figuur 3.3) valt een asymmetrie op tussen de buikwaartse en de rugwaartse slag. Zoals hierboven reeds aangehaald, is de Rosse kolibrie hier waarschijnlijk toe genoodzaakt omwille van de asymmetrie in de vleugelstructuur. Het gevolg hiervan is dat de liftkracht bij de Rosse kolibrie niet gelijk verdeeld is over de buikwaartse en de rugwaartse slag. Volgens metingen is de buikwaartse slag bij de Rosse kolibrie verantwoordelijk voor 75% van de opgewekte liftkracht [55].

Insecten vertonen minder asymmetrie in hun vleugelstructuur. Hierdoor is het verschil in vleugelbeweging tussen buikwaartse en rugwaartse slag veel kleiner, waardoor de liftkracht van insecten ongeveer gelijk verdeeld is over de rugwaartse en de buikwaartse slag [36, 54].

De locatie van de pitchrotatieas

De pitchrotatieas is de denkbeeldige as waarrond de vleugel roteert bij de pitchbeweging. Bij insecten en kolibries is deze steeds aan de aanvalsboord gelegen. Uit onderzoek blijkt dat dit ook de optimale locatie is voor de pitchrotatieas [26, 47, 48].

3.2.3 De deviatiebeweging

De deviatiebeweging heeft een verwaarloosbare invloed op de liftkracht [41]. Het tijdsverloop van de deviatiehoek resulteert gewoonlijk in een vleugeltiptraject in de vorm van een liggende 8.

De deviatiebeweging wordt waarschijnlijk passief veroorzaakt door een aero-elastische wisselwerking [60].

3.2.4 Manoeuvreren door een asymmetrische vleugelbeweging

Onder manoeuvreren wordt hier zowel het nemen van bochten verstaan, als het aanpassen van het vermogen, om te versnellen of het laadvermogen te vergroten. Over de manier waarop insecten en kolibries bochten nemen, is nog niet veel geweten. Vast staat dat dit door een asymmetrische vleugelbeweging gebeurt, waarbij de twee vleugels een verschillende beweging maken.

Hieronder zijn enkele bevindingen uit recent onderzoek samengevat.

Uit onderzoek blijkt dat:

- de oriëntatie van het slagvlak de vliegsnelheid bepaalt. Het slagvlak wordt meer verticaal opgericht om een hogere vliegsnelheid te realiseren [52, 54];
- de slagfrequentie niet wijzigt bij het manoeuvreren [52];
- insecten de pitchbeweging meer doen voorijlen en de slagamplitude vergroten op de slagbeweging bij de vleugel aan de buitenkant van de bocht en het omgekeerde doen bij de vleugel aan de binnenkant van de bocht [17, 26];
- de slagamplitude beduidend varieert met het laadvermogen [25, 52, 54].

3.3 Invloed van de vleugelmorfologie op de liftkracht

Er bestaat weinig onderzoek dat de invloed van de vleugelmorfologie op de liftkracht bestudeert. Twee zaken bemoeilijken immers dit onderzoek.

Ten eerste is het moeilijk en erg arbeidsintensief om experimenteel aspecten van de vleugelvorm te variëren en is numerieke modellering nog maar recentelijk voldoende accuraat [20].

Ten tweede beïnvloeden aanpassingen aan aspecten van de vleugelmorfologie elkaar. Zo kan je bijvoorbeeld de vleugellengte niet veranderen zonder ofwel het vleugeloppervlak te vergroten ofwel de aspect ratio te verkleinen.

Omwille van de beperkte informatie die in de literatuur te vinden is, is er besloten

om de vleugelmorfologie voor het microvliegtuig met flappende vleugels voornamelijk te baseren op deze van de Rosse kolibrie, waarvan de gegevens staan samengevat in tabel 3.2.

	richtwaarde
Vleugellengte	47 mm
gemiddelde vleugelkooorde	11 mm
vleugeloppervlak	520 mm ²
gewicht	0,08g
dikte aanvalsboord	0,6mm

Tabel 3.2: De voornaamste aspecten van de vleugelmorfologie van de Rosse kolibrie. Deze dienen als richtwaarde voor het vleugelontwerp van het microvliegtuig met flappende vleugels. De gegevens komen uit onderzoek van Tobalske [52].

We houden bovendien rekening met de volgende bevindingen uit de literatuurstudie.

De vleugelvorm

Bij een gelijke vleugellengte en gemiddelde vleugelkooorde is de invloed van de vleugelvorm op de liftkracht beperkt [18, 48]. Dit kan ook een verklaring zijn voor de grote variatie in vleugelvormen die in de natuur worden waargenomen.

De aanvalsboord

De aanvalsboord is cruciaal om voldoende stijfheid van de vleugel in de lengterichting [23] te bekomen. Uit onderzoek blijkt dat zelfs een kleine verdikking van de aanvalsboord resulteert in een dramatische vermindering van de liftkracht [25, 55]. Het is dus belangrijk om de aanvalsboord zo scherp mogelijk te maken.

De vleugelnerven

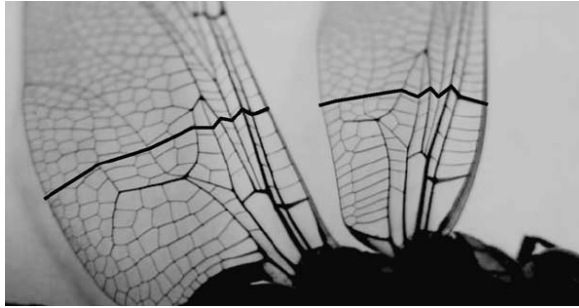
De vleugelnerven zijn cruciaal om voldoende stijfheid van de vleugel te bekomen in de richting van de kooorde [23].

De vleugelkromming

De vleugelkromming bij insectenvleugels is verwaarloosbaar en heeft weinig invloed op aerodynamica [48].

Kreukeling van het vleugeloppervlak

De kreukeling van het vleugeloppervlak die men kan waarnemen bij insectenvleugels (zie figuur 3.8) doet de gevoeligheid voor variaties in het Reynoldsgetal sterk afnemen [48, 49].



Figuur 3.8: De kreukeling van het vleugeloppervlak die men kan waarnemen bij insectenvleugels doet de gevoeligheid voor variaties in het Reynoldsgetal sterk afnemen. (uit [50])

3.4 Besluit van dit hoofdstuk

Het blijkt dat de vleugelbeweging van een microvliegtuig met flappende vleugels best een combinatie is van een hoge flapfrequentie, een grote slagamplitude, een aanvalshoek bij midslag van ongeveer 45° en een op de slagbeweging voorrijlende pitchbeweging met een faseverschil van ongeveer 9° .

Figuur 3.9 geeft een overzicht van de bevindingen in verband met de vleugelbeweging.

		invloed op liftkracht (L)	richtwaarde (Rosse kolibrie)	manoeuvreren	opmerkingen
slagbeweging	oriëntatie slagvlak	loodrecht op L	/	varieert met vliegsnelheid	
	flapfrequentie (f)	$L \sim f^2$	41 Hz	neen	resonantie frequentie bij insecten
	slagamplitude (Φ)	$L \sim \Phi$ (lineair)	105°	varieert met laadvermogen	
	tijdsverloop slaghoek	/	sinusoïdaal	/	
pitchbeweging	aanvalshoek bij midslag	L maximaal bij 45°	$25^\circ - 45^\circ$	/	
	faseverschil met slagbeweging	L max 5° voorrijling	9° voorrijling	varieert bij draaien	najlen heeft negatief effect op liftkracht
	pitchsnelheid	verwaarloosbaar	/	/	
	tijdsverloop pitchhoek	/	afgetopt sinuïdaal	/	
	locatie rotatiecentrum		aan aanvalsboord	neen	/
deviatiebeweging	amplitude	verwaarloosbaar	passief	/	gebeurt passief

Figuur 3.9: Overzicht van de bevindingen in verband met de vleugelbeweging.

Omwille van het gebrek aan bestaand onderzoek, baseren we ons voor de vleugel-morfologie voornamelijk op de vleugels van de Rosse kolibrie (zie tabel 3.2). Daarbij moeten de vleugels beschikken over: een voldoende stijve en scherpe aanvalsboord, en voldoende stijve vleugelnerven. Bovendien zorgt een kreukeling van het vleugeloppervlak ervoor dat de vleugels minder gevoelig zijn voor variaties in het Reynoldsgetal en mogen we aannemen dat vleugelkromming en vleugelvorm de liftkracht slechts in beperkte mate beïnvloeden.

Hoofdstuk 4

Functioneel prototype

Voor het ontwerp van een microvliegtuig met flappende vleugels baseren we ons op de Rosse kolibrie, zoals besproken in hoofdstuk 1. We beperken ons bij het ontwerp voorlopig nog tot de mogelijkheid tot hoveren, wat een symmetrische vleugelbeweging vereist. Toch houden we bij de ontwikkeling van het flapmechanisme in het achterhoofd dat een asymmetrische vleugelbeweging, waarbij de vleugels niet helemaal dezelfde beweging uitvoeren, mogelijk moet zijn in een later stadium van het onderzoek. Een asymmetrische vleugelbeweging laat immers toe dat het microvliegtuig ingewikkelde manoeuvres kan uitvoeren, één van de voornaamste redenen om flappende vleugels te gebruiken.

Het ontwerp van een microvliegtuig met flappende vleugels bestaat uit 3 deelaspecten. Ten eerste moet een overbrengingsmechanisme ontworpen worden dat in staat is om de beweging van de aandrijfzuchtator (in dit geval een kleine dc-motor) om te zetten in een vleugelbeweging. Deze vleugelbeweging is gebaseerd op die van de Rosse kolibrie, maar wordt vereenvoudigd, rekening houdend met de besluiten uit hoofdstuk 3.

Vervolgens gebeurt de selectie van een vermogensysteem dat bestaat uit een motor, een energiebron en een ontvanger.

Tenslotte moeten er vleugels en een lichaam ontworpen worden.

Een van de uitdagingen voor het ontwikkelen van elk deelsysteem is het gewicht van het microvliegtuig. Dit gewicht is gelimiteerd tot de liftkracht die de vleugels kunnen realiseren. Een richtwaarde voor dit gewicht is 3,4g, het gewicht van de Rosse kolibrie.

4.1 Overbrengingsmechanisme

Het overbrengingsmechanisme moet in staat zijn om de beweging van de aandrijfzuchtator om te zetten in een vleugelbeweging.

Er bestaan verschillende soorten van actuatoren die men kan gebruiken om de vleugels aan te drijven [32]. Alhoewel een lineaire actuator efficiënter kan zijn [22], is er gekozen voor een klassieke dc-motor omwille van de eenvoud en de kostprijs.

Er bestaat geen enkel vliegend microvliegtuig met flappende of klappende vleugels dat niet gebruik maakt van een stangenmechanisme als overbrengingsmechanisme. Nochtans heeft een stangenmechanisme enkele nadelen.

Ten eerste is er de moeilijkheid om een slagamplitude te verwezenlijken die groot genoeg is om voldoende liftkracht op te wekken. Ten tweede bevat een stangenmechanisme veel accelererende massa in vergelijking met de vleugelmasse, wat problematisch is voor de hoge flapfrequenties die vereist zijn.

Omwille van deze nadelen is er gezocht naar een alternatief voor het overbrengingsmechanisme.

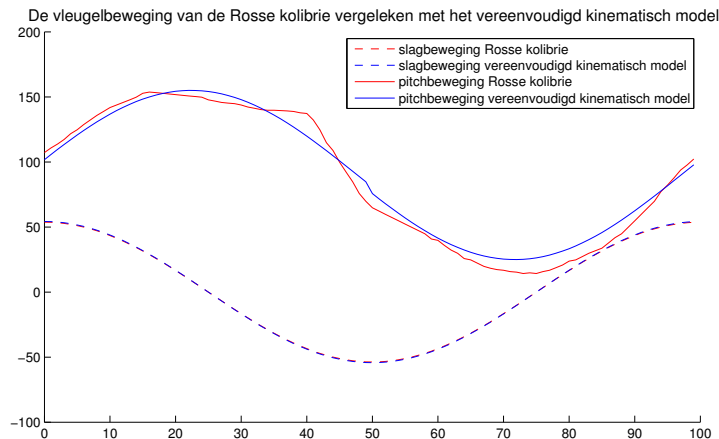
4.1.1 Vereenvoudigd kinematisch model voor de vleugelbeweging

Uit het vorige hoofdstuk blijkt dat bepaalde aspecten van de vleugelkinematica meer invloed hebben op de liftkracht dan andere. Dit laat ons toe om de vleugelbeweging te vereenvoudigen om zo het overbrengingsmechanisme niet onnodig complex te maken.

Het vereenvoudigd kinematisch model voor de vleugelbeweging is gebaseerd op de vleugelbeweging van de Rosse kolibrie, zoals opgemeten door Tobalske [52] en is weergegeven in figuur 4.1. De eerste vereenvoudiging is het verwaarlozen van de deviatiebeweging, die weinig invloed heeft op de liftkracht. Ten tweede is de pitchbeweging sinusöïdaal benaderd. Hierdoor is de vleugelbeweging tijdens de buikwaartse slag gelijk aan deze tijdens de rugwaartse slag en wordt de liftkracht meer gelijkmatig opgewekt gedurende de flapbeweging. Bovendien is het slagvlak op deze manier horizontaal bij het hoveren.

Met een sinusöïdale slagbeweging (zoals waargenomen bij de Rosse kolibrie) bestaat het vereenvoudigd kinematisch model voor de vleugelbeweging slechts uit drie parameters, de flapamplitude, de pitchamplitude en de fase tussen slag- en pitchbeweging.

Figuur 4.1 toont een vergelijking van de slaghoek en de pitchhoek tussen deze bij de Rosse kolibrie en deze bij het vereenvoudigd kinematisch model.



Figuur 4.1: De vleugelbeweging van de Rosse kolibrie vergeleken met deze van het vereenvoudigd kinematisch model. De deviatiehoek is niet weergegeven omdat deze wordt verwaarloosd. De slaghoeken zijn nagenoeg aan elkaar gelijk.

4.1.2 Realisatie van de slagbeweging: het slagnokmechanisme

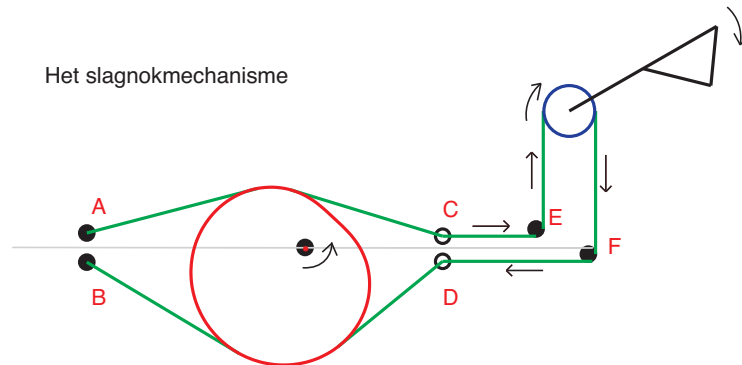
Voor de realisatie van de slagbeweging is het slagnokmechanisme ontworpen. Figuur 4.2 toont een schematische voorstelling van dit mechanisme.

De slagnok (rode vorm) roteert rond een as, waarbij deze afwisselend tegen één van de twee kabels duwt die rond de slagnok liggen, maar er niet aan zijn vastgehecht. Deze kabels zijn aan één uiteinde vastgehecht (punten A en B), de andere uiteinden zijn vastgehecht aan het vleugelwiel (blauwe vorm).

Het vleugelwiel, waaraan de vleugel is gehecht, kan vrij roteren rond zijn as, zodat dit periodiek heen en weer roteert wanneer er via de slagnok aan de kabels wordt getrokken. De kabels worden door punten C en D geleid.

Punten E en F zijn slechts ter illustratie om aan te tonen dat de oriëntatie van de slagnok vrij te kiezen is, onafhankelijk van de oriëntatie van het slagvlak. Merk echter op dat elke bocht die de kabels moeten nemen verliezen met zich meebrengt.

De vorm en de afmeting van de slagnok en de straal van het vleugelwiel bepalen samen met de ligging van punten A, B, C en D de vorm en de amplitude van de slagbeweging.



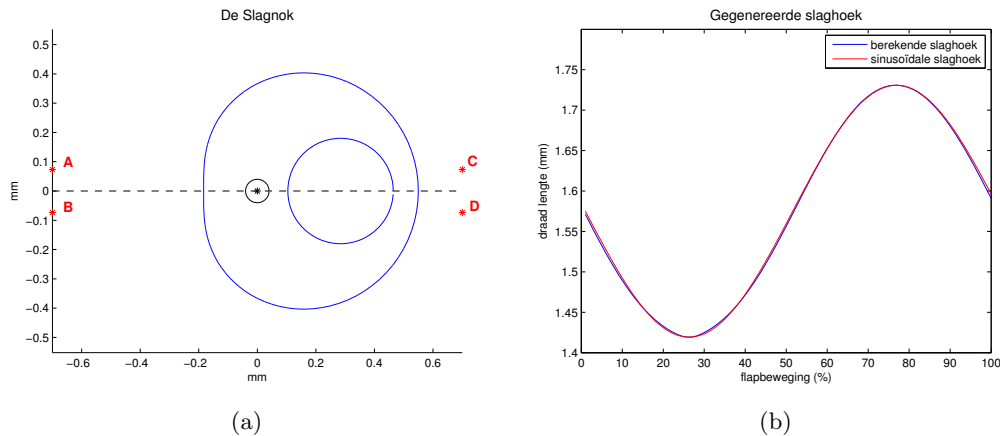
Figuur 4.2: Het slagnokmechanisme schematisch voorgesteld. De rode vorm is de slagnok, de groene lijnen zijn de kabels, de blauwe vorm is het vleugelwiel en de driehoek is de vleugel.

Ontwerp van de slagnok

In functie van de straal van het vleugelwiel en de posities van punten A, B, C en D moet een vorm voor de slagnok ontworpen worden die een sinusoidaal verloop van de slagbeweging met de gewenste amplitude realiseert. Bovendien moet de vorm van de slagnok zo ontworpen zijn dat beide kabels gedurende heel de beweging over de slagnok gespannen blijven om snok te vermijden.

De vorm van de slagnok en de positie van punten A, B, C en D zijn iteratief bekomen en zijn afgebeeld in figuur 4.3a. De resulterende slagbeweging is geïllustreerd in figuur 4.3b. Deze benadert het gewenste sinusoidaal verloop.

Om trillingen te vermijden is een uitsparing gemaakt waardoor het massacentrum van de pitchnok samenvalt met het rotatiecentrum.



Figuur 4.3: De linkse figuur geeft de slagnok weer en de positie van de punten A, B, C en D berekend voor een sinusoidaal slaghoekverloop en een bepaalde slagamplitude. De figuur rechts toont het bekomen slaghoekverloop vergeleken met het gewenste verloop.

Vergelijking 4.1 is de vergelijking van de slagnok in poolcoördinaten. In deze vergelijking staat R voor de straal van de slagnok. De parameter U is een schaalfactor. De coördinaten van punten A, B, C en D zijn gedefinieerd in functie van deze schaalfactor.

$$R = U \cdot \cos(\theta) \quad (4.1)$$

$$A = (2,66 \cdot U; 0,13 \cdot U)$$

$$B = (-2,66 \cdot U; -0,13 \cdot U)$$

$$C = (2,66 \cdot U; 0,13 \cdot U)$$

$$D = (2,66 \cdot U; -0,13 \cdot U)$$

Voor een vleugelwielstraal van $r = 1,6\text{mm}$ en $U = 0,55\text{mm}$ verkrijgen we de gewenste slagamplitude van 107° .

Enkele eigenschappen van het slagnokmechanisme

Het slagnokmechanisme beperkt de slagbeweging niet tot een sinusoidaal verloop, ook andere verlopen zijn immers mogelijk zolang maar aan bovenstaande restricties is voldaan.

Het slagnokmechanisme kan de grote slagamplitude realiseren die nodig is voor de slagbeweging. Bovendien is het een erg compact mechanisme dat weinig accelererende massa bevat.

Met het oog op het manoeuvreren kan de slagamplitude gevarieerd worden door de positie van de hechtingspunten A en B te wijzigen.

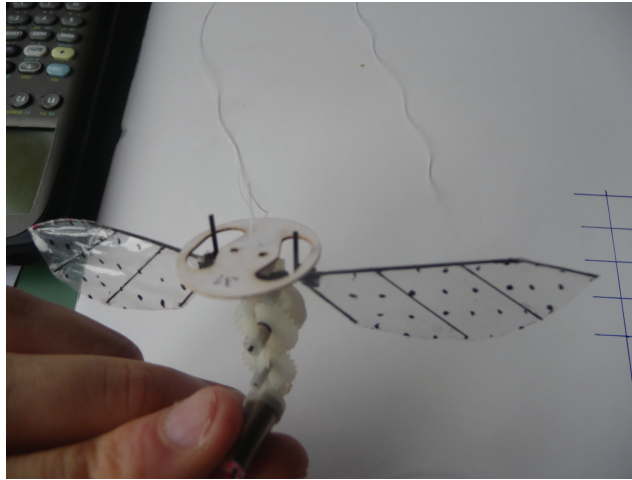
Selectie van de kabel

De kabel gebruikt in het slagnokmechanisme moet stijf genoeg zijn in trek zodat de rek van de kabel de slagbeweging niet verstoort. De kabel moet ook flexibel genoeg zijn in buiging zodat deze het gewenste traject kan afleggen. Ook moet de kabel bestand zijn tegen sleet en mag hij niet te veel wrijven met de slagnok.

Voor de kabel zijn de volgende materialen uitgetest: polyester, katoen, viscose, polyethyleen, zijde en nylon. Er is geopteerd voor nylon omdat dit het enige materiaal is dat sterk genoeg is en niet te veel onderhevig is aan sleet.

4.1.3 Realisatie van de pitchbeweging: het pitchnokmechanisme

Om de pitchbeweging uit te voeren moet de vleugel vrij kunnen roteren rond zijn lengteas. Dit is verwezenlijkt door de basis van de vleugel in een schacht te schuiven die samen met het vleugelwiel één geheel vormt. Aan de basis van de vleugel is er in het vleugelvlak en loodrecht op de aanvalsboord een staafje bevestigd (zie figuur 4.5b). Dit staafje glijdt langs de pitchnok (zie figuur 4.4) die in een vlak ligt evenwijdig aan het slagvlak. De pitchnok zorgt ervoor dat de rotatie van de vleugel om zijn lengteas beperkt wordt zodat op die manier de vleugel op elk moment over de gewenste aanvalshoek beschikt.



Figuur 4.4: De zwarte staafjes zijn bevestigd aan de vleugel en glijden langs de pitchnok.

De vorm van de pitchnok beïnvloedt zowel de pitchamplitude als de fase tussen pitch- en slagbeweging. De vorm van de pitchnok wordt in MATLAB berekend op basis van de slaghoek, de gewenste pitchhoek en de gewenste fase tussen pitch- en slagbeweging. Hoe de pitchnok de vleugelbeweging beïnvloedt, gaan we experimenteel na in paragraaf 5.2.1 op pagina 54.

De pitchnok is vervaardigd uit wit karton van 0,5mm dikte en heeft een massa van 0,09g.

4.2 Vleugels

De afmetingen van de vleugels zijn gebaseerd op deze van de Rosse kolibrie. Tabel 4.1 vat de voornaamste eigenschappen van de vleugels samen en tevens de richtwaarden zoals deze in hoofdstuk 3 bepaald zijn.

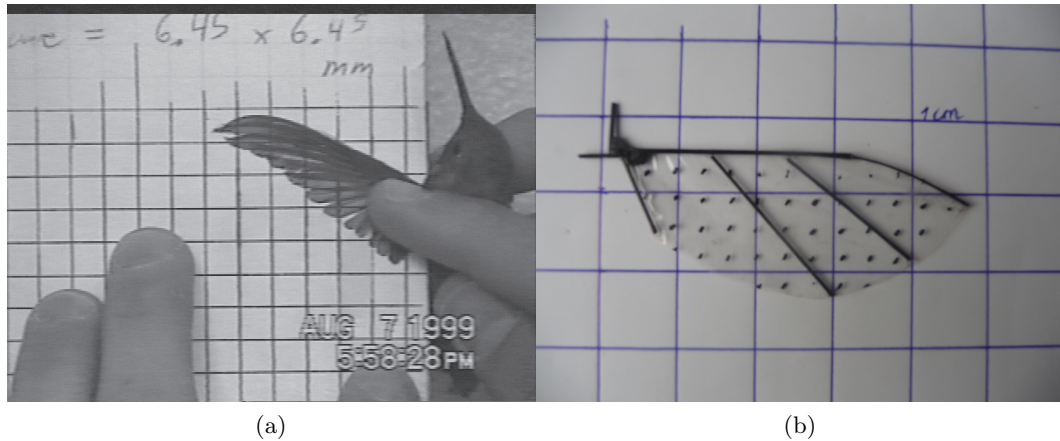
	richtwaarde	vleugelontwerp
Vleugellengte	47 mm	47mm
gemiddelde vleugelkoorde	11 mm	11mm
vleugeloppervlak	520 mm ²	520 mm ²
gewicht	0,08g	0,04g
dikte aanvalsboord	0,6mm	0,4 mm
aanvalsboord	voldoende stijf	voldoende stijf
vleugelnerven	noodzakelijk	geïmplementeerd

Tabel 4.1: Samenvatting van de voornaamste eigenschappen van de vleugels, vergeleken met de richtwaarde zoals in hoofdstuk 3 bepaald.

4. FUNCTIONEEL PROTOTYPE

De afmetingen en de massa van de vleugel zijn in grote mate bepalend voor de prestatie van het microvliegtuig. Vleugels met een lengte van 65mm en een massa van 0,13g doen de flapfrequentie dalen van 33Hz tot 18Hz en wekken voelbaar minder liftkracht op dan de vleugels beschreven in tabel 4.1.

Figuur 4.5a toont een afbeelding van een vleugel van de Rosse kolibri ¹. Figuur 4.5b toont de ontworpen vleugel.



Figuur 4.5: Links de vorm van de vleugel van de Rosse kolibrie (zie voetnoot). Rechts de gefabriceerde vleugel. De aanvalsboord en de nerven bestaan uit carbon en het membraan is uit MYLAR.

De aanvalsboord, die noodzakelijk is voor voldoende stijfheid in de richting van de span, is gemaakt uit unidirectioneel koolstofvezelcomposiet en meet 0,4mm op 0,6mm. Ook de vleugelnerven, die noodzakelijk zijn voor voldoende stijfheid in de richting van de koorde, zijn gemaakt uit unidirectioneel koolstofvezelcomposiet en meten 0,3mm in diameter.

Het vleugelmembraan is met secondelijm aan aanvalsboord en vleugelnerven bevestigd en bestaat uit een polyesterfilm met een dikte van 0,5 μm .

4.3 Lichaam en staart

4.3.1 Het lichaam

Het lichaam dient als drager voor het overbrengingsmechanisme, de motor, de tandwieloverbrenging, de energiebron, de ontvanger en elementen ter stabilisatie van de vlucht, zoals een staart.

Het lichaam is gemaakt met een SST 1200ES printer van het merk DIMENSION [12] die in het FabLab [13] staat. Het voordeel van deze techniek is dat deze toelaat op korte tijd en goedkoop veel verschillende prototypes te maken, waardoor er eenvoudig

¹Er bestaat geen afbeelding van een vleugel van een Rosse kolibrie in de literatuur. Professor D.L. Altshuler, verbonden aan de University of California heeft deze afbeelding doorgemailed.

naar gewicht kan geoptimaliseerd worden. Na 12 generaties is het lichaam gekomen dat in figuur 4.9 afgebeeld is.

Enkele nadelen van deze techniek zijn de beperkte nauwkeurigheid en het materiaal dat de 3D printer gebruikt. Dit materiaal is ABS en is op basis van de stijfheid-gewichtsverhouding niet de beste optie. Met de techniek van het microgieten kan veel nauwkeuriger gewerkt worden en kan er een deel van de massa bespaard worden. Deze techniek is echter erg duur en traag.

De massa van het lichaam bedraagt 0,49g.

4.3.2 De staart

De staart, die te zien is op figuur 4.9, is vervaardigd uit hetzelfde materiaal als de vleugels en is via een staaf, uit balsahout, bevestigd aan het lichaam. Het gewicht van dit geheel bedraagt 0,14g.

4.4 Vermogensysteem

Het vermogensysteem is het geheel van ontvanger, energiebron, motor en tandwieloverbrenging. Deze componenten vormen samen één systeem en kunnen niet los van elkaar gekozen worden. Er zijn verschillende opties mogelijk om tot een vermogensysteem te komen [32]. Zoals reeds in de inleiding van 4.1 werd aangehaald is er geopteerd voor een klassieke dc-motor. Deze keuze is ook bepalend voor de andere componenten.

4.4.1 De motor

Er zijn verschillende types van kernloze gelijkstroommotoren uitgetest. Deze staan samengevat in tabel 4.2.

	gewicht	voedingsspanning (nominaal)	diameter	merk	flapfrequentie
MK04L-10	0,79g	2,4V	4mm	DIDEL [11]	2Hz
MK 06 -10	1,32g	1,2V	6mm	DIDEL	6Hz
MK 06L 10	1,63g	1,2V	6mm	DIDEL	8Hz
0614RN52-17f-50-3.5	1,65g	3,4V	6mm	CONSTAR [9]	33 Hz

Tabel 4.2: Een vergelijking van de verschillende types motoren die getest zijn. De laatste genereert een beduidend hogere flapfrequentie.

De motor, van het type 0614RN52-17f-50-3.5 (CONSTAR), is in staat een opmerkelijk hogere flapfrequentie te genereren dan de andere motoren en wordt daarom geselecteerd. Deze motor komt uit een speelgoedhelikopter van het merk POWER IN AIR. De nominale voedingsspanning is 3,4V wat nauw aansluit bij de spanning van

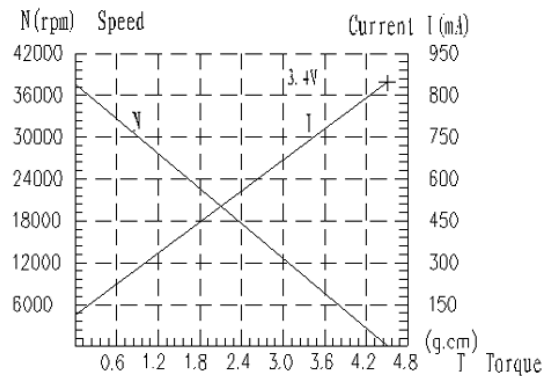
4. FUNCTIONEEL PROTOTYPE

de geselecteerde batterij (4.4.3).

Figuur 4.6 geeft de motorkarakteristieken van de geselecteerde motor weer bij nominale voedingsspanning. [9] Hieruit kan het aandrijfkoppel geschat worden (zie 5.2.7 op pagina 60).

型号 Model	额定 Nominal				空载 No-load		起动 Start	
	电压 Voltage	转矩 Torque	转速 Speed	电流 Current	转速 Speed	电流 Current	转矩 Torque	电流 Current
	V	g.cm	rpm	mA	rpm	mA	g.cm	mA
0614RN52-17f-50-3.4	3.4	1.5	38000	≤70	26000	≤350	4.5	≤1100

特性图(Characteristics Drawing)



Figuur 4.6: De motorkarakteristieken van de geselecteerde motor [9].

De geselecteerde motor is echter niet geoptimaliseerd naar belasting en massa. Bovendien bestaat er een type borstelloze gelijkspanningsmotor die over een beduidend grotere koppel/massa-verhouding beschikt. [15]. Dit type motor wordt echter pas gefabriceerd sinds april en kon niet meer in het proces geïntegreerd worden. Een naar belasting geoptimaliseerde motor van dit type moet dan ook een grote gewichtsbesparing kunnen opleveren (meer dan 0,5g)

4.4.2 Tandwieloverbrenging

Voor de keuze van de tandwieloverbrenging zijn we aangewezen op de trial and error methode. Er zijn verschillende types van tandwieloverbrengingen uitgetest. Deze staan samengevat in tabel 4.3.

gewicht	modulus	overbrengingsverhouding	merk	prestatie
1 0,1g	0,2	14,8	DIDEL	te fragiel
2 0,8g	0,2	6,7	DIDEL	te fragiel
0,18g	0,35	10,1	/	goed

Tabel 4.3: Een vergelijking van de verschillende types tandwieloverbrengingen die getest zijn. Enkel de laatste was robuust genoeg.

Omdat de tandwielen met modulus 0,2 te fragiel bleken, is er geopteerd voor zwaardere tandwielen met modulus 0,35, afkomstig uit dezelfde speelgoedhelikopter van waaruit de motor komt. Deze realiseren in twee stappen een overbrengingsverhouding van 10,125.

4.4.3 Energiebron

Zowel batterijen als supercondensatoren kunnen gebruikt worden als energiebron. Supercondensatoren beschikken echter over een veel lagere energiedichtheid in vergelijking met de onderstaand beschreven batterijen. Dit heeft een te korte vliegduur tot gevolg [43].

Er is gekozen voor het type lythium-polymeer batterijen (lipo) die over een hoge energiedichtheid beschikken. Batterijen van het lithium-zwavel type beschikken over grotere energiedichtheden [25], maar voldoen nog niet aan de vereiste vermogensdichtheid.

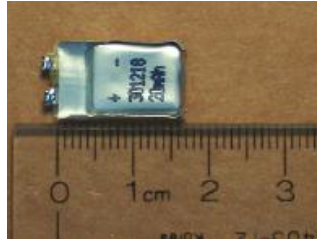
Voor de dimensionering van de batterij zijn er slechts drie criteria van belang: de massa, de energiedichtheid, die de vliegduur bepaalt, en de maximale ontladingsstroom die het maximale aandrijfkoppel bepaalt.

Er zijn drie verschillende types van lipo-batterijen uitgetest. De selectiecriteria staan samengevat in tabel 4.4.

	spanning (V)	energiedichtheid (mAh/g)	max. ontladingsstroom (mA)	massa (g)	merk
type 1	3,7	23	400	0,87	GMB
type 2	3,7	30	600	1,00	FULLRIVER
type 3	3,7	35	500	1,42	FULLRIVER

Tabel 4.4: Een vergelijking van de verschillende types lipo-batterijen die getest zijn. Type 2 is de enige die een voldoende hoge ontladingsstroom levert.

Er is geopteerd voor een batterij van het type 2 (figuur 4.7). De selectie gebeurt voornamelijk op basis van de maximale ontladingsstroom en staat uitgebreid beschreven in 5.2.7 op pagina 60.

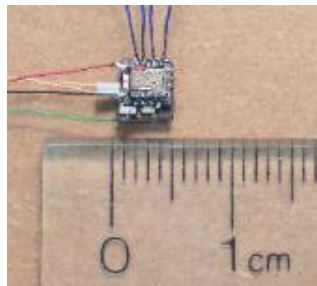


Figuur 4.7: Een afbeelding van de geselecteerde batterij (type 2) [15].

De vliegduur is gelijk aan het product van de energiedichtheid en de massa, gedeeld door de maximale ontladingsstroom en is met de geselecteerde batterij ongeveer drie minuten.

4.4.4 Micro-ontvanger

De ontvanger moet niet enkel de gekozen dc-motor aansturen. Met het oog op het manoeuvreren moet de ontvanger ook enkele andere actuatoren kunnen aansturen. Er zijn verschillende verdelers van micro-ontvangers die hiervoor geschikt zijn. Er is geopteerd voor de *Hip Hop II Rabbit Micro Receiver* [15] omdat deze met een massa van 115 mg de lichtste optie is (zie fig. 4.8).



Figuur 4.8: de *Hip Hop II Rabbit Micro Receiver* met een massa van 115 mg [15].

4.5 Besluit van dit hoofdstuk

Het ontwerp van een microvliegtuig met flappende vleugels is gebaseerd op de afmeting en vleugelbeweging van de Rosse kolibrie. Figuur 4.9 toont het functioneel prototype.

4.5.1 Vleugelbeweging

Voor de vleugelbeweging van het microvliegtuig met flappende vleugels is een overbrengingsmechanisme ontworpen dat bestaat uit het slagnokmechanisme en het pitchnokmechanisme.

Het slagnokmechanisme

Het slagnokmechanisme genereert de sinusoidale slagbeweging zoals waargenomen bij de Rosse kolibrie en kan de grote slagamplitude realiseren die nodig is voor de slagbeweging. Bovendien is het slagnokmechanisme compact en bevat het weinig accelererende massa.

Het pitchnokmechanisme

Het pitchnokmechanisme realiseert de pitchbeweging zoals waargenomen bij de Rosse kolibrie. Bovendien kunnen de vorm en de amplitude van de pitchbeweging vrij gekozen worden, alsook de fase tussen slag- en pitchbeweging.

4.5.2 Afmetingen en gewicht

De vleugels hebben dezelfde afmetingen als deze van de Rosse kolibrie en de totale vleugelspanwijdte is 11,3 cm.

Het microvliegtuig met flappende vleugels heeft een massa van 4,15g, dat is 0,75g meer dan de massa van de Rosse kolibrie. Tabel 4.5 geeft een overzicht van het gewicht van de deelcomponenten. Op de motor kan het meeste gewicht bespaard worden door hem te dimensioneren naar belasting en te optimaliseren naar gewicht.



Figuur 4.9: Het microvliegtuig met flappende vleugels met een vleugelspanwijdte van 113 mm en een gewicht van 4,15g.

	gewicht (g)
lichaam + tandwieloverbrenging	1,08
staart	0,14
vleugels	0,04
motor	1,66
batterij	1,00
ontvanger	0,19
Totaal	4,15

Tabel 4.5: De gewichtsverdeling onder de componenten.

Hoofdstuk 5

Experimenteel onderzoek

In hoofdstuk 3 is door middel van een literatuurstudie de invloed onderzocht van de vleugelbeweging op de gemiddelde liftkracht. Hieruit blijkt dat voornamelijk de slagfrequentie, de slagamplitude, de aanvalshoek en de fase tussen slag- en pitchbeweging de gemiddelde liftkracht bepalen.

De doelstelling van de experimenten in dit hoofdstuk is drieledig. In eerste instantie gaan we na of de combinatie van het slagnok- en het pitchnokmechanisme de gewenste vleugelbeweging creëert.

Vervolgens onderzoeken we de invloed van de vleugelbeweging op de liftkracht, door de liftkracht te meten voor verschillende combinaties van flapfrequentie, pitchamplitude en fase tussen pitch- en slagbeweging. De flapfrequentie kan gevarieerd worden door de voedingsspanning over de motor op te drijven en de twee andere parameters kunnen gevarieerd worden door de vorm van de pitchnok te veranderen.

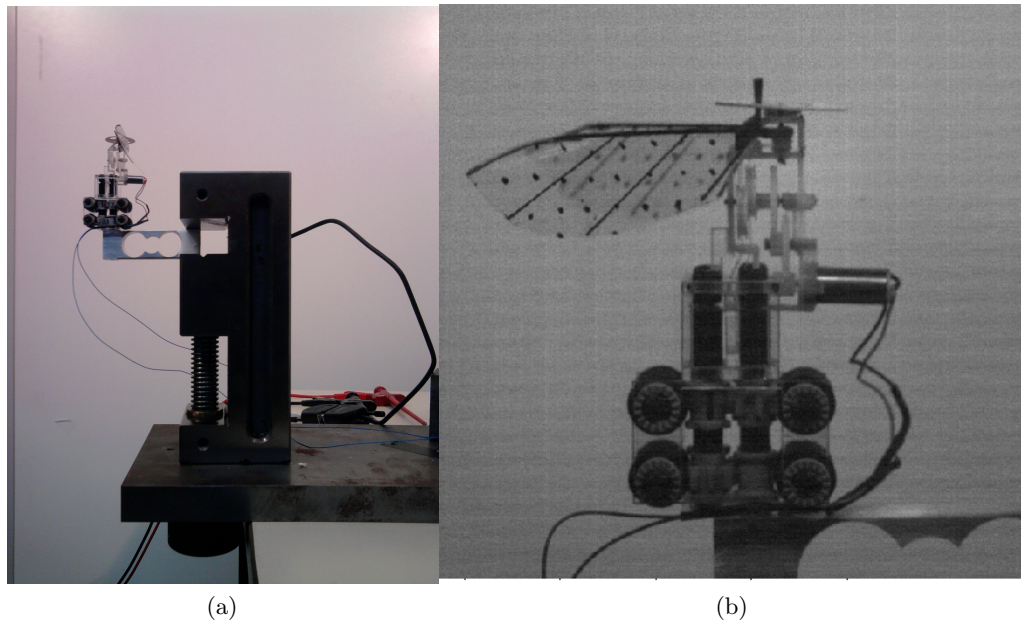
Uit deze metingen wordt de pitchnok gekozen die de grootste liftkracht genereert. Tenslotte is het de bedoeling om een belastingcurve op te stellen die het aandrijfkoppel weergeeft als functie van de liftkracht. Met behulp van deze belastingcurve kunnen dan de motor en de batterij gedimensioneerd worden voor het microvliegtuig met flappende vleugels.

5.1 Meetapparatuur en methode

5.1.1 Meetapparatuur

Gemiddelde liftkracht

De liftkracht wordt gemeten met een enkel punt type krachtcel (model 1668S) van het merk BCM met een maximale belastbaarheid van 1N. De krachtcel is ingeklemd zodat deze een verticale kracht opmeet. Het flapmechanisme is zo op het meetpunt van de krachtcel gemonteerd dat het slagvlak horizontaal georiënteerd is. (zie figuur 5.1a) De opgemeten kracht is dus verticaal en loodrecht op het slagvlak.

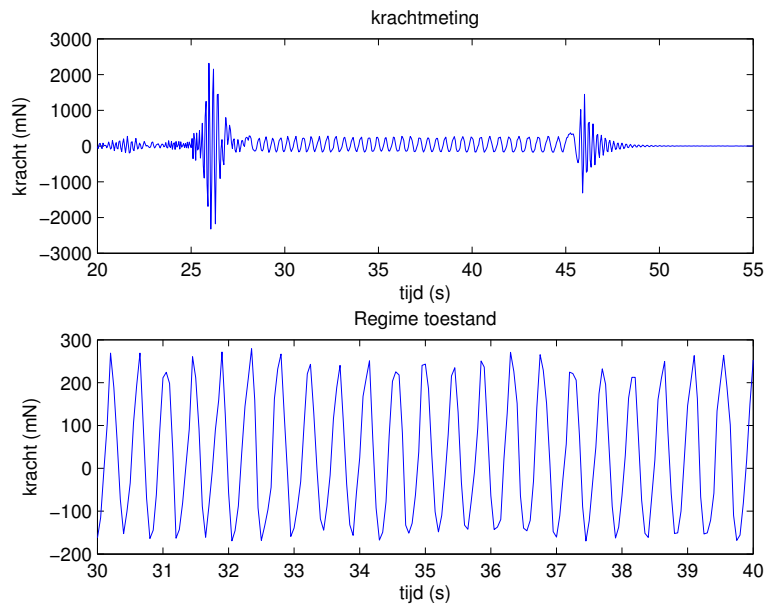


Figuur 5.1: Links: Voor de experimenten is het microvliegtuig (zonder staart) bevestigd op een constructie waarmee de spanning in de kabel kan worden aangepast. Dit geheel is gemonteerd op de krachtcel die ingeklemd is in een bankschroef. Rechts een detailweergave van het microvliegtuig op de kabelspanner.

De krachtcel is aangesloten op een weerstandenbrug met ingebouwde versterker (NI PXI-4220) van het merk National Instruments. Deze meetopstelling is in staat om tot 20 keer per seconde de liftkracht op te meten tot op 0,001mV nauwkeurig wat, na kalibratie, overeenkomt met een meetfout van 2mN.

Een typisch verloop van de opgemeten kracht is weergegeven in figuur 5.2. Zoals te zien op deze figuur treden er bij het starten en stoppen van de flapbeweging overgangsverschijnselen op. Deze overgangsverschijnselen duren ongeveer 75 flapcycli. Het is niet duidelijk waarom deze precies ontstaan. Een mogelijke verklaring is de snok die veroorzaakt wordt door het plotse starten van de vleugelbeweging nadat de statische wrijving in het flapmechanisme overwonnen is.

Tussen de overgangsverschijnselen treedt er een regimetoestand op, die we ongeveer 15 seconden of 450 flapcycli aanhouden. De gemiddelde waarde van de opgemeten kracht gedurende deze regimetoestand is de gemeten liftkracht.



Figuur 5.2: Een typische krachtmeting: de bovenste figuur geeft de krachtmeting gedurende 60 seconden weer. Tussen het starten en het stoppen van de flapbeweging treedt er een regimetoestand op die is uitvergroot in het onderste deel van de figuur.

Aandrijfkoppel

Een gestabiliseerde gelijkstroomspanningsbron levert het vermogen voor de aansturing. De spanningsbron heeft een spanningsbereik van 0 tot 30V en een stroombereik van 0 tot 3A. De meetnauwkeurigheid van de spanning en de stroom zijn respectievelijk 0,1V en 0,01A.

Een meting van de stroom door de motor, kortweg de voedingsstroom, en de spanning over de motor, kortweg de voedingsspanning, laat toe om met behulp van de motorkarakteristieken (figuur 4.6, op pagina 44) het aandrijfkoppel te bepalen. De motorkarakteristieken zijn enkel bepaald bij een nominale voedingsspanning van 3,4V.

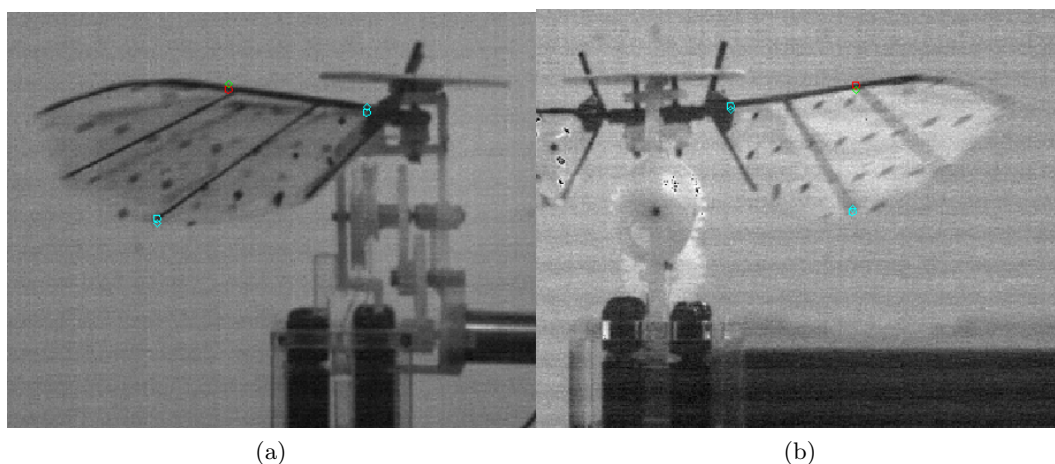
Vleugelbeweging

De vleugelbeweging wordt geregistreerd met behulp van twee Highspeedstar hogesnelheidscamera's van LaVision. Er worden in totaal 2048 beelden genomen met een opnamesnelheid van 3000 Hz. Dit resulteert in 88 beelden per flapcyclus.

De maximale meetfout voor de slaghoek is $3,5^\circ$ bij de hoogst opgemeten flapfrequentie (34 Hz) en de grootst opgemeten slagamplitude (155°). De maximale meetfout voor de pitchhoek is $2,8^\circ$ bij de hoogst opgemeten flapfrequentie (34 Hz) en de grootst opgemeten pitchamplitude (28°).

Op de gefilmde ruimte is een 27-puntige DLT-kalibratie uitgevoerd. Hiervoor is een kalibratieobject gebruikt waarop 27 markeringen zijn aangeduid. Kennis van de coördinaten van deze markeringen en beelden van dit object door beide camera's volstaan om met behulp van het softwarepakket DigitizingTools¹, de ruimte te kalibreren. Met hetzelfde softwarepakket kan men dan de coördinaten van willekeurig geplaatste markeringen op de vleugels bepalen.

Op figuur 5.3 is te zien dat er voor de analyse van de vleugelbeweging drie punten op de vleugel gekozen zijn, twee aan de aanvalsboord en één aan de vluchtboord in het midden van de vleugellengte. Verdere verwerking van de verworven gegevens gebeurt in MATLAB.

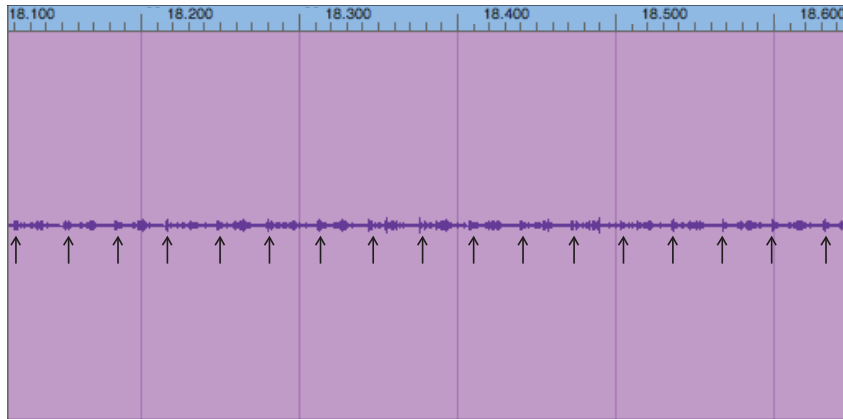


Figuur 5.3: Twee simultane hogesnelheidsopnames: links een zijaanzicht en rechts een vooraanzicht. De vleugelbeweging wordt gemeten op basis van drie gemarkeerde punten.

Slagfrequentie

Vermits het inbouwen van een encoder moeilijk te verwezenlijken was, is er geopteerd om de frequentie af te lezen uit een geluidsopname (zie figuur 5.4). De geluidsopname toont het tikkende geluid dat te horen is tijdens het flappen. De flapfrequentie werd bepaald door het aantal tikken te tellen gedurende 3 seconden. Alhoewel de juiste oorsprong van dit geluid niet gekend is, verifieerden de hogesnelheidsopnames de vastgestelde flapfrequentie.

¹Te vinden op de site van het Hedrick Lab [7].



Figuur 5.4: Een fragment uit een typische geluidsopname. In de blauwe band is de tijd weergegeven tot op 0,1s. De pijltjes geven de flapcycli aan. Er zijn in dit fragment, dat ongeveer 0,5s duurt, 17 flapcycli te zien.

5.1.2 Variatie van de vleugelbeweging

Om de invloed van de vleugelbeweging op de liftkracht na te gaan, worden de frequentie, de aanvalshoek bij midslag en de fase tussen slag- en pitchbeweging gevarieerd.

Frequentie

De frequentie wordt onrechtstreeks gevarieerd door de voedingsspanning bij te stellen van 1,5 V tot en met 3,5 V in stappen van 0,5 V.

Aanvalshoek bij midslag en fase tussen slag- en pitchbeweging

De vorm van de pitchnok beïnvloedt zowel de aanvalshoek bij midslag als het faseverschil tussen slag- en pitchbeweging.

Om de invloed van de aanvalshoek bij midslag na te gaan, is een reeks pitchnokken gemaakt, berekend op basis van het vereenvoudigd kinematisch model voor de vleugelbeweging².

De instelwaarden voor de aanvalshoek zijn 35°, 45°, 55° en 65°. Om deze reeks pitchnokken te benoemen gebruiken we de code *PA* gevolgd door de gemeten aanvalshoek bij midslag (zie tabel 5.1). Figuur 5.5a geeft de verschillende pitchnokken weer, het verschil tussen deze pitchnokken zit hem voornamelijk in de radiale afstand van de buitenste rand.

Ook om de invloed van de fase tussen slag- en pitchbeweging na te gaan, wordt een reeks pitchnokken gemaakt.

² gedefinieerd is in 4.1.1

De instelwaarden voor de fase zijn -14° , -7° , 0° , 7° en 14° . De benoeming van de pitchnokken gebeurt met de code F gevolgd door het gemeten faseverschil (zie tabel 5.2). Een negatief faseverschil staat voor een pitchbeweging die naijlt op de slagbeweging. Figuur 5.6a geeft de verschillende pitchnokken weer.

Omdat de exacte invloed van een pitchnok op de vleugelbeweging niet gekend is, is het nodig om deze na te meten. Deze metingen gebeuren bij een voedingsspanning van $3,5\text{V}$ wat overeenstemt met een slagfrequentie van ongeveer 32 Hz .

Slagamplitude

Alhoewel het niet de bedoeling is deze te variëren, moet nagegaan worden of deze toch niet wordt beïnvloed door de pitchnok.

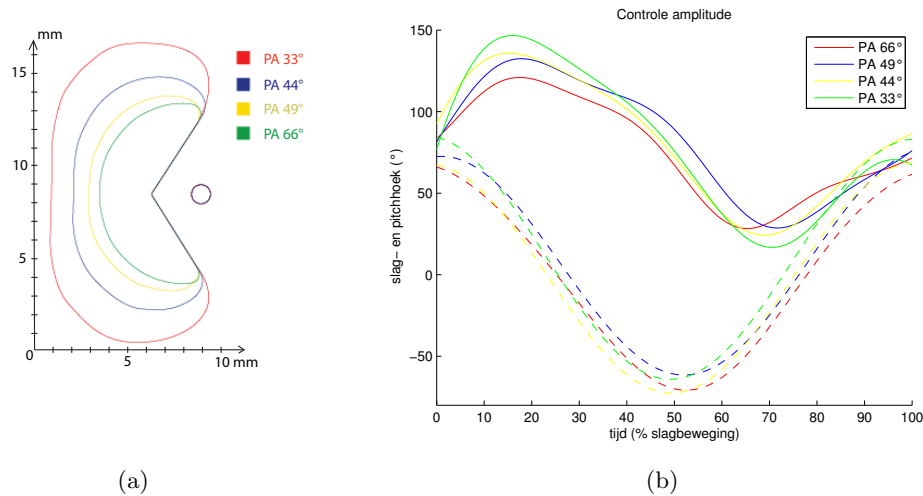
5.2 Resultaten

5.2.1 Invloed van de pitchnok op de vleugelbeweging

Invloed van de pitchnok op de aanvalshoek bij midslag

Figuur 5.5b geeft de resultaten weer van de gemeten kinematica voor de pitchnokken die ontworpen zijn met oog op een variatie van de aanvalshoek. Het verloop van de slaghoek is benaderd door een sinusfunctie en het verloop van de pitchhoek³ is benaderd door een som van drie sinusfuncties. Tabel 5.1 geeft een overzicht van de berekende en de gemeten waarden van de parameters van de vleugelbeweging die beïnvloed worden door deze pitchnokken.

³Zoals besproken in 3.1 op pagina 25, kan de aanvalshoek bij midslag bekomen worden uit de pitchhoek bij midslag. In figuur 5.5b is dit bij ongeveer 25% en 75% slagbeweging.



Figuur 5.5: De invloed van de pitchnok op de aanvalshoek bij midslag. Links de vorm van de pitchnokken berekend voor verschillende aanvalshoeken bij midslag. Het verschil zit hem voornamelijk in de radiale afstand van de buitenste rand. Rechts de gemeten pitchhoek en slaghoek voor de verschillende pitchnokken. De aanvalshoek bij midslag kan, zoals in 3.1 besproken is, bekomen worden uit de pitchhoek bij midslag (bij ongeveer 25% en 75% van de slagbeweging).

	PA 66°(b)	PA 66°(g)	PA 49°(b)	PA 49°(g)	PA 44°(b)	PA 44°(g)	PA 33°(b)	PA 33°(g)
slagamplitude (°)	140	137	140	140	140	141	140	148
aanvalshoek bij midslag (°)	65	66	55	49	45	44	35	33
fase tussen slag- en pitchbeweging (°)	7	32	7	8	7	15	7	12

Tabel 5.1: De berekende waarden (b) en de gemeten waarden (g) van de parameters die de vleugelbeweging bepalen voor de pitchnokken in figuur 5.5a.

Zoals uit tabel 5.1 blijkt, sluiten de gemeten aanvalshoeken bij midslag nauw aan bij de berekende. Een uitzondering is de discrepantie tussen de berekende en de gemeten aanvalshoek bij pitchnok PA 49°.

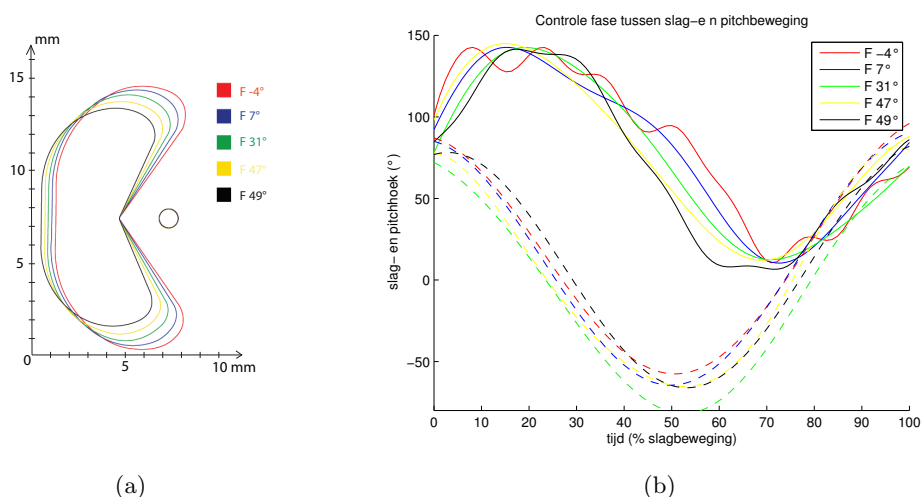
De slagamplitude wordt amper beïnvloed door de pitchnokken en ze komt bovendien ook goed overeen met de gemeten waarden. Een uitzondering is de grotere slagamplitude die optreedt bij pitchnok PA 35°.

De fase tussen slag- en pitchbeweging wijkt sterk en onregelmatig af van de berekende waarde. Het is onduidelijk wat deze afwijking veroorzaakt. Later zal echter blijken (figuur 5.9b) dat dit verschil in fase tussen slag- en pitchbeweging geen noemenswaardige invloed heeft op de liftkracht.

Indien er dus een verschil in liftkracht optreedt tussen deze vier pitchnokken kunnen we dit verklaren door het verschil in aanvalshoek.

Fase tussen slag- en pitchbeweging

Figuur 5.6b geeft de resultaten weer van de gemeten kinematica voor de pitchnokken die ontworpen zijn met het oog op een variatie van de fase tussen pitch- en slagbeweging. Omdat de pitchhoek bij $F -4^\circ$ onverklaarbaar grilliger verliep, kon deze enkel nauwkeurig genoeg benaderd worden met een hogere orde benadering. Tabel 5.2 geeft een overzicht van de berekende en de gemeten waarden van de parameters van de vleugelbeweging die beïnvloed worden door deze pitchnokken.



Figuur 5.6: De invloed van de pitchnok op de fase tussen pitch- en slagbeweging: Links de vorm van de pitchnokken berekend voor verschillende faseverschillen. Rechts de gemeten pitchhoek en slaghoek voor de verschillende pitchnokken.

	F -4° (b)	F -4° (g)	F 7° (b)	F 7° (g)	F 31° (b)	F 31° (g)	F 47° (b)	F 47° (g)	F 49° (b)	F 49° (g)
slagamplitude (°)	150	154	150	155	150	154	150	146	150	148
aanvalshoek bij midslag (°)	30	29	30	33	30	32	30	28	30	41
fase tussen slag- en pitchbeweging (°)	-14	-4	-7	7	0	31	7	47	14	49

Tabel 5.2: De berekende waarden (b) en de gemeten waarden (g) van de parameters die de vleugelbeweging bepalen voor de pitchnokken in figuur 5.6a. Een positief faseverschil duidt op een voorijlende pitchbeweging.

De slagamplitude wordt amper beïnvloed door de pitchnokken en ze komt bovendien goed overeen met de gemeten waarden. Hetzelfde geldt voor de aanvalshoek. Een uitzondering is de grotere aanvalshoek bij midslag die optreedt bij pitchnok F 49°.

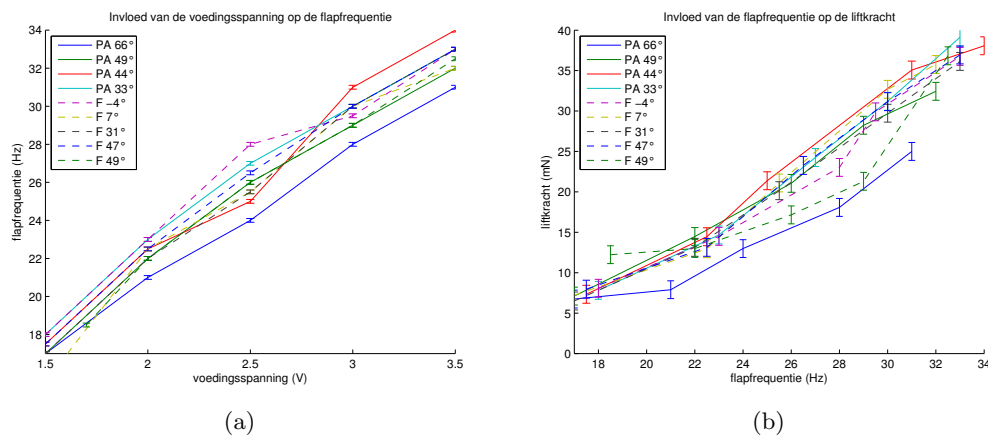
De gemeten fase tussen slag- en pitchbeweging wijkt beduidend af van de berekende waarde, maar een stijging of daling van de berekende waarde doet de gemeten waarde ook respectievelijk stijgen of dalen.

Indien er een verschil in liftkracht optreedt tussen deze vijf pitchnokken kunnen we deze dus verklaren door het verschil in fase tussen slag- en pitchbeweging.

5.2.2 Invloed van de flapfrequentie op de liftkracht

Figuur 5.7b toont de liftkracht in functie van de slagfrequentie, zoals dit effect is gemeten voor de geteste pitchnokken. Een gelijkaardig verloop voor elke pitchnok valt op. De afwijkende waarde voor pitchnok PA 66° is waarschijnlijk te verklaren door de grote aanvalshoek bij midslag.

De liftkracht schaalt met een exponent van 2,60 met de frequentie. ($L \sim f^{2,60}$). Deze exponent is beduidend groter dan die gemeten in ander onderzoek [17, 41].



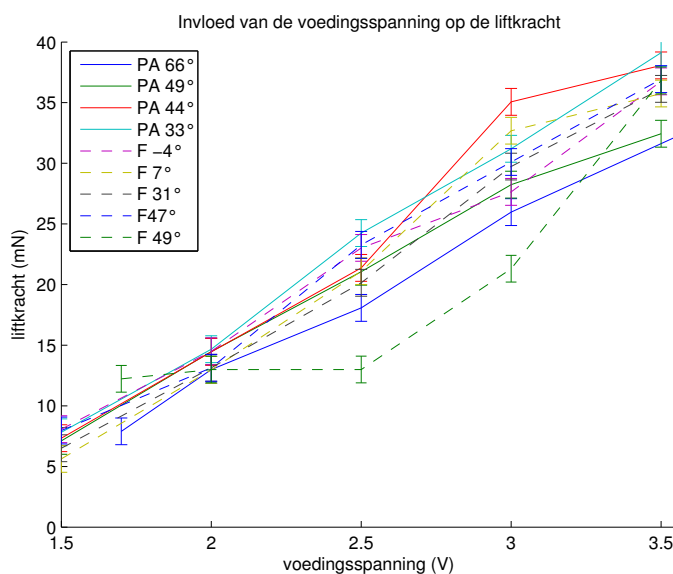
Figuur 5.7: De invloed van de voedingsspanning op de flapfrequentie (links) en van de flapfrequentie op de liftkracht (rechts), zoals dit effect is gemeten voor de geteste pitchnokken.

5.2.3 Invloed van de voedingsspanning op de flapfrequentie

Figuur 5.7a toont de flapfrequentie als functie van de voedingsspanning, zoals dit effect is gemeten voor de geteste pitchnokken. De flapfrequentie neemt toe met de voedingsspanning en kent in tegenstelling tot de liftkracht in functie van de frequentie, een concaaf verloop. Een mogelijke verklaring voor dit concaaf verloop is het toenemende wrijvingsverlies bij hogere flapfrequenties.

5.2.4 Invloed van de voedingsspanning op de liftkracht

Figuur 5.8 toont de liftkracht als functie van de voedingsspanning, zoals dit effect is gemeten voor de geteste pitchnokken. De curven tonen aan dat verschillende vleugelbewegingen voor dezelfde voedingsspanning een verschillende liftkracht creëren. Uit figuur 5.8 blijkt dat pitchnok PA 33° de hoogste liftkracht opwekt voor de maximale voedingsspanning van 3,5V die men mag verwachten van het type batterij beschreven in 4.4.3 op pagina 45. Het verschil met enkele andere pitchnokken is echter gering. Het is dus aan te raden om naast PA 33° ook nog andere pitchnokken uit te testen op het prototype van het microvliegtuig met flappende vleugels.

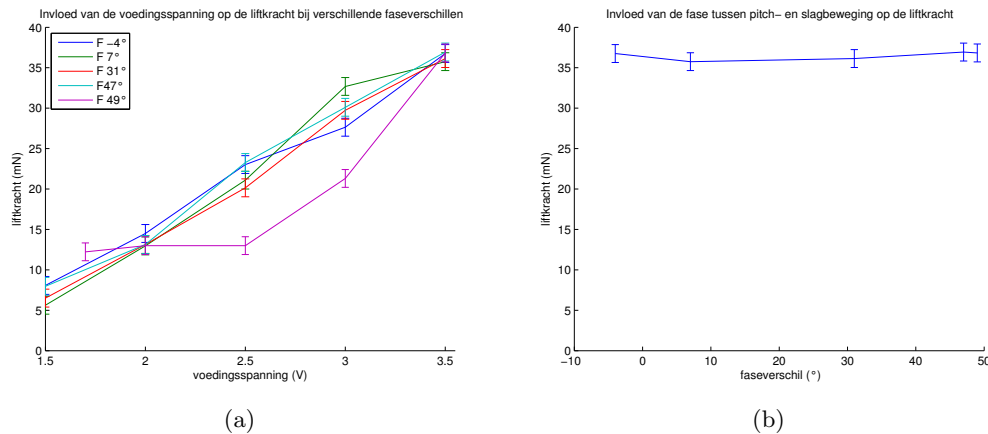


Figuur 5.8: De invloed van de voedingsspanning op de liftkracht, zoals dit effect is gemeten voor de geteste pitchnokken.

5.2.5 Invloed van de fase tussen slag- en pitchbeweging op de liftkracht

Figuur 5.9a toont de liftkracht als functie van de frequentie, zoals dit effect is gemeten voor verschillende fases tussen pitch- en slagbeweging. De afwijkende waarde voor de pitchnok F 49° wordt waarschijnlijk verklaard door een meetfout omdat de opgemeten liftkracht voor F47° wel consistent is met de andere metingen.

Figuur 5.9b toont de liftkracht als functie van de fase tussen pitch- en slagbeweging voor een voedingsspanning van 3,5 V. De variatie in liftkracht is beduidend kleiner dan de meetfout voor de liftkracht, waardoor er geen uitspraken kunnen worden gedaan over de invloed die de fase tussen slag- en pitchbeweging heeft op de liftkracht.



Figuur 5.9: (a) De liftkracht als functie van de flapfrequentie, zoals dit effect is gemeten voor verschillende fases tussen pitch- en slagbeweging, (b) de liftkracht als functie van de fase tussen pitch- en slagbeweging, zoals dit effect is gemeten bij een voedingsspanning van 3,5 V.

5.2.6 Invloed van de aanvalshoek bij midslag op de liftkracht

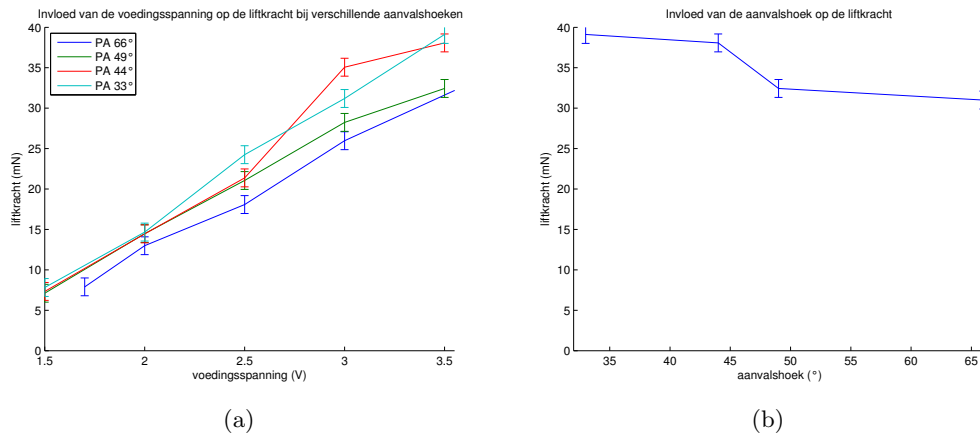
Zoals te zien op figuren 5.10a en 5.10b doet een variatie van de aanvalshoek bij midslag de liftkracht afnemen van 39mN (bij 35°) tot 31mN (bij 65°).

In figuur 5.10a is voor verschillende aanvalshoeken bij midslag, de liftkracht uitgezet in functie van de frequentie. Hieruit blijkt dat de invloed van de aanvalshoek bij midslag toeneemt met de flapfrequentie.

Figuur 5.10b toont de liftkracht uitgezet als functie van de aanvalshoek bij midslag, zoals dit effect is gemeten bij een voedingsspanning van 3,5 V.

De optimale aanvalshoek bij midslag zou 45° moeten zijn. De liftkracht bij een aanvalshoek bij midslag van 35° blijkt echter groter te zijn dan deze bij 45° . Een mogelijke verklaring hiervoor is de grotere slagamplitude (zie tabel 5.1). Het verschil in liftkracht is echter niet veel groter dan de meetfout.

5. EXPERIMENTEEL ONDERZOEK



Figuur 5.10: (a) De liftkracht als functie van de frequentie, zoals dit effect is gemeten voor verschillende aanvalshoeken bij midslag, (b) de liftkracht als functie van de aanvalshoek bij midslag, zoals dit effect is gemeten is bij een voedingsspanning van 3,5 V.

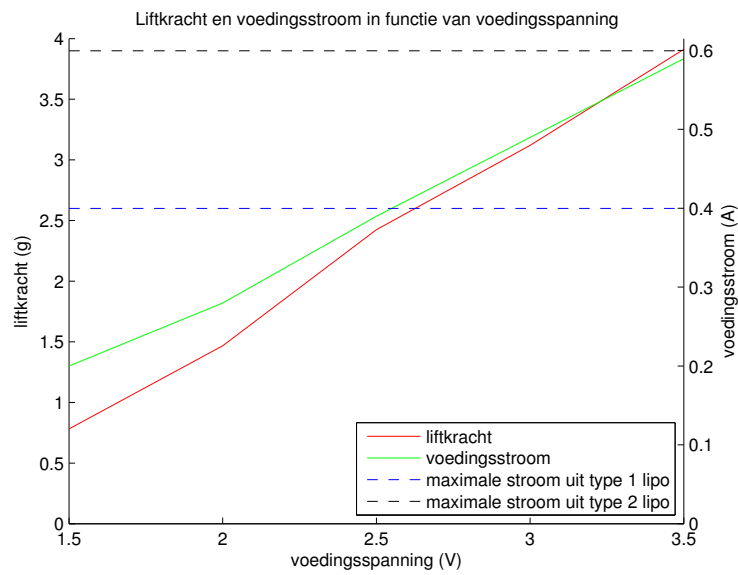
5.2.7 Voedingsstroom en motorkoppel

De stroom die een batterij kan leveren is beperkt en neemt af met afnemend gewicht. Om de lichtste batterij te kunnen selecteren die voldoende stroom kan leveren, is het nodig om de voedingsstroom te kennen die de motor vraagt bij een bepaalde liftkracht.

Figuur 5.11 toont voor pitchnok PA 33° de voedingsstroom en de liftkracht als functie van de voedingsspanning. De figuur toont ook de maximale stroom die de verschillende types van batterijen⁴ kunnen leveren.

Hieruit blijkt dat een batterij van het type 2 de beste optie is. Het verschil in liftkracht tussen beide types van batterijen is immers groter dan het verschil in massa.

⁴zie 4.4.3 op pagina 45



Figuur 5.11: De liftkracht en de voedingsstroom als functie van de voedingsspanning, zoals dit effect is gemeten voor pitchnok PA 33°. De stippellijnen staan voor de maximale stroom (en liftkracht) die verschillende types van batterijen kunnen leveren.

Bij pitchnok PA 33° levert de motor bij een voedingspanning van 3,4 V en een voedingsstroom van 590mA een koppel van 0,25 mNm (figuur 4.6). Met een overbrengingsverhouding van 10,125 is een koppel van 2,5 mNm nodig om de slag nok aan te drijven. Hierbij is de wrijving van de tandwieloverbrenging verwaarloosd.

5.3 Besluit van dit hoofdstuk

5.3.1 Prestatie van het slagnokmechanisme en het pitchnokmechanisme

De flapfrequentie bij een maximale voedingsspanning⁵ situeert zich rond 32 Hz. Dit is beduidend lager dan de vooropgestelde 40 Hz.

De experimenten tonen aan dat het slagnokmechanisme inderdaad de verwachte sinusoidale slagbeweging genereert. De slagamplitude situeert zich, afhankelijk van de pitchnok, tussen 137° en 154° en is dus in elk geval beduidend groter dan de slagamplitude waargenomen bij de Rosse kolibrie (107°) [52].

De aanvalshoek kan onafhankelijk van de slagamplitude en over een breed interval gevarieerd worden door de vorm van de pitchnok te veranderen. Bovendien komt de aanvalshoek bij midslag goed overeen met de vooropgestelde waarde. Een aanpassing van de vorm van de pitchnok om de aanvalshoek te veranderen, heeft een eerder beperkte invloed op de fase tussen pitch- en slagbeweging.

De fase tussen slag- en pitchbeweging kan onafhankelijk van de slagamplitude en de aanvalshoek gevarieerd worden over een breed interval door de vorm van de pitchnok te veranderen. Doordat de gemeten faseverschillen sterk afwijken van de berekende waarden zijn verdere experimenten nodig om dit effect te bevestigen. Een voorlopige conclusie is wel dat de tendens dezelfde is.

5.3.2 Invloed van de vleugelbeweging op de liftkracht

Invloed van de flapfrequentie op de liftkracht

De liftkracht schaalst exponentieel met de frequentie en heeft van al de geteste parameters de grootste invloed op de liftkracht.

Een curve fitting procedure wijst uit dat de liftkracht met een exponent 2,6 van de frequentie afhangt.

Invloed van de fase tussen slag- en pitchbeweging op de liftkracht

Om de invloed van de fase op de liftkracht te bepalen is er een nauwkeurigere meetopstelling nodig. Enerzijds is er een grotere opnamesnelheid vereist om de meetfout op slag- en pitchhoek te verkleinen. Om deze hoeken tot op één graad nauwkeurig te meten, is een opnamesnelheid van 10200 beelden per seconde nodig. Anderzijds is er een gevoeliger krachtcel vereist omdat de invloed van een variatie in faseverschil op de liftkracht kleiner is dan de meetfout op de liftkracht.

Invloed van de aanvalshoek bij midslag op de liftkracht

Boven een waarde van 44° daalt de liftkracht met toenemende aanvalshoek bij midslag. Bij een aanvalshoek bij midslag van 66° is de liftkracht meer dan 20% kleiner dan

⁵Deze wordt beperkt door de lichtgewicht batterij

deze bij een aanvalshoek bij midslag van 44° .

5.3.3 Opgemeten liftkracht, selectie van pitchnok en batterij

De vleugelbeweging met de grootste liftkracht wordt bereikt met pitchnok PA 33° . De liftkracht bedraagt dan 39mN. De parameters van de vleugelbeweging die pitchnok PA 33° creëert bij een voedingsspanning van 3,5V staan in tabel 5.3.

	PA 33°
flapfrequentie	33Hz
slagamplitude	148°
aanvalshoek bij midslag	33°
fase tussen pitch- en slagbeweging	12°

Tabel 5.3: De parameters van de vleugelbeweging die gecreëerd worden door pitchnok PA 33° bij een voedingsspanning van 3,5V.

De lichtste batterij die voldoende stroom kan leveren voor de motor is een batterij van het type twee⁶.

⁶zie 4.4.3, op pagina 45

Hoofdstuk 6

Besluit

De doelstelling van deze masterproef is het ontwikkelen van een microvliegtuig met flappende vleugels, gebaseerd op de Rosse kolibrie.

6.1 Algemeen

Flappende vleugelpropulsie, zoals deze waarvan insecten en kolibries gebruik maken, is erg efficiënt bij kleine afmetingen en maakt complexe vliegmanoeuvres mogelijk. Deze eigenschappen maken van microvliegtuigen met flappende vleugels een veel belovend concept voor microvliegtuigen die bijvoorbeeld binnen in gebouwen moeten kunnen opereren.

Onderzoek wijst uit dat vier fenomenen de hoge liftkracht waargenomen bij insecten en kolibries verklaren: een stabilisatie van de aanvalsboordwervel door een spangewijze stroming, liftkracht door rotatiecirculatie, zogvangst en virtuele massa. Deze fenomenen treden enkel op bij een specifieke vleugelbeweging.

De belangrijkste eigenschappen van deze vleugelbeweging zijn: een grote flapfrequentie (25-200 Hz), een grote slagamplitude van meer dan 100° , een aanvalshoek bij midslag van ongeveer 45° en een pitchbeweging die ongeveer 10° voorijlt op de slagbeweging.

De moeilijkheid om deze complexe vleugelbeweging te realiseren, maakt dat bestaande microvliegtuigen met flappende vleugels, beduidend minder liftkracht genereren dan hun biologische tegenhangers. Eén van de voornaamste doelstellingen van deze masterproef is daarom het ontwerpen van een overbrengingsmechanisme dat in staat is een vleugelbeweging te realiseren die evenveel liftkracht opwekt als biologische vliegers. Er is gekozen om het ontwerp van het microvliegtuig te baseren op de Rosse kolibrie. Deze vogel is klein genoeg om voordeel te putten uit de bovenstaande aerodynamische fenomenen en groot genoeg om mechanisch te bouwen. Bovendien is dit één van de weinige soorten waarvan de vleugelbeweging grondig bestudeerd is.

6.2 Constructie

Het microvliegtuig heeft een vleugelspanwijdte van 11,3cm en weegt 4,15g, slechts 0,75g meer dan de Rosse kolibrie. Voor de aandrijving zorgt een kernloze gelijkstroommotor. Deze motor wordt gevoed door een lythium-polymeer batterij die bij een voedingsspanning van 3V een stroom levert van 0,6A. Een micro-ontvanger stuurt het vermogen.

Een overbrengingsmechansme zet de motorbeweging om in de vleugelbeweging en bestaat uit twee deelcomponenten. Het slagnokmechanisme genereert een sinusoidale slagbeweging. Dit mechanisme onderscheidt zich van alternatieven door de grote slagamplitude die mogelijk is. Bovendien is het erg compact en bevat het weinig accelererende massa. Het pitchnokmechanisme realiseert een pitchbeweging met als parameters: het tijdsverloop, de amplitude en de fase tussen pitch-, en slagbeweging.

6.3 Bevindingen uit de experimenten

De vleugelbeweging van het ontwikkelde microvliegtuig met flappende vleugels sluit nauw aan bij deze van de Rosse kolibrie en levert gelijkaardige prestaties. Een resultaat dat in geen enkel ander wetenschappelijk onderzoek wordt geëvenaard.

De flapfrequentie

Een curve fitting procedure wijst uit dat de liftkracht met een exponent 2,6 van de frequentie afhangt. Dit is meer dan het kwadratisch verloop dat uit ander onderzoek blijkt. Het is onduidelijk waaraan dit verschil ligt. De flapfrequentie bij een maximale voedingsspanning situeert zich rond 32 Hz. Dit is beduidend lager dan de vooropgestelde 40 Hz.

De slagamplitude

De slagamplitude situeert zich, afhankelijk van de pitchnok, tussen 137° en 154° en is dus in elk geval beduidend groter dan de slagamplitude waargenomen bij de Rosse kolibrie (107°).

De fase tussen slag- en pitchbeweging

Door de vorm van de pitchnok te veranderen kan de fase tussen slag- en pitchbeweging onafhankelijk ingesteld worden. Om de exacte invloed van de vorm op de fase tussen slag- en pitchbeweging te bepalen is echter meer onderzoek nodig.

Om de invloed van de fase op de liftkracht te bepalen is er een nauwkeurigere meetopstelling nodig. Er is ook een grotere opnamesnelheid vereist om de meetfout op slag- en pitchhoek te verkleinen. Om deze hoeken tot op één graad nauwkeurig te meten is een opnamesnelheid van 10200 beelden per seconde nodig. Ook is er een gevoeligere krachtcel vereist.

De aanvalshoek bij midslag

Door de vorm van de pitchnok te veranderen kan de aanvalshoek bij midslag onafhankelijk ingesteld worden. Boven een waarde van 44° daalt de liftkracht met toenemende aanvalshoek bij midslag. Bij een aanvalshoek bij midslag van 66° is de liftkracht meer dan 20% kleiner dan deze bij een aanvalshoek bij midslag van 44° .

Selectie van de vleugelbeweging en opgemeten liftkracht

Pitchnok PA 33° genereert de vleugelbeweging die de meeste liftkracht opwekt. Deze liftkracht bedraagt 39mN. De vleugelbeweging is gekenmerkt door een flapfrequentie van 33Hz, een slagamplitude van 148° , een aanvalshoek bij midslag van 33° en een op de slagbeweging voorijlende pitchbeweging, waarvan het faseverschil 12° bedraagt.

6.4 Aanbevelingen

Op korte termijn:

1. De motor optimaliseren. Hierdoor kan waarschijnlijk een gewichtsbesparing van meer dan een halve gram gerealiseerd worden.
2. Actuatoren toevoegen om manoeuvreren mogelijk te maken.
3. Een diepgaander experimenteel onderzoek met meer meetpunten en nauwkeurigere meetinstrumentatie.

Op lange termijn is het echter aan te raden om gebruik te maken van een mechanisme op basis van een resonerende structuur om de vleugels beduidend efficiënter aan te drijven.

Bibliografie

- [1] Aerovironment. URL: <http://www.avinc.com/nano>, laatst nagekeken op 2011-08-21.
- [2] Afbeelding aanvalsboordwervel. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Flow_separation.jpg, laatst nagekeken op 2011-08-18.
- [3] Afbeelding delta vleugel. URL: <http://i146.photobucket.com/albums/r279/sampaix/00-avion-combat-ecoulement.jpg>, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [4] Afbeelding insectenvleugel. URL: http://cdn.imgfave.com/image_cache/1244300390475693.jpeg, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [5] Afbeelding manduca sexta. URL: http://nl.wikipedia.org/wiki/Manduca_sexta, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [6] Afbeelding rosse kolibrie. URL: <https://picasaweb.google.com/110051967010008806922/CanadianAnimals#5112511412683462754>, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [7] Beeldverwerkings software. URL: <http://www.unc.edu/~thedrick/software1.html>, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [8] Beschrijving tait bryan angles. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles, laatst nagekeken op 2011-08-18.
- [9] Constar motors. URL: <http://www.constarmotor.com/product/detail.asp?id=472>, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [10] Darpa's nano air vehicle programma. URL: [http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Nano_Air_Vehicle_\(NAV\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Nano_Air_Vehicle_(NAV).aspx), laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [11] Didel. URL: <http://www.didel.com/NewsF.html>, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [12] Dimension 3d printers. URL: <http://www.dimensionprinting.com/>, laatst nagekeken op 2011-08-21.
- [13] Fablab-leuven. URL: <http://www.fablab-leuven.be/>, laatst nagekeken op 2011-08-14.

- [14] Het hedrick lab aan de universiteit van washington. URL: <http://www.unc.edu/~thedrick/>, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [15] Micro flier radio. URL: <http://microflierradio.com/>, laatst nagekeken op 2011-08-14.
- [16] J. D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, 2001.
- [17] S. A. Ansari, K. Knowles, and R. Zbikowski. Insectlike flapping wings in the hover part 1: Effect of wing kinematics. *The Journal of Aircraft*, (45), 2008.
- [18] S. A. Ansari, K. Knowles, and R. Zbikowski. Insectlike flapping wings in the hover part 2: Effect of wing geometry. *The Journal of Aircraft*, (45), 2008.
- [19] H. Aono. *A simulation-based study of flapping flightmechanisms in insects*. PhD thesis, Chiba University, 2008.
- [20] H. Aono, F. Liang, and H. Liu. Near- and far-field aerodynamics in insect hovering flight: an integrated computational study. *The Journal of Experimental Biology*, (211):239–257, 2008.
- [21] H. Aono and H. Liu. Size effects on insect hovering aerodynamics: an integrated computational study. *Bioninspiration & Biomimetics*, (4), 2009.
- [22] C. Bolsman, J. Goosen, and F. van Keulen. Design overview of a resonantwing actuation mechanism for application in flappingwing mavs. google scholar, 2011.
- [23] S. A. Combes and T. L. Daniel. Flexural stiffness in insect wings. *The Journal of Experimental Biology*, (206):2979–2987, 2003.
- [24] S. A. Combes and T. L. Daniel. Into thin air: contributions of aerodynamic and inertial-elastic forces to wing bending in the hawkmoth *manduca sexta*. *The Journal of Experimental Biology*, (206):2999–3006, 2003.
- [25] G. de Croon, K. de Clercq, R. Ruijsink, B. Remes, and C. de Wagter. Design, aerodynamics, and visionbased control of the delfly. *International Journal of Micro Air Vehicles*, (2), 2009.
- [26] M. H. Dickinson and et al. Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science*, (284), 1999.
- [27] M. H. Dickinson, F.-O. Lehmann, and K. G. Gotz. Time-resolved reconstruction of the full velocity field around a dynamically-scaled flapping wing. *Experiments in Fluids*, (41):213–225, 2006.
- [28] C. P. Ellington. The aerodynamics of hovering insect flight. iv. aeorodynamic mechanisms. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, (305):79–113, 1984.
- [29] S. N. Fry, R. Sayaman, and D. M.H. The aerodynamics of free-flight maneuvers in *drosophila*. *Science*, (300), 2005.

-
- [30] J. W. Gerdes. Design, analyses and testing of a flapping wing miniature air vehicle. google scholar, 2010.
- [31] S. Ho, H. Nassef, N. Pornsinsirak, Y.-C. Tai, and C.-M. Ho. Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers. *Progress in Aerospace Sciences*, (39):635–681, 2003.
- [32] M. Karpelson, G.-Y. Wei, and R. J. Wood. A review of actuation and power electronics options for flapping-wing robotic insects. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008.
- [33] D. Lentink. *Exploring the biofluidynamics of swimming and flight*. 2008.
- [34] D. Lentink and M. H. Dickinson. Rotational accelerations stabilize leading edge vortices on revolving fly wings. *The Journal of Experimental Biology*, (212):2705–2719, 2009.
- [35] F. Leys. Blog erasmus mundus india. URL: <http://erasmusindia.blogspot.com/>, laatst nagekeken op 2011-08-20.
- [36] Z. Liang and H. Dong. Computational analysis of hovering hummingbird flight. In *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2010.
- [37] H. Liu. Integrated modeling of insect SSight: From morphology, kinematics to aerodynamics. *Journal of Computational Physics*, (228):439–459, 2009.
- [38] V. Lougheed. *Vehicles of the air*. a, 1907.
- [39] R. Michelson and M. Naqvi. Extraterrestrial flight. Technical report, von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2003.
- [40] Natl. Acad. Sci. *Short-amplitude high-frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight*, 2005.
- [41] N. Phillips and K. Knowles. Effect of flapping kinematics on the mean lift of an insect-like flapping wing. *Journal of Aerospace Engineering*, (225), 2011.
- [42] C. Poelma, W. B. Dickson, and M. H. Dickinson. The active control of wing rotation by drosophila. *The Journal of Experimental Biology*, (182):173–189, 1993.
- [43] T. N. Pornsin-Sirirak, Y.-C. Tai, C.-M. Hoa, and M. Keennon. Microbat: A palm-sized electrically powered ornithopter. Technical report, MAV Program, AeroVironment Inc., 2002.
- [44] C. Richter and H. Lipson. *Untethered Hovering Flapping Flight of a 3D-Printed Mechanical Insect*. PhD thesis, Cornell University, 2011.

- [45] S. P. Sane. Review the aerodynamics of insect flight. *The Journal of Experimental Biology*, (206):4191–4208, 2003.
- [46] S. P. Sane and M. Dickinson. The control of flight force by a flapping wing: lift and drag production. *The Journal of Experimental Biology*, (204):2607–2626, 2001.
- [47] S. P. Sane and M. H. Dickinson. The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight. *The Journal of Experimental Biology*, (205):1087–1096, 2002.
- [48] W. Shyy. Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity. In *Prog Aerospace Sci*, 2010.
- [49] W. Shyy, Y. Lian, J. Tang, H. Liu, P. Trizila, B. Stanford, L. Bernal, C. Cesnik, P. Friedmann, and P. Ifju. Computational aerodynamics of low reynolds number plunging, pitching and flexible wings for mav applications. In *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2008.
- [50] W. Shyy, Y. Lian, J. Tang, D. Vileru, and H. Liu. *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*. Cambridge, 2008.
- [51] S. Sunada, H. Takashima, T. Hattori, K. Yasuda, and K. Kawachi. Fluid-dynamic characteristics of a bristled wing. *The Journal of Experimental Biology*, (205):37–47, 2002.
- [52] B. W. Tobalske, D. R. Warrick, C. J. Clark, D. R. Powers, T. L. Hedrick, G. A. Hyder, and A. A. Biewener. Three-dimensional kinematics of hummingbird flight. *The Journal of Experimental Biology*, (210):2368–2382, 2007.
- [53] J. R. Usherwood and C. P. Ellington. The aerodynamics of revolving wings. *The Journal of Experimental Biology*, (205):1547–1564, 2002.
- [54] J. Wakeling and C. Ellington. Dragonfly flight 2. velocities, accelerations and kinematics of flapping flight. *The Journal of Experimental Biology*, (200):557–582, 1997.
- [55] D. R. Warrick, B. W. Tobalske, and D. R. Powers. Lift production in the hovering hummingbird. *The Royal Society B*, 2009.
- [56] P. C. Wilkins. *Some unsteady aerodynamics relevant to insect-inspired flapping-wing micro air vehicles*. PhD thesis, Cranfield University, 2008.
- [57] A. P. Willmott and C. P. Ellington. The mechanics of flight in the hawkmoth *manduca sexta*. *The Journal of Experimental Biology*, (200):2705–2722, 1997.
- [58] R. Wood. Design, fabrication, and analysis of a 3dof, 3cm flapping-wing mav. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007.

- [59] M. I. Woods, J. F. Henderson, and G. D. Lock. Energy requirements for the flight of micro air vehicles. *Aeronaut.J.*, (1045):135–149, 2001.
- [60] L.-J. Yang, C.-K. Hsu, F.-Y. Hsiao, and C.-K. Feng. A micro-aerial-vehicle (mav) with figure-of-eight flapping induced by flexible wing frames. google scholar.
- [61] J. M. Zanker. The wing beat of drosophila melanogaster. i. kinematics. *Phil. Trans. R. Soc.*, (327):1–18, 1990.

Fiche masterproef

Student: Frederik Leys

Titel: Ontwikkeling van een microvliegtuig met flappende vleugels gebaseerd op de Rosse kolibrie

Engelse titel: Development of a Micro Air Vehicle with Flapping wings based on the Rufous Hummingbird

UDC: 621.3

Korte inhoud:

Flappende vleugelpropulsie, zoals deze waarvan insecten en kolibries gebruik maken, is erg efficiënt bij kleine afmetingen en maakt complexe vliegmanoeuvres mogelijk. Deze eigenschappen maken van microvliegtuigen met flappende vleugels een veelbelovend concept voor microvliegtuigen die bijvoorbeeld binnen in gebouwen moeten kunnen opereren.

De Rosse kolibrie is door zijn afmetingen en zijn vliegprestaties een ideaal voorbeeld voor de ontwikkeling van een microvliegtuig met flappende vleugels. Bovendien is dit één van de weinige soorten waarvan de vleugelbeweging grondig bestudeerd is.

Om gebruik te maken van liftversterkende aerodynamische verschijnselen die kunnen optreden rond flappende vleugels, is een complexe vleugelbeweging vereist. Deze is echter moeilijk mechanisch te realiseren, waardoor bestaande microvliegtuigen met flappende vleugels beduidend minder liftkracht genereren dan hun biologische tegenhangers. De vleugelbeweging van het microvliegtuig met flappende vleugels dat voor deze masterproef ontwikkeld is, sluit nauw aan bij deze van de Rosse kolibrie en levert gelijkaardige prestaties. Een resultaat dat in geen enkel ander wetenschappelijk onderzoek wordt geëvenaard.

Thesis voorgedragen tot het behalen van de graad van Master in de ingenieurswetenschappen: werktuigkunde

Promotor:: Prof. dr. ir. D. Vandepitte

Assessoren:: Prof. dr. ir. D. Reynaerts

Prof. dr. ir. J. De Schutter

: