

## University of Groningen

### The flapping flight of birds

Thielicke, William

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2014

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Thielicke, W. (2014). *The flapping flight of birds: Analysis and application*. [S.n.].

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

CHAPTER VIII

SUMMARY AND CONCLUSIONS



This chapter concludes the thesis and summarizes the answers to the questions posed in the introduction.

### *Chapter II: Digital particle image velocimetry*

**Q:** How can flow fields be captured and how accurate are these measurements?

Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) is a two dimensional flow visualization technique. DPIV was used to retrieve highly detailed information on the flow field generated by flapping wings. The chapter gives an introduction to the technique by supplying background information and performing several accuracy tests. PIVlab, an automatic analysis tool that was developed for and during the studies on flapping wing aerodynamics, is introduced in short.

In DPIV, a sheet in a fluid seeded with neutrally buoyant particles is illuminated using a laser. The illuminated sheet is filmed, and the velocities of groups of tracer particles are calculated by digital cross correlation. DPIV analyses typically start with image preconditioning. Several pre-processing techniques are introduced: Contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) enhances the image contrast locally and improves valid vector detection by about 5%. High-passing of the image data suppresses low frequency background information and can improve the signal-to-noise ratio of the correlation signal e. g. in cases with very inhomogeneous lighting. Intensity capping is a pre-processing technique that suppresses the increased impact of bright particles on the correlation signal. The filter attenuates bright particles while leaving the other particles unaffected. The valid vector detection probability increases again by about 5%.

After preprocessing the images, a cross correlation is performed. This correlation can be performed either in the spatial domain (direct cross correlation, DCC) or in the frequency domain (discrete Fourier transform, DFT). Synthetic particle images were generated to test the accuracy of several different correlation techniques, and to analyse the influence of a number of important parameters: Particle image diameter, particle density, sensor noise, particle pair loss, motion blur, shear and processing speed. The tests show that the DCC approach and the advanced DFT multipass algorithms (with the multi pass, grid refinement, window deformation technique) perform similarly well. The accuracy is consistently very good over a large range of particle sizes, densities, noise, out-of-plane displacements, motion blur and displacement gradients. A conventional single pass DFT approach performs much worse, but the processing speed is significantly higher.

Further tests with experimental image data finally show that the DFT algorithms with several passes outperform all other algorithms. Experimental images are much more challenging as they combine many of the parameters that were tested separately in the synthetic images.

## Chapter VIII

Several post-processing methods are presented: Manual validation techniques usually require an experienced user, which is not necessary during automatic data validation. The best results are achieved by a combination of both.

Gaps in the dataset need to be filled via interpolation. A range of interpolation techniques is evaluated using experimental and synthetic flow data with known velocities. A boundary value solver is shown to give the best results that are even better than two-dimensional spline interpolation.

Even the best performing correlation algorithms give results with a small amount of random error. This measurement noise deteriorates the result of the analyses particularly when calculating derivatives. Smoothing algorithms improve the velocity estimates by reducing both the maximum and the mean deviation from the real velocities. The best performing smoothing algorithm is a penalized least squares method.

Several additional features of PIVlab are introduced. The possibility to highpass the velocity field, to generate line integral convolution images and to automatically calculate the circulation of vortices enhances the analysis and interpretation of two dimensional velocity maps.

**A:**

The chapter shows how flow fields can be captured with high precision, and that DFT multipass algorithms give the most accurate results under challenging conditions (bias error  $< 0.005$  pixels and random error below 0.02 pixels for very small interrogation areas measuring  $16 \cdot 16$  pixels). The importance of pre- and post processing of the data is demonstrated. The most promising algorithms were implemented in PIVlab and used for the analyses in the following chapters.

**Chapter III: The influence of wing morphology on the 3D flow pattern of a flapping wing at bird scale**

**Q:** Which aerodynamic mechanisms generate lift in the slow speed flapping flight of birds, and how do airfoil design parameters influence these mechanisms?

The influence of airfoil design parameters under steady flow conditions has been subject to intensive research in the past. Hence the knowledge has advanced remarkably: Wing camber increases lift and the lift to drag ratio ( $L/D$ ), and a low airfoil thickness is beneficial at low Reynolds numbers ( $Re$ ). Flapping flight however largely deviates from steady and fully attached flow conditions. Leading-edge vortices (LEVs) can enhance the force coefficients, but the role of wing design parameters during the slow speed flight in birds is unknown to date. The flow around several wing models was mapped in three dimensions and over time by combining many two-dimensional analyses from different perspectives and positions. The analyses were performed in PIVlab using five samples and automatically generated three-dimensional masks of the wing. The wing models are based on airfoil data of a freely gliding pigeon, printed in 3D and cast with transparent resin, which allows for a flow visualization in the direct vicinity of the wing without shadows. Wing models with different amounts of airfoil thickness and camber were tested. The wings were flapping sinusoidally in a water tunnel at  $Re \approx 2.4 \cdot 10^4$  and a Strouhal number ( $St$ ) of  $0.2 \leq St \leq 0.4$ , typical parameters for the flapping flight in birds. The circulation of the wing and of leading-edge vortices – which is proportional to lift according to the Kutta-Joukowski theorem – were determined via the area integral of spanwise vorticity.

The pigeon-like 'standard' wing generates prominent and stable LEVs during the downstroke, which was visualized using the Q-criterion. Only at the highest Strouhal number, the LEV detaches from the wing before the downstroke ends. The total spanwise circulation is mostly proportional to the effective angle of attack, and circulation is maximal close to the wing tip. The importance of LEVs increases substantially with the Strouhal number: Averaged over all wing types, the contribution of the LEV to the total bound circulation increases from 37% at  $St = 0.2$  (representing cruising flight with small angles of attack on the wing) to 72% at  $St = 0.4$  (representing slow speed flight with large angles of attack).

A modification of the airfoil geometry influences the flow patterns significantly, but does not change to flow topology fundamentally. Wings with a high thickness decrease the circulation of the LEV by about 16%. In the highly cambered wing model, the circulation of the LEV is reduced remarkably by about 30%, but the total circulation of the wing ('conventional' + LEV circulation), and thereby lift, increases. In the highly cambered wing, the circulation near the wing tip decreases due to a weaker LEV, but this loss of circulation is more than compensated by additional circulation at the wing base.

## Chapter VIII

The observed LEVs are very comparable to what has been described in insect flight previously. The strength of LEVs is related to the effective angle of attack as well as to the time span during which high angles of attack are applied. No significant spanwise flow within the LEV core can be measured in any of the wing types. However, some weak spanwise flow exists behind the LEV on top of the wing. Vortices are stable in most cases, even without spanwise flow inside the core. This lack of spanwise flow might be caused by the low resulting flow velocity gradient between the wing's base and the tip. In comparison to a wing in hovering flight, the spanwise velocity gradient on a translating and flapping wing is much lower.

The small effect of wing thickness respectively leading-edge radius on the LEV circulation can be explained by the unimportance of leading-edge sharpness at low  $Re$ , which is not different from the situation in steady-state aerodynamics. Leading-edge sharpness seems to become increasingly important only at higher  $Re$ . Cambered wings generate more 'conventional' circulation, and less LEV circulation. This effect has not been studied before, because previous studies measured average forces on flapping wings at lower  $Re$ .

The effects of thickness and camber on the strength of leading-edge vortices correlates well with the theoretical pressure gradients at the leading-edge of the wing models: Thin wings, and wings with low camber generate higher adverse pressure gradients, which facilitates the detachment of fluid.

Birds need high force coefficients at slow flight speeds which can be ensured by the generation of LEVs. Birds can actively modify wing camber during a stroke cycle and hence have potential control over the strength of LEVs. Bird wings are thin and non-cambered at the outer half, where the effective angle of attack is large. Here, the development of LEVs is facilitated. At the inner half of the wing, bird wings are thicker and more cambered, increasing the 'conventional' circulation, and suppressing LEVs. These differences between arm and hand wing can also be observed in bats. Such kind of wings might therefore use different aerodynamic mechanisms to generate forces at the base and at the tip.

**A:** Birds use a combination of aerodynamic mechanisms to generate lift in flapping flight. The effective angle of attack, the amount of airfoil camber and to a lesser extent also wing thickness determine which aerodynamic mechanism dominates. In slow speed flight a great deal of lift is enabled by the generation of leading-edge vortices.

**Chapter IV: The effects of wing twist in slow-speed flapping flight of birds: Trading brute force against efficiency**

**Q:** Do the flapping wings of birds have to be twisted? Is energetic efficiency in conflict with the ability to generate large forces?

Wing twist is the torsion of a wing along the spanwise axis. Propellers are usually twisted, allowing the propeller to operate at a constant effective angle of attack over the full span that is close to the angle of attack with the maximum lift to drag ratio. This enhances the propulsive efficiency.

The analogy of propellers and flapping wings was often used to explain why flapping wings also need to be twisted: Twist should enable the full wing to operate at the 'best' effective angle of attack. This angle was supposed to be smaller than about  $10^\circ$ , because the wings would otherwise stall. Recently, it was shown that conventional stall does hardly occur on flapping wings at low and at high  $Re$ . The aim of the study presented in this chapter is to compare the efficiency and the aerodynamic forces of twisted and non twisted wings that emulate the slow-speed flapping flight of birds.

Transparent wing models that are based on the wings of freely gliding pigeons were built. These wings are equipped with different amounts of spanwise twist ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $40^\circ$ ). The models were tested at  $Re \approx 2.4 \cdot 10^4$  and  $0.2 \leq St \leq 0.4$ . The setup for capturing 3D flow information was identical to the study presented in the previous chapter. The circulation (proportional to lift according to the Kutta-Joukowski theorem) was determined as the area integral of spanwise vorticity in an area around the wing. The induced drag was determined by assuming a momentum balance, and the ratio of circulatory lift and induced drag ( $L_{circ}/D_{ind}$ ) serves as a measure for the mechanical flight efficiency. Span efficiency, which relates the ideal induced power to the real induced power, is used as an additional measure for aerodynamic efficiency. The span efficiency was calculated from the downwash distribution behind the wing.

The results show the development of leading-edge vortices on the non twisted wings at all  $St$ , and on the moderately twisted wing at the highest  $St$ . The highly twisted wing does not generate any LEVs. This wing type however interacts much less with the fluid as was to be expected from the small effective angle of attack. Again, no noteworthy spanwise flow in the vortex core can be detected over the whole twist range.

The distribution of spanwise circulation of the non twisted and the moderately twisted wing departs largely from an elliptic distribution. The magnitude of circulation furthermore decreases significantly with wing twist. The largest amount of circulation is found in the non twisted wing. This wing type also generates the highest amount of induced drag.  $L_{circ}/D_{ind}$  is lowest in the non twisted wing and decreases further when  $St$  is increased.  $L_{circ}/D_{ind}$  is inversely proportional to the tangent of the mean effective angle of attack ( $\bar{\alpha}_{eff}$ ) – similar to what has been found in insects and delta wings before.



## Chapter VIII

Span efficiency follows a very similar trend and is in a comparable range to what has been found during measurements of flapping bird flight before.

Wing twist is the 'counterpart' to  $St$ , it decreases the mean effective angle of attack, whereas  $\bar{\alpha}_{eff}$  is positively related to  $St$ . Vorticity accumulates over time in the LEV with a rate that is proportional to  $\alpha_{eff}$  as long as there is no effective vorticity drain – no matter how much twist is applied. The results agree well with the results of other studies that analysed wing twist in insect flight.

Every increase in force hence comes at the cost of reduced efficiency, which is not fundamentally different from the situation in steadily translating wings. But unlike steadily translating wings, the magnitude of the aerodynamic force can be much higher in flapping wings. It is likely that wing twist is used in cruising flight, where efficiency is important. Span efficiency might then be optimized by variations of camber and twist over span. But in slow speed flight, high forces are needed, which can be enabled by the generation of LEVs. Furthermore, drag can potentially contribute to the vertical force, helping to offset body weight.

Earlier studies have shown that some birds have twisted wings. Recent experiments revealed furthermore that birds benefit from LEVs in slow speed flight. Therefore, wing twist is likely to be used to control leading-edge vortices, and not to strictly prevent any flow separation. Wing twist might not be used to decrease the effective angle of attack at the wing tip, but to increase the angle at the wing base, making the whole wing operate a higher  $\alpha_{eff}$ .

**A:** Bird wings do not need to be twisted to prevent stall. Wing twist is beneficial only in the cases where aerodynamic efficiency is more important than the generation of sufficient and robust lifting forces, which appears unlikely in the case of slow-speed flight.

*Chapter V: Micro air vehicles – Linking aerodynamics with application*

**Q:** What are the benefits of flapping-wing locomotion and how can this knowledge be applied?

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are used for many tasks like e. g. atmospheric surveys, crop spraying and search and rescue missions. Micro air vehicles (MAVs) are UAVs with a maximum dimension around 0.15 m. The number of applications is still limited, although MAVs clearly have advantages when costs or hazard potential need to be minimized or when manoeuvrability is important. This is often the case when operating in urban environment or in proximity to animals or humans, respectively. MAVs are easier to transport and more rapid to deploy than larger UAVs.

One of the major challenges in the development of small UAVs is endurance and range, which scale with the size of an aircraft. A small size is also associated with a low Reynolds number. Here, airfoil performance decreases due to an increasing importance of viscous forces. Airfoils commonly suffer from the development of laminar separation bubbles, and additionally, the efficiency of small propulsion systems is low. Small aircraft reach only limited speeds, which further decreases the maximum range.

Four common types of MAVs are presented in the chapter: Fixed, rotary and flapping wing devices and hybrid aircraft. The knowledge about fixed wing aircraft is currently most advanced, but other types of MAVs are getting increasingly into focus. The endurance of fixed wing aircraft is very good, it increases with the lift to drag ratio (L/D), which is mostly influenced by airfoil and wing design – an area of very active research. The manoeuvrability of fixed wing aircraft is strongly limited, because sufficient lift can only be generated at flight velocities that are significantly higher than zero: The minimum speed of a conventional fixed wing MAV is too high for operating in urban environment.

Rotary wing MAVs circumvent the problem of minimum flight speed by moving their wings relative to the aircraft. Here, two principles are common: 'Conventional' helicopters and multirotors. The latter principle is mechanically simpler and possibly safer due to redundancy, which results in a more reliable aircraft. The endurance of rotary wing devices is maximal for one specific battery size, but generally much smaller than fixed wing aircraft by a factor related to  $\sqrt{\frac{\text{Drag}}{\text{Lift}}}$ . The endurance of rotary wing aircraft can be increased by lowering the disk loading – either by increasing the rotor diameter, or by lowering take-off weight. A low disk loading however negatively impacts the efficiency at higher speeds and the top speed. Rotary wing devices are hence not well suited for tasks that mainly require range or endurance. The manoeuvrability is however excellent, which is supported by the author's custom and highly manoeuvrable multirotor designs winning numerous national and international flight dynamics competitions.

Hybrid MAVs combine the advantageous properties of fixed and rotary wing devices. Tilt-body concepts seem to be the most favourable design for MAVs. However, the

performance in cruising and hovering flight will be inferior to a pure fixed respectively rotary wing device, due to some drawbacks that come with the combination these two principles.

Similar to rotary wing devices, flapping wing MAVs also move the wings with respect to the airframe and they can therefore generate sufficient aerodynamic forces at very low speeds or even in hovering flight. Flapping flight is extremely manoeuvrable, because larger peak forces can be generated with flapping wings in comparison to rotary wings. The aerodynamic mechanisms are also supposed to be more robust and less prone to disturbances of e. g. wind gusts. Designing flapping wing MAVs is however especially demanding. More research on efficient actuators is needed, as conventional rotary actuators are not the optimal solution to drive flapping wings. The efficiency of flapping wing propulsion is currently debated in literature. It appears likely that flapping wings have an efficiency that is similar or even superior to revolving wings at low  $Re$ . Furthermore, the efficiency and versatility of flapping wings could be improved by using more than one flight mode, as in birds.

**A:**

Further research on the aerodynamics and dynamics of flapping wing propulsion is needed to optimize flapping wing MAVs. These might finally outperform rotary wing MAVs in terms of manoeuvrability, and come very close to the excellent aerodynamic efficiency of fixed wing aircraft, resulting in high performance MAVs.

**Chapter VI: Reliable force predictions for a flapping-wing micro air vehicle: A 'vortex-lift' approach**

**Q:** Can the forces of a flapping-wing MAV in slow flight be reasonably modelled by taking into account the extra forces enabled by LEVs?

Early studies on the aerodynamics of flapping flight applied the blade-element theory to explain the forces that are generated during insect hovering. This theory uses force coefficients of steadily translating wings together with detailed information on the wing kinematics to calculate aerodynamic forces. It has been shown previously, that the forces in insect hovering flight are seriously underestimated by the blade-element theory. Soon, an explanation was found: During insect hovering flight, stable leading-edge vortices augment the force coefficients considerably. Such stable LEVs did not develop in steady-flow measurements in a wind tunnel and were hence not accounted for in the steady-state force coefficients.

LEVs are known from aircraft flight for quite a while. In delta winged aircraft, these vortices were shown to increase force coefficients by a factor of 2 to 3. Here, lift and drag under the presence of LEVs can be predicted effectively by using a model that includes a 'leading-edge suction analogy'. This model assumes the resultant aerodynamic force to be mostly perpendicular to the wing's surface.

The goal of the study presented in the chapter is to apply such a model to predict the forces of a flapping wing MAV in slow flight where a great deal of lift is enabled by the presence of LEVs.

The horizontal and vertical forces in flapping flight mode were measured with a force balance in an open jet wind tunnel for several flow velocities and flapping frequencies at  $8 \cdot 10^3 < Re < 1.3 \cdot 10^4$ . Two sets of force coefficients are used for the blade element analysis: Steady-state coefficients derived from wind tunnel measurements of the wing at angles of attack between  $-45^\circ$  and  $65^\circ$ , and coefficients generated by the delta wing theory. The blade-element analysis is used to model the mean vertical and the mean horizontal force of the flapping wing MAV.

The use of steady-state coefficients yields vertical force estimates that underestimate the measured forces by a factor of about two (-42%). The delta wing coefficients however give a very good match between calculated and measured vertical force. The mean deviation is only 2.9%. The match for the horizontal force is also reasonable, but less precise at increasing flapping frequencies or increasing free flow velocities and tends to overestimate the mean horizontal force. This deviation in the horizontal force estimate is explained by the fact that the force balance measurements incorporate the forces generated by the whole MAV system, including the interference drag of the mounting struts. The blade-element model however only accounts for the forces generated by the wings.

## Chapter VIII

The poor match of the model using steady-state coefficients is explained by the effective angle of attack: The angle of attack reaches values of up to  $45^\circ$  at the highest flapping frequencies. The steady-state coefficients are hence not suitable, as the wing stalls at an angle of attack of about  $11^\circ$  under steady flow conditions. The match between the blade-element model with steady-state coefficients and the force measurements is therefore only reasonable at low flapping frequencies and it deteriorates at higher frequencies.

The delta-wing coefficients predict that the aerodynamic forces increase more or less steadily with the effective angle of attack, as there is hardly conventional stall in flapping wings and in delta wings. The force coefficients are much higher in this model and agree well with other studies on flapping wings that generate high forces due to the presence of LEVs.

**A:**

The forces of a flapping wing device that operates at high effective angles of attack can be effectively modelled and predicted using a relatively simple blade-element approach that incorporates a theory originally developed for delta wings. The prerequisite for the application of this model to flapping wing devices is the development of stable LEVs.

**Chapter VII: Using bird flight modes to enhance overall flapping wing micro air vehicle performance**

**Q:** What advantages result from applying the flight modes of birds to MAVs?

Flapping wing micro air vehicles have made impressive progress in the past. Several very capable and manoeuvrable flapping wing MAVs have recently been designed. However, energy efficiency is still one of the major challenges. MAVs need to be energy efficient and manoeuvrable at the same time to be able to perform complex missions. Birds can manoeuvre exceptionally well and they are assumed to have a high aerodynamic efficiency. Therefore they are very interesting model organisms for high performance MAVs.

During gliding and cruising flight in birds, the airflow stays fully attached to the wings. Wings with a good L/D allow birds to travel with a very low energy expenditure. In slow speed flight, birds can benefit from the extra forces enabled by the presence of leading-edge vortices. Hence, different aerodynamic mechanisms are used in different flight modes, which is also very promising for an implementation in MAVs. It might result in augmented endurance and enhanced manoeuvrability. Bio-inspired wings are likely to play an important role for enabling a good performance in both flight modes.

A flapping wing MAV was designed for this study. The wings are inspired by the wings of swiftlets. They were made from lightweight polystyrene foam, and equipped with camber and a round leading-edge at the wing base. Further to the tip, the camber was gradually reduced to zero, and the leading-edge was sharpened, according to the wing morphology of swiftlets. A lightweight mechanism was designed with one actuator that drives a two-degrees-of-freedom joint in the shoulder. Pro- and supination occur passively at the beat angle extremes, allowing for a small effective angle of attack during the upstroke, and a large effective angle of attack during downstroke.

The horizontal and vertical forces and the kinematics were captured with the MAV positioned in an open jet wind tunnel. In gliding flight mode, the MAV reaches a maximum L/D of 8.6 which is very comparable to the model organism, the swiftlet. In flapping flight mode, the wings are adapting to changes in flight velocity and flapping frequency by passively adjusting the degree of pro- and supination, which helps to limit the effective angle of attack to angles below  $45^\circ$ . A positive mean vertical force ('lift') is generated at all flapping frequencies, the maximum force ( $\approx 96$  mN) develops at the highest free flow velocity and at the highest flapping frequency tested. The net horizontal force easily exceeds zero, indicating the generation of a thrust force that is larger than the total drag. The mean aerodynamic forces are sufficient to keep a fully equipped MAV airborne.

A time-resolved blade-element analysis shows that most of the positive vertical force is generated during the downstroke, and most of the thrust is generated during the upstroke.

## Chapter VIII

These fluctuations indicate that in comparison to a rotary wing propulsion, larger peak forces are generated, which is supposed to be beneficial for enhancing manoeuvrability.

A flapping wing MAV that is using bird flight modes will benefit from the efficiency of fully attached flow aerodynamics in cruising flight, and from the large and reliable forces generated via LEVs in slow speed flight. The energy requirement of flapping wing MAVs in slow speed flight is not fundamentally different from more conventional rotary wing devices. Cruising flight however is supposed to be much more efficient than slow-speed flight, due to the use of attached flow aerodynamics. Gliding flight is the ultimate flight strategy to stay airborne without investing much energy. And flapping wing MAVs that are able to perform gliding flight are potentially able to benefit from thermal updrafts or soar upwind of urban buildings. The efficiency of cruising flight might be further improved by using an additional bird flight strategy: Several studies have shown that birds save energy when they alternate between flapping and gliding flight mode (intermittent flight). This might be an interesting strategy also for flapping wing MAVs.

**A:** Flapping wing MAVs with the possibility to use bird flight modes can be a very adequate solution for completing tasks that require a MAV to be manoeuvrable and energy efficient in one single device.

THESIS CONCLUSIONS

---

This thesis analyses the aerodynamics of slow-speed flapping flight in birds using physical models and time-resolved, 3D flow visualization with a custom DPIV tool.

It was shown that flow separation plays an important role in the flapping flight of birds. Leading-edge vortices develop at high effective angles of attack and enhance the circulation and hence the aerodynamic force. The intensity of leading-edge vortices can be greatly influenced by the airfoil design, such as camber and thickness. It is likely that birds and bats benefit from these possibilities to control LEVs. The aerodynamic efficiency however decreases with the development of LEVs. The efficiency can be modulated and improved by twisting the wings. That does however decrease the magnitude of the aerodynamic force coefficients and can most likely not be afforded in all flight modes: At higher flight speeds, force coefficients do not need to be maximal, and wing twist increases both the L/D and the span efficiency. Low flight speeds require maximal force coefficients and efficiency becomes of secondary interest.

Such a competition between efficiency and peak forces also exists in technical flight: Fixed wing aircraft are very efficient in cruising flight, but – unlike birds – do not generate enough lift in slow speed flight. Rotary wing devices can generate sufficient forces in slow and hovering flight, but – again unlike birds – have an inferior efficiency at higher flight speeds. Flapping wing micro air vehicles can combine the advantages of rotary and fixed wing aircraft. A prototype and a method that may predict the aerodynamic forces generated in slow-speed flapping flight using a theory of delta-wing aircraft was developed. The MAV is equipped with bird-inspired wings that perform very well in both gliding flight and slow-speed flapping flight.

The combination of flight modes enables to develop micro air vehicles that might one day have a similar performance as birds: Exceptional manoeuvrability in combination with an outstanding aerodynamic efficiency.



Dit hoofdstuk is een samenvatting inclusief conclusies van het proefschrift en is bedoeld om vragen die in de introductie gesteld zijn kort te beantwoorden.

### *Hoofdstuk II: Digital particle image velocimetry*

**Q:** Hoe kunnen stromingsvelden vastgelegd worden en met welke nauwkeurigheid?

Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) is een twee-dimensionale stromings-visualisatie-techniek. In de studies in dit proefschrift is DPIV gebruikt om zeer nauwkeurige informatie te krijgen over het stromingsveld van een vleugel in slagvlucht. Dit hoofdstuk geeft een introductie van de techniek, door achtergrond-informatie te geven en verschillende nauwkeurigheidstests uit te voeren. PIVlab, een instrument dat automatische analyses kan doen, is ontwikkeld voor en tijdens onze studies aan de aerodynamica van vleugels in slagvlucht, de methode zal hier kort worden geïntroduceerd. Bij DPIV wordt in een vloeistof met neutraal drijvende deeltjes een 2D vlak verlicht door middel van een laser. Dit vlak wordt gefilmd met een zeer snelle digitale camera en de snelheden van groepen deeltjes in opeenvolgende beelden worden berekend door een digitale correlatie. DPIV analyses beginnen meestal met de pre-conditionering van de afbeelding. Er zijn verschillende voorbewerkingstechnieken: 'Contrast limited adaptive histogram equalization' (CLAHE) versterkt het contrast van de afbeelding lokaal en verbetert de detectie van valide vectoren met 5%. Toepassing van een hoog-doorlaatfilter op de beeldgegevens onderdrukt de achtergrond-storing van lage frequenties (bijvoorbeeld een inhomogene belichting) en kan de signaal-ruis verhouding van het correlatie signaal verbeteren. Intensiteit aftopping is een voorbewerkingstechniek die het sterke effect van erg heldere deeltjes op het correlatie-signaal onderdrukt. Het filter dempt de heldere deeltjes en laat de andere deeltjes ongemoeid. De detectie-kans voor goede, valide vectoren neemt hierdoor met ongeveer 5% toe.

Na het voorbewerken van de beelden wordt een kruis-correlatie uitgevoerd. Deze correlatie kan worden uitgevoerd in een ruimtelijke domein (direct cross correlation, DCC) of in een frequentie domein (discrete Fourier transform, DFT). Gesimuleerde deeltjes-afbeeldingen zijn gegenereerd om de nauwkeurigheid van verschillende correlatie technieken te testen en om de invloed van een paar belangrijke parameters te analyseren. Deze parameters zijn: diameters van de afgebeelde deeltjes, ruimtelijke dichtheid van de deeltjes, sensorruis, deeltjespaar-verlies, bewegingsonscherpte, schuivende lagen en verwerkingssnelheid. De tests laten zien dat de DCC-benadering en de DFT-benadering met herhalende algoritmen (met herhalingen, raster verfijning en

venster vervorming) beide goed functioneren. De nauwkeurigheid is constant goed over een grote reeks van deeltjesgroottes, deeltjes-dichtheid, ruis, buiten het veld verplaatsing van deeltjes, bewegingsonscherpte van deeltjes en verplaatsings-gradiënten van deeltjes. Een gebruikelijke 'single-pass' DFT-benadering presteert veel slechter, maar de verwerkingssnelheid daarvan is significant hoger.

Verdere tests met afbeeldingen uit experimenten laten uiteindelijk zien dat de DFT-algoritmes met meerdere herhalingen beter zijn dan alle andere algoritmen. Experimentele afbeeldingen zijn veel moeilijker te analyseren dan de gesimuleerde afbeeldingen, omdat ze verschillende parameters samenvoegen, die in de gesimuleerde afbeelding apart gemeten zijn.

Verschillende post-verwerkingsmethoden zijn besproken: Validatie-tests met manueel aanwijzen vereisen echter een ervaren gebruiker, die niet nodig is bij vol-automatische data validatie-tests. De beste resultaten worden verkregen bij een combinatie van de twee.

Lege plaatsen in de dataset worden opgevuld met behulp van interpolatie. Een reeks aan interpolatie-technieken is geëvalueerd door experimentele en gesimuleerde beelden te gebruiken met bekende stroom-snelheden. Een grenswaarde-solver bleek de beste resultaten te geven, zelfs beter dan tweedimensionale spline-interpolatie. Zelfs de best presterende correlatie-algoritmen geven resultaten met een kleine hoeveelheid standaardfouten. Deze meet-ruis verslechtert het resultaat van de analyse, specifiek bij het berekenen van afgeleiden. 'Smoothing' algoritmen verbeteren de snelheidsschattingen door het reduceren van de maxima en van de gemiddelde afwijking van de werkelijke snelheden. Het best werkende 'smoothing' algoritme is de 'penalized' kleinste-kwadraten methode.

Verschillende extra functies van PIVlab worden besproken. The mogelijkheid om het snelheidsveld te filteren met een hoog-doorlaatfilter, om lijnintegraal-convolutie-beelden te genereren en om automatisch de circulatie van de wervels te berekenen, verbetert de analyse en interpretatie van twee dimensionale snelheidsverdelingen.

**A:** Het hoofdstuk laat zien hoe stromingsvelden vastgelegd kunnen worden met hoge precisie en dat DFT herhalings-algoritmen de meest nauwkeurige resultaten geven onder moeilijke condities (bias fout < 0.005 pixels en toevallige fout beneden 0.2 pixels voor erg kleine interrogatie gebieden 16·16 pixels). Het belang van pre- en post-bewerking van beelden en data is verduidelijkt. De meest-belovende algoritmes zijn geïmplementeerd in PIVlab en gebruikt voor de analyses in de volgende hoofdstukken.

### *Hoofdstuk III: The influence of wing morphology on the 3D flow pattern of a flapping wing at bird scale*

**Q:** Welke aerodynamische mechanismen genereren lift tijdens slagvlucht van een vogel vliegend met lage snelheid, en hoe beïnvloeden verschillende vleugelprofiel-parameters deze mechanismen?

In voorgaand onderzoek is de invloed van een vleugelvorm-ontwerp intensief bestudeerd onder constante stromingscondities. De kennis over dat onderwerp is dan ook vergevorderd: Vleugel-welving verbetert de lift en de lift/weerstand-ratio (Lift/Drag,  $L/D$ ), en een dunne vleugelvorm heeft voordelen bij lage Reynolds-getallen ( $Re$ ). De stromingscondities tijdens slagvlucht wijken echter sterk af van constante en volledig aanliggende stroming-condities. Er treden dan voorrand-wervels (leading-edge Vortices, LEVs) op die verantwoordelijk zijn voor sterk verhoogde lift coëfficiënten.

De rol die de vleugel-ontwerp-parameters spelen tijdens langzame slagvlucht is nog steeds niet duidelijk. Om hier licht op te werpen zijn stromingspatronen rond verschillende vleugelmodellen vastgelegd in drie dimensies en in de tijd, door het combineren van series tweedimensionale analyses uit verschillende perspectieven en posities. De analyses zijn uitgevoerd in PIVlab door gebruik te maken van vijf opname-series en geautomatiseerde maskering van de vleugels. De vleugel-modellen zijn gebaseerd op vleugelvormgegevens van een zwevende duif, een moeder-vleugels is geprint in 3D waarvan afgietsels zijn gemaakt met transparante hars met ongeveer dezelfde licht-brekkingsindex als water. De transparante hars zorgt ervoor dat er geen schaduwen ontstaan en de stroming dichtbij de vleugel goed gevisualiseerd kan worden. Vleugelmodellen met verschillende vleugeldikte en welving zijn getest. De vleugels volgden een sinusvormig slagvlucht-pad in een watertunnel bij een  $Re \approx 2.4 \cdot 10^4$  en een Strouhal nummer ( $St$ ) van  $0.2 \leq St \leq 0.4$ , wat typische parameter-grootten zijn voor slagvlucht van vogels. De circulatie rond de vleugels en de LEVs (samen en apart) – welke proportioneel is aan de lift volgens het Kutta-Joukowski theorema – zijn bepaald door oppervlakte-integralen van de vorticeiteit te nemen van doorsnede-vlakken dwars op de vleugel.

De op de duif gebaseerde 'standaard' vleugel genereert prominente en stabiele LEVs tijdens de neergaande slag, welke zijn gevisualiseerd door gebruik te maken van het Q-criterium. Alleen bij het hoogste Strouhal-getal laat de LEV los van de vleugel voordat de neerslaande slag eindigt, vooral nabij de vleugeltip. De totale circulatie langs de lengteas is meestal evenredig aan de effectieve hoek van aanstroming, en de circulatie is maximaal dichtbij de vleugeltip. Het belang van LEVs neemt toe met het Strouhal-getal: gemiddeld neemt over alle vleugel-types de contributie van de LEV aan de totale gebonden circulatie toe van 37% met  $St = 0.2$  (is gelijk aan een kruisvlucht met kleine hoeken van aanstroming op de vleugel) tot 72% bij een  $St = 0.4$  (gelijk aan langzame vlucht met grote hoeken van aanstroming).

Aanpassingen van de geometrie van de vleugelvorm beïnvloeden de stromingspatronen significant, maar veranderen de basale stromingstopologie nauwelijks. Dikkere vleugels verminderen de circulatie van een LEV met ongeveer 16%. Bij het sterk gewelfde vleugelmodel is de circulatie van de LEV eveneens merkbaar verminderd, nu met ongeveer 30%, maar de totale circulatie van de vleugel ('conventionele' + LEV-circulatie) neemt juist toe; daarbij is de circulatie dichtbij de vleugeltip verminderd door een lokaal zwakkere LEV, maar dit verlies aan circulatie wordt gecompenseerd door sterkere circulatie aan de basis van vleugel. De LEVs die we gevonden hebben in de analyse zijn goed te vergelijken met wat voorheen beschreven is voor insectenvlucht: De sterkte van de LEVs is gerelateerd aan de effectieve hoek van aanstroming en ook aan de tijdsperiode waarin hoge hoeken van aanstroming worden toegepast. In geen van de vleugeltypes kon een significante stroming van vleugelbasis naar -tip (binnen de LEV) geregistreerd worden. Een stroming met lage snelheid parallel aan de vleugel-as naar de tip toe is wel aanwezig net achter de LEV, bovenop de vleugel. De wervels zijn stabiel in de meeste gevallen, zonder dat daar stroming naar de tip toe in de vortex-kern voor nodig is. Deze afwezigheid van die stroming kan veroorzaakt zijn door het slechts kleine verschil in stroomsnelheid tussen de vleugelbasis en de vleugeltip. In vergelijking met een vleugel in een hangvlucht is de de snelheidsgradiënt langs de lengte-as op een translerende vleugel en vleugel in slagvlucht veel lager.

Het kleine effect van vleugel dikte resp. voorrand-radius op de LEV-circulatie kan verklaard worden door de lage importantie van de vorm en de scherpte van de leading-edge bij lage  $Re$ . Dat is niet anders dan bij steady-state aerodynamica: leading-edge scherpte lijkt belangrijker te worden met toenemende  $Re$ . Gewelfde vleugels genereren meer 'conventionele' circulatie, en minder LEV circulatie. Dit effect is niet eerder bestudeerd in voorgaande studies die wel gemiddelde krachten gemeten hebben bij slagvlucht bij een lagere  $Re$ .

Het effect van de dikte en welving op de sterkte van de LEVs correleert goed met de theoretische druk gradiënten bij de leading-edge van de vleugel modellen: Dunne vleugels, en vleugels met weinig welving genereren negatieve drukgradiënten, die de loslating van stroming en daarmee het ontstaan van LEVs faciliteren. Vogels hebben hoge kracht-coëfficiënten nodig bij lage vliegsnelheden, en juist die kunnen worden gegenereerd met behulp van LEVs. Vogelvleugels zijn dun en niet of nauwelijks gewelfd in de buitenste helft, waar juist de effectieve hoek van aanstroming groot is. Dat faciliteert het ontstaan en bestaan van LEVs. Aan de binnenste helft van de vleugel is de vleugel dikker en meer gewelfd, waardoor de 'conventionele' circulatie gestimuleerd wordt en LEVs worden onderdrukt. Vogels kunnen actief de welving van hun vleugels aanpassen tijdens een vleugelslag-cyclus en hebben daardoor een zekere mate van controle over de sterkte van de LEVs. Een dergelijke (algemene) vogelvleugel gebruikt dus verschillende aerodynamische mechanismen om krachten te genereren nabij de basis in vergelijking met het deel nabij de tip, afhankelijk van de vliegsnelheid.

**A:**

Vogels gebruiken een combinatie van aerodynamische mechanismen om lift te genereren tijdens slagvlucht. De effectieve hoek van aanstroming, de lokale hoeveelheid wending in het vleugelprofiel en in mindere mate ook de vleugeldikte bepalen welk aerodynamisch mechanisme domineert. Tijdens langzame vlucht is een groot deel van de lift gegenereerd door LEVs.

**Hoofdstuk IV: The effects of wing twist in slow-speed flapping flight of birds: Trading brute force against efficiency**

**Q:** Moeten de vleugels van een vogel in slagvlucht getwist zijn?  
 En: Conflicteert energetische efficiëntie met het potentieel om grote krachten te genereren?

Vleugel-twist is de verdraaiing van een vleugel langs diens lengteas. Propeller-bladen zijn over het algemeen getwist, wat er voor zorgt dat ze een constante effectieve hoek van aanstroming over de gehele spanwijdte hebben. Dat is dan idealiter de hoek van aanstroming voor de beste lift/drag-verhouding en zorgt voor een optimale voortstuwings-efficiëntie. De overeenkomst tussen propellers en vleugels in slagvlucht is vaak gebruikt om uit te leggen waarom vleugels in slagvlucht ook getwist moeten zijn: Twist zou de volledige vleugel in staat moeten stellen om te opereren bij de 'beste' effectieve hoek van aanstroming. Deze hoek was kleiner verondersteld dan ongeveer 10 graden, omdat de vleugels anders zouden overtrekken. Recentelijk is duidelijk geworden dat conventioneel overtrekken nauwelijks voorkomt bij vleugels in slagvlucht, zowel bij lage als bij hoge  $Re$ . Het doel van de hier gepresenteerde studie is het vergelijken van de efficiëntie en de aerodynamische krachten van getwiste vleugels en niet getwiste vleugels tijdens een nabootsing van langzame slagvlucht bij vogels. Daartoe zijn transparant vleugelmodellen gemaakt, gebaseerd op de oppervlakteverdeling en de profielvormen van de vleugel van een vrij zwevende duif. De vleugelmodellen zijn voorzien van verschillende mates van twist: 0, 10 en 40 graden verschil tussen basis en tip. De modellen zijn getest bij een  $Re \approx 2.4 \cdot 10^4$  en  $0.2 \leq St \leq 0.4$ . De opstelling voor het vastleggen van de 3d stromingsinformatie was identiek aan die in de studie gepresenteerd in het vorige hoofdstuk. Circulatie is eveneens berekend uit de oppervlakte-integralen van dwarsdoorsnede-stromingsvelden en Lift is berekend uit de circulatie m.b.v. het Kutta-Joukowski-theorema. De geïnduceerde weerstand is gevonden m.b.v. een momentum-balans. De verhouding Lift vs. geïnduceerde weerstand is een maat voor de mechanische efficiëntie ( $L_{circ}/D_{ind}$ ). De aerodynamische efficiëntie over de lengterichting van de vleugel is berekend uit de verdeling van de downwash (neerwaartse stroming) achter de vleugel; deze relateert het ideale geïnduceerde vermogen aan het gevonden geïnduceerde vermogen als een extra maat voor aerodynamische efficiëntie.

Het niet-getwiste vleugelmodel laat de ontwikkeling van LEVs zien op bij alle  $St$ . Op de matig getwiste vleugel is dat alleen zichtbaar bij de hoogste  $St$ . De extreem getwiste vleugel genereert geen LEVs; dit vleugelmodel interacteert duidelijk veel minder met de vloeistof vanwege de kleine hoek van aanstroming door de hoge twist. Er kon over de hele twist reeks in de LE-vortex-kern geen noemenswaardige stroming richting de tip aangetoond worden.

De verdeling van circulatie over de lengte van de niet getwiste en gemiddeld getwiste vleugelmodellen van de vleugel volgt slechts gedeeltelijk een elliptische verdeling. De

circulatie vermindert bovendien significant met de vleugel-twist. De grootste circulatie is gevonden in de niet getwiste vleugel. Dit vleugeltype genereert ook de grootste geïnduceerde weerstand. ( $L_{circ}/D_{ind}$ ) is het laagst in de niet getwiste vleugel en neemt af met toenemende  $St$ . ( $L_{circ}/D_{ind}$ ) is omgekeerd evenredig aan de tangens van de gemiddelde effectieve aanstroomhoek ( $\bar{\alpha}_{eff}$ ), wat overeenkomt met wat is gevonden bij insecten en bij delta vleugels. Aerodynamische efficiëntie in de lengterichting van de vleugel volgt een vergelijkbare trend en in een vergelijkbare range als wat er eerder is gevonden voor vleugels in slagvlucht.

Vleugel-twist is in zekere zin de 'tegenhanger' van  $St$ , het vermindert de gemiddelde effectieve hoek van aanstroming, terwijl de  $\bar{\alpha}_{eff}$  positief gerelateerd is aan de  $St$ . Vorticititeit accumuleert in de LEV evenredig met  $\alpha_{eff}$ , zolang als er geen effectieve uitstroom van vorticititeit is. Onze resultaten komen goed overeen met de resultaten van eerdere studies aan vleugeltwist bij insecten.

Elke toename in kracht veroorzaakt een verminderde efficiëntie, wat niet fundamenteel verschillend is van de situatie voor gestaag translerende vleugels. Maar anders dan in translerende vleugels kunnen de aerodynamische (piek-)krachten op de vleugels veel hoger zijn tijdens slagvlucht. Waarschijnlijk is het zo dat de vleugel-twist gebruikt wordt tijdens kruisvlucht, waar efficiëntie erg belangrijk is. Aerodynamische efficiëntie over de spanwijdte (lengterichting) van de vleugel kan geoptimaliseerd worden door locale variaties in welving en twist. Maar tijdens langzame vlucht zijn grote krachten nodig (gevormd door opwekken van LEVs) wat juist weer ten koste van de efficiëntie gaat. Additioneel kan de vleugelweerstand potentieel ook bijdragen aan de verticale kracht, wat helpt om het lichaamsgewicht te compenseren.

Eerdere studies hebben laten zien dat sommige vogels duidelijk getwiste vleugels hebben. Recente experimenten laten eveneens duidelijk zien dat vogels baat hebben bij LEVs in langzame vlucht en ze zelfs nodig hebben om voldoende lift te ontwikkelen. Vleugel twist lijkt derhalve gebruikt te worden om de LEVs te stabiliseren en niet zozeer om stromingsloslating te voorkomen wat voorheen gedacht werd. Vleugel twist wordt waarschijnlijk niet gebruikt om de effectieve aanstroomhoek bij de vleugeltip te verminderen, maar juist een toename van de hoek van aanstroming bij de vleugelbasis mogelijk te maken, zodat de gehele vleugel een hoge aanstroomhoek heeft.

**A:** We hebben laten zien dat vleugels bij vogels niet getwist moeten zijn om overtrekking te voorkomen. Vleugel twist is alleen voordelig in gevallen waar efficiëntie belangrijker is dan de generatie van voldoende en krachtige lift, wat echter nauwelijks een rol speelt tijdens langzame vlucht.

**Hoofdstuk V: Micro air vehicles – Linking aerodynamics with application**

**Q:** Wat zijn de voordelen van slagvlucht? En hoe kan deze kennis worden toegepast?

Onbemande luchtvoertuigen (unmanned aerial vehicles, UAVs) worden gebruikt voor verschillende taken zoals atmosferisch onderzoek, gewasbesproeiing en zoek- en reddingsmissies. Micro luchtvoertuigen (micro aerial vehicles, MAVs) zijn UAVs met een maximale dimensie van ongeveer 0.15 m. Het aantal toepassingen voor dit soort voertuigen is nog steeds beperkt, terwijl MAVs duidelijk voordelen hebben wanneer kosten of risico geminimaliseerd moeten worden of als manoeuvreerbaarheid belangrijk is. Dit is vaak het geval wanneer er in een stadse omgeving geopereerd moet worden of dichtbij dieren en mensen. MAVs zijn makkelijker te transporteren en sneller inzetbaar dan UAVs.

Een van de grootste uitdagingen in de ontwikkeling van kleine UAVs is het uithoudingsvermogen en het bereik, welke beide toenemen met de grootte van het vliegend voertuig. Kleine afmetingen zijn verbonden met met een laag Reynolds getal waarbij de aerodynamische prestaties door een toenemende belangrijkheid van de viskeuze krachten verminderen. De vleugels ondervinden normaliter onder die omstandigheden nadeel van de ontwikkeling van loslatingsbubblen in de laminaire stroming. Daardoor is de efficiëntie van klein-schalige voortstuwings- of vlieg-systemen laag. Kleine luchtvoertuigen bereiken daardoor slechts een beperkte snelheid, dit verlaagt het maximale bereik nog verder.

Vier typen MAVs worden naar voren gebracht in dit hoofdstuk: met vaste vleugels, met draaiende vleugels, met slagvlucht-vleugels en een hybride type. De kennis over MAV's met vaste vleugels is op dit moment het verst gevorderd, maar andere typen krijgen tegenwoordig ook steeds meer aandacht. Het uithoudingsvermogen van een MAV met vaste vleugels neemt toe met de verhouding van lift ( $L$ ) tot weerstand (drag,  $D$ ), dwz de  $L/D$ , welke het meest beïnvloed wordt door het aerodynamisch profiel en het vleugel ontwerp – een gebied van veel en actief onderzoek. De manoeuvreerbaarheid van een MAV met vaste vleugels is beperkt, omdat genoeg lift alleen gegenereerd kan worden bij vliegsnelheden die significant hoger zijn dan nul. Dat heeft direct tot gevolg dat een vaste-vleugel-MAV door de benodigde minimale vliegsnelheid van een (conventionele) vaste vleugel ongeschikt is voor in een stadse omgeving.

MAVs met roterende vleugels vermijden het probleem van minimale vliegsnelheid door het bewegen van de vleugels ten opzichte van het voertuig. Hier zijn twee welbekende voorbeelden van: de gewone helikopters en de multi-rotors. De laatst genoemde groep is mechanisch simpeler en mogelijk veiliger, wat voor een betrouwbaarder luchtvoertuig zorgt. Het uithoudingsvermogen van multi-rotors is direct afhankelijk van de batterij-grootte, maar altijd lager dan van een vaste-vleugel-ontwerp met een factor



gerelateerd aan  $\sqrt{\frac{\text{Drag}}{\text{Lift}}}$ . Het uithoudingsvermogen van een draaiende-vleugel-systeem kan toenemen met: het verlagen van de 'disk loading', het vergroten van de rotor-diameter, of een lager startgewicht. Echter, een lage 'disk loading' heeft een negatief effect op de efficiëntie bij hoge snelheden en bij topsnelheid. Draaiende vleugels zijn derhalve niet geschikt voor taken die bereik en uithoudingsvermogen eisen. De manoeuvreerbaarheid is echter uitstekend, wat wordt geïllustreerd door de op maat gemaakte en hoog manoeuvreerbare multi-rotor ontwerpen door de auteur van dit proefschrift, die hier nationale en internationale wedstrijden mee gewonnen heeft.

Hybride MAVs combineren de voordelen van vaste en draaiende vleugels. Ontwerpen met kantel-vleugels lijken het beste alternatief voor dergelijke MAVs. De prestaties in kruis- en hangvlucht zijn echter minder dan een ontwerpen met een vaste respectievelijk een roterende, vleugel, wat komt door nadelen die meekomen met het combineren van deze twee principes. Net zoals bij draaiende vleugels, bewegen slagvlucht-MAVs hun vleugel ook ten opzichte van het vliegtuig en daardoor kunnen zij genoeg aerodynamische kracht genereren bij lage snelheden of zelfs bij hangvlucht. Een slagvlucht-MAV is extreem manoeuvreerbaar, doordat er hogere piekkrachten gegenereerd kunnen worden met vleugels in slagvlucht in vergelijking met draaiende vleugels. De achterliggende aerodynamica is waarschijnlijk zowel krachtiger als minder gevoelig voor verstoring door bijvoorbeeld windvlagen. Het ontwerpen van slagvlucht-MAVs is echter geen senicure. Meer onderzoek naar efficiënte actuatoren is nodig, aangezien een conventionele draai-aandrijving niet de optimale oplossing is om op-en-neer-gaande vleugels aan te drijven. De efficiëntie van slagvlucht-voortstuwing is momenteel in discussie in de literatuur. Er is hoe langer hoe meer consensus dat vleugels in slagvlucht een efficiëntie hebben die dichtbij ronddraaiende vleugels bij lage  $Re$  komt, of zelfs beter is. Bovendien kan de efficiëntie en veelzijdigheid van vleugels in slagvlucht verbeterd worden door gebruik te maken van meerdere manieren van vliegen, zoals bij vogels.

**A:**

Verder onderzoek naar de aerodynamica en dynamica van slagvluchtvoortstuwing is nodig om slagvlucht-MAVs te optimaliseren. Deze kunnen uiteindelijk de MAVs met draaiende vleugels overtreffen waar het manoeuvreerbaarheid betreft, en kunnen dichtbij de uitstekende aerodynamische efficiëntie van een vaste vleugel komen - wat resulteert in hoog-presterende MAVs.

**Hoofdstuk VI: Reliable force predictions for a flapping-wing micro air vehicle: A 'vortex-lift' approach**

**Q:** Kunnen de krachten van een slagvlucht-MAV goed gemodelleerd worden door rekening te houden met de extra krachten gegenereerd door de LEVs?

In vroegere studies naar de aerodynamica van slagvlucht zijn 'blade-element'-theoriën toegepast om de krachten die gegenereerd worden te kunnen schatten, zoals bijvoorbeeld bij een insect in hangvlucht. De 'blade-element' theorie gebruikt normaliter kracht coëfficiënten van een gestaag translerende vleugel om, samen met gedetailleerde informatie over de vleugel-kinematic, de aerodynamische krachten uit te rekenen. Toepassing op een insect hangvlucht liet zien dat daarmee de berekende krachten veel te laag uit komen. Later is hiervoor een verklaring gevonden: een insectenvleugel gedraagt zich niet als een vleugel in glijvlucht maar heeft stabiele LEVs op de vleugels die de kracht coëfficiënten aanzienlijk vergroten. Zulke stabiele LEVs zijn niet aanwezig bij metingen aan stabiele vleugels in een in een wind tunnel en zijn hierdoor niet van invloed op steady-state kracht-coëfficiënten.

LEVs zijn al enige tijd bekend in de vliegtuig-aerodynamica. Bij een vliegtuig met delta-vleugels vermeerderen de LEVs de kracht-coëfficiënten met een factor van 2 tot 3. Tegenwoordig kunnen lift en drag bij aanwezigheid van LEVs effectief voorspeld worden door een model te gebruiken dat 'leading-edge suction analogy' gebruikt. In die analogie wordt er van uit gegaan dat aerodynamische krachten, inclusief extra bijdragen door de aanwezigheid van LEVs, voornamelijk loodrecht gericht zijn op het vleugel oppervlak.

Het doel van de studie in dit hoofdstuk is om 'leading edge suction analogy' model te gebruiken om de krachten van een MAV in slagvlucht te berekenen tijdens langzaam vliegen, omdat dan waarschijnlijk een groot deel van de opwaartse kracht geleverd wordt door de aanwezige LEVs. De horizontale en verticale krachten tijdens slagvlucht zijn gemeten met een krachtbalans in een open-uitstroom-windtunnel voor verschillende stroomsnelheden en slagfrequenties bij  $8 \cdot 10^3 < Re < 1,3 \cdot 10^4$ . Twee sets van kracht coëfficiënten zijn gebruikt voor de 'blade-element' analyse: Steady-state coëfficiënten afgeleid van de windtunnel metingen van de vleugel bij statische aanstroomhoeken tussen -45 graden en 65 graden, en coëfficiënten gegenereerd door het bovengenoemd delta-vleugel-model. De 'blade-element' analyse resulteert in modellering van gemiddelde verticale en horizontale kracht van de slagvlucht-MAV.

Bij gebruik van steady-state liftcoëfficiënten levert schattingen van de verticale kracht op die ongeveer een factor 2 kleiner zijn dan de gemeten krachten. Gebruik van de delta-vleugel coëfficiënten geeft echter een erg goede match tussen de berekende en de gemeten verticale kracht. De gemiddelde afwijking is maar 2.9%! De horizontale krachten komen ook redelijk overeen, maar minder precies bij hogere slagfrequenties of toenemende vrije stroomsnelheden; de gemeten krachten zijn hier hoger dan de berekende schattingen.

Deze afwijking in de horizontale kracht-schatting komt waarschijnlijk door het feit dat de weerstandskracht van de hele MAV wordt gemeten, inclusief de de montage-steunen en aandrijfsysteem, terwijl het 'blade-element' model alleen de krachten die gegeneerd zijn door de vleugels berekend.

Een oorzaak waarom het model sterk onderschat bij gebruik van de steady-state coëfficiënten ligt waarschijnlijk in de effectieve hoek van aanstroming: de hoek van aanstroming bereikt een waarde van 45 graden bij de hoogste slagfrequenties. De steady-state coëfficiënten zijn hierdoor in feite niet niet bruikbaar, aangezien de vleugel overtrekt bij aanstroomhoeken boven ongeveer 11 graden onder stabiele stroming condities. De match tussen het 'blade-element' model met steady-state coëfficiënten en de kracht metingen is daardoor alleen redelijk bij lage slagfrequenties waar de aanstroomhoeken relatief klein zijn, en het wijkt af bij hogere frequenties waar de hoger verticale vleugelsnelheid zorgt voor grote aanstroomhoeken.

Gebruik van deltavleugel-coëfficiënten resulteert in een min of meer geleidelijke toename van de aerodynamische krachten evenredig met de effectieve hoek van aanstroming, aangezien er praktisch geen conventionele overtrekking plaats vindt bij vleugels in slagvlucht en bij delta vleugels. De kracht-coëfficiënten zijn veel hoger in het 'leading-edge-suction' model en komen goed overeen met andere studies over vleugels in slagvlucht die hoge krachten genereren door de aanwezigheid van LEVs.

**A:**

De krachten van een vleugel in slagvlucht die grote effectieve hoeken van aanstroming doorloopt kan goed gemodelleerd en voorspeld worden door gebruik te maken van een relatief simpele 'blade-element' benadering, bij incorporeren van de theorie over liftontwikkeling bij deltavleugels. Een vereiste voor de toepassing van dit model op vleugels in slagvlucht is dat inderdaad stabiele LEVs aanwezig zijn.

**Hoofdstuk VII: Using bird flight modes to enhance overall flapping wing micro air vehicle performance**

**Q:** Welke voordelen hebben MAVs van het gebruik van vluchtmodellen van vogels?

Slagvlucht MAVs hebben indrukwekkende vooruitgang geboekt in het recente verleden en verschillende zeer capabele en manoeuvreerbare slagvlucht-MAVs hebben het daglicht gezien. Energie-efficiëntie is echter nog steeds 1 van de grootste uitdagingen. MAVs moeten energie-efficiënt en manoeuvreerbaar tegelijkertijd zijn om te kunnen presteren in complexe missies. Vogels kunnen uitzonderlijk goed manoeuvreren en er wordt aangenomen dat ze hoge aerodynamische efficiëntie hebben. Daardoor zijn ze zeer interessante modelorganismen voor hoog-presterende MAVs.

Tijdens zweef en kruisvlucht bij vogels blijft de luchtstroom volledig aanliggen aan de vleugels. Vleugels met een goede L/D zorgen ervoor dat vogels afstand kunnen maken met lage energie-uitgaven. Tijdens langzaam vliegen kunnen vogels profiteren van de extra kracht die vrijkomt door de aanwezigheid van LEVs. Verschillende aerodynamische mechanismen worden daarbij gebruikt tijdens verschillende vlieg-modi, wat een veelbelovend principe kan zijn voor toepassing in MAVs. Het kan resulteren in extra uithoudingsvermogen samen met verbeterde manoeuvreerbaarheid. Biomimetische vleugels zullen een MAV waarschijnlijk in staat stellen om goede prestaties te leveren in beide vlucht modi.

In het kader van dit onderzoek is een slagvlucht-MAV ontworpen met vleugels geïnspireerd door de vleugels van zwaluwen. De vleugels zijn gemaakt van lichtgewicht polystyreen schuim en uitgerust met welving en een ronde voorrand aan de vleugel basis, terwijl verder naar de tip de welving is gereduceerd tot nul en de voorrand is verscherpt, net zoals de vleugelmorfologie van zwaluwen. Een lichtgewicht aandrijfsysteem met een enkele actuator drijft het systeem aan. Het schoudergewricht heeft twee vrijheidsgraden en pro- en supinatie gebeurt passief bij de uiterste slaghoeken. Dit zorgt voor een kleine effectieve hoek van aanstroming tijdens de opslag en een grote effectieve hoek van aanstroming tijdens de neerslag.

De horizontale en verticale krachten en de kinematica van de MAV zijn vastgelegd in een open-uitstroom-windtunnel. In zweefvlucht-modus bereikt de MAV maximale L/D-waarden van 8.6, wat goed overeenkomt met het model-organisme, de zwaluw. In slagvlucht-modus passen de vleugels zich aan aan de veranderingen in vluchtsnelheid en slagfrequentie door passief de hoek van pro- en supinatie te veranderen. Dit limiteert de effectieve hoek van aanstroming onder de 45 graden. Een positieve gemiddelde verticale kracht ('liff') wordt gegeneerd bij alle slagfrequenties, de maximale kracht (ongeveer 96 mN) is gevonden bij de hoogste vrije luchtsnelheid en bij de hoogste slagfrequentie die getest is. De netto horizontale krachten worden gemakkelijk groter dan nul, wat impliceert

dat de stuwkracht groter is dan de totale weerstand. De gemiddelde aerodynamische krachten zijn genoeg om een volledig uitgeruste MAVs in de lucht te houden.

Een stap-voor-stap 'blade-element' analyse laat zien dat de meeste positieve verticale kracht wordt gegenereerd tijdens de neergaande slag en de meeste stuwkracht tijdens de opgaande slag. Deze resultaten laten zien dat in vergelijking met een roterende-vleugel-systeem grotere piekkrachten worden gecreëerd, wat waarschijnlijk zeer voordelig is voor een hoge manoeuvreerbaarheid.

Een slagvlucht-MAV die gebruik maakt van vogelvlucht-modi zal profiteren van de klassieke aerodynamica tijdens kruisvlucht en van de grote en betrouwbare krachten gegenereerd door de LEVs in langzame vlucht. De energie die een slagvlucht-MAVs bij lage snelheid nodig heeft is niet fundamenteel verschillend van die voor meer conventionele draaiende vleugels. Kruisvlucht kan echter veel efficiënter uitvallen, door het gebruik van glijvlucht-aerodynamica en zweefvlucht is de beste vliegstrategie om in de lucht te blijven zonder veel energie te verbruiken. Slagvlucht-MAVs die ook zweefvlucht kunnen uitvoeren zijn potentieel in staat gebruik te maken van de thermische opwaartse luchtstromen of stijgende winden bij stedelijke gebouwen. Mogelijk kan de efficiëntie van kruisvlucht verder verbeterd worden door gebruik te maken van nog een andere vogelvlucht-strategie: verschillende studies hebben laten zien dat vogels energie besparen wanneer ze wisselen tussen slag- en zweefvlucht ('intermittent flight'). Dit kan een interessante strategie zijn voor slagvlucht MAVs.

**A:**

Slagvlucht-MAVs die de mogelijkheid hebben gebruik te maken van verschillende vogelvlucht-modi, kunnen een erg goede oplossing zijn voor het uitvoeren van de taken die van een MAV gevraagd worden, waarbij manoeuvreerbaarheid en energie efficiëntie gecombineerd worden in een enkel apparaat.

In dit proefschrift is de aerodynamica van langzame slagvlucht bij vogels geanalyseerd door gebruik te maken van fysische modellen en temporele 3D stromingsanalyse met een speciaal geoptimaliseerde DPIV methode. Dat de stromingsseparatie een belangrijke rol speelt in de slagvlucht van vogels wordt daarbij onomstotelijk duidelijk. Voorrandwervels (LEVs) ontstaan bij een hoge effectieve hoek van aanstroming en verhogen de circulatie en daarmee de aerodynamische kracht. De intensiteit van de voorrandwervels kan sterk beïnvloed worden door het vleugel ontwerp, zoals welving en dikte. Waarschijnlijk profiteren vogels maar ook vleermuizen van de mogelijkheden om LEVs gecontroleerd te gebruiken. Met het ontstaan en gebruik van LEVs neemt de aerodynamische efficiëntie echter af. De efficiëntie kan worden gemoduleerd en verbeterd door het toepassen vleugel-twist. Dat vermindert echter de grootte van de aerodynamische kracht-coëfficiënten en kan waarschijnlijk niet worden gebruikt in alle vlucht modi. Bij hogere vliegsnelheden hoeven krachtcoëfficiënten eigenlijk niet maximaal te zijn en twist verbeterd dan de  $L/D$  en de aerodynamische efficiëntie langs de vleugel. Bij lage vliegsnelheden zijn maximale krachtcoëfficiënten nodig en efficiëntie wordt van ondergeschikt belang. Een dergelijke wisselwerking tussen efficiëntie en piekkrachten bestaat ook in technische vlucht: luchtvoertuigen met vaste vleugels zijn erg efficiënt in kruisvlucht maar, in tegenstelling tot vogels, genereren ze nauwelijks genoeg lift in langzame vlucht. Draaiende vleugels kunnen genoeg kracht genereren in hangvlucht, maar in tegenstelling tot vogels hebben ze een inferieure efficiëntie bij hogere vliegsnelheden. Slagvlucht micro air vehicles (MAVs) kunnen de voordelen van draaiende en vaste vleugel luchtvoertuigen combineren. Een ontwikkeld prototype en een rekenmethode om aerodynamische krachten te voorspellen door gebruik te maken van de theorie van een deltavliegtuig laten dit beide zien. De MAV is uitgerust met door vogel geïnspireerde vleugels, die goed presteren in zweefvlucht en langzame slagvlucht. De combinatie van vlucht-modi maakt het mogelijk om een MAV te ontwikkelen die uiteindelijk eenzelfde prestatie heeft als een vogel: Exceptionele manoeuvreerbaarheid in combinatie met een uitstekende aerodynamische efficiëntie.



## REFERENCES

---

- Adrian, R. J. (1991):** *Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics*. Annual Review of Fluid Mechanics **23**(1): 261–304.
- Akos, Z.; Nagy, M.; Leven, S. & Vicsek, T. (2010):** *Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles*. Bioinspiration & Biomimetics **5**(4): 045 003.
- Alexander, D. (2004):** *Nature's flyers: Birds, insects, and the biomechanics of flight*. Johns Hopkins University Press.
- Altshuler, D. L.; Dudley, R. & Ellington, C. P. (2004):** *Aerodynamic forces of revolving hummingbird wings and wing models*. Journal of Zoology **264**(04): 327–332.
- Anderson, D. F. & Eberhardt, S. (2001):** *Understanding flight*. McGraw-Hill, New York.
- Anderson, J. D. (2007):** *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, New York, 4th Edition.
- Anderson, J. D. (2008):** *Introduction to Flight*. McGraw-Hill, New York.
- Azuma, A. (2007):** *The biokinetics of flying and swimming*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2nd Edition.
- Bachmann, T. W. (2010):** *Anatomical, Morphometrical and Biomechanical Studies of Barn Owls' and Pigeons' Wings*. Phd thesis, RWTH Aachen.
- Baek, S.; Garcia Bermudez, F. & Fearing, R. (2011):** *Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter*. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2674–2681.
- Barlow, J.; Rae, W. & Pope, A. (1999):** *Low-speed Wind Tunnel Testing*. Wiley-Interscience, New York.
- Barnard, R. H. & Philpott, D. (1997):** *Aircraft flight*. Addison Wesley Longman Limited.
- Bell, J.; Brazinskas, M. & Prior, S. (2011):** *Optimizing Performance Variables for Small Unmanned Aerial Vehicle Co-axial Rotor Systems*. D. Harris, Ed., Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, Vol. 6781 of *Lecture Notes in Computer Science*, 494–503, Springer Berlin Heidelberg.
- Berg, C. & Rayner, J. (1995):** *The moment of inertia of bird wings and the inertial power requirement for flapping flight*. Journal of Experimental Biology **198**(8): 1655–1664.
- Bhowmik, J.; Das, D. & Ghosh, S. K. (2013):** *Aerodynamic modelling of flapping flight using lifting line theory*. International Journal of Intelligent Unmanned Systems **1**(1): 36–61.
- Biesel, W.; Butz, H. & Nachtigall, W. (1985):** *Erste Messungen der Flügelgeometrie bei frei gleitfliegenden Haustauben (Columba livia var. domestica) unter Benutzung neu ausgearbeiteter Verfahren der Windkanaltechnik und der Stereophotogrammetrie*. Biona Report **3**: 139–160.
- Bilo, D. (1972):** *Flugbiophysik von Kleinvögeln*. Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology **76**(4): 426–437.
- Birch, J. M. & Dickinson, M. H. (2001):** *Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings*. Nature **412**(6848): 729–733.
- Birch, J. M.; Dickson, W. B. & Dickinson, M. H. (2004):** *Force production and flow structure of the leading edge vortex on flapping wings at high and low Reynolds numbers*. Journal of Experimental



- Biology **207**(7): 1063–1072.
- Blem, C. R. (2000):** *Energy Balance*. G. C. Whittow, Ed., Sturkie's Avian Physiology (Fifth Edition), 327–341, Academic Press, San Diego.
- Bloch, G.; Kuczaty, J. & Sattelmayer, T. (2014):** *Application of high-speed digital holographic interferometry for the analysis of temperature distributions and velocity fields in subcooled flow boiling*. Experiments in Fluids **55**(2): 1–12.
- Bomphrey, R. (2012):** *Advances in Animal Flight Aerodynamics Through Flow Measurement*. Evolutionary Biology **39**(1): 1–11.
- Bomphrey, R. J.; Lawson, N. J.; Harding, N. J.; Taylor, G. K. & Thomas, A. L. R. (2005):** *The aerodynamics of Manduca sexta: digital particle image velocimetry analysis of the leading-edge vortex*. Journal of Experimental Biology **208**(6): 1079–1094.
- Bomphrey, R. J.; Taylor, G. K.; Lawson, N. J. & Thomas, A. L. (2006):** *Digital particle image velocimetry measurements of the downwash distribution of a desert locust Schistocerca gregaria*. Journal of The Royal Society Interface **3**(7): 311–317.
- Booth-Gauthier, E.; Alcoser, T.; Yang, G. & Dahl, K. (2012):** *Force-Induced Changes in Subnuclear Movement and Rheology*. Biophysical Journal **103**(12): 2423–2431.
- Bronz, M.; Moschetta, J. M.; Brisset, P. & Gorraz, M. (2009):** *Towards a Long Endurance MAV*. International Journal of Micro Air Vehicles **1**(4): 241–254.
- Buchhave, P. (1992):** *Particle image velocimetry - status and trends*. Experimental Thermal and Fluid Science **5**(5): 586–604.
- Cabral, B. & Leedom, L. C. (1993):** *Imaging vector fields using line integral convolution*. Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '93, 263–270, ACM, New York.
- Cabrera, M.; Gollin, D.; Kaitna, R. & Wu, W. (2015):** *Viscous Effects on Granular Mixtures in a Rotating Drum*. W. Wu, Ed., Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, 57–71, Springer International Publishing.
- Cambau, T.; Hure, J. & Marthelot, J. (2013):** *Local stresses in the Janssen granular column*. Physical Review E **88**(2): 022 204.
- Catarino, S. O.; Miranda, J. M. & Minas, G. (2014):** *Effect of  $\beta$ -PVDF Piezoelectric Transducers' Positioning on the Acoustic Streaming Flows*. Micromachines **5**(3): 654–666.
- Chai, P.; Althuler, D. L.; Stephens, D. B. & Dillon, M. E. (1999):** *Maximal Horizontal Flight Performance of Hummingbirds: Effects of Body Mass and Molt*. Physiological and Biochemical Zoology **72**(2): 145–155.
- Chang, Y.-H.; Ting, S.-C.; Su, J.-Y.; Soong, C.-Y. & Yang, J.-T. (2013):** *Ventral-clap modes of hovering passerines*. Physical Review E **87**(2): 022 707.
- Chen, J. & Katz, J. (2005):** *Elimination of peak-locking error in PIV analysis using the correlation mapping method*. Measurement Science and Technology **16**(8): 1605–1618.
- Chen, Z.; Jiang, C. & Nepf, H. (2013):** *Flow adjustment at the leading edge of a submerged aquatic canopy*. Water Resources Research **49**(9): 5537–5551.
- Chen Chen, H. W., Yichao Tang & Wang, Y. (2013):** *A Review of Fabrication Options and Power Electronics for Flapping-Wing Robotic Insects*. International Journal of Advanced Robotic Systems **10**(151): 1–12.

- Culbreth, M.; Jameson, A. & Allaneau, Y. (2011):** *High-Fidelity Optimization of Flapping Airfoils and Wings*. Fluid Dynamics and Co-located Conferences, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Curet, O. M.; Swartz, S. M. & Breuer, K. S. (2013):** *An aeroelastic instability provides a possible basis for the transition from gliding to flapping flight*. Journal of The Royal Society Interface **10**(80): 1–6.
- Datta, S. S.; Chiang, H.; Ramakrishnan, T. S. & Weitz, D. A. (2013):** *Spatial Fluctuations of Fluid Velocities in Flow through a Three-Dimensional Porous Medium*. Phys Rev Lett **111**(6): 064 501.
- David, L.; Jardin, T.; Braud, P. & Farcy, A. (2012):** *Time-resolved scanning tomography PIV measurements around a flapping wing*. Experiments in Fluids **52**(4): 857–864.
- De Croon, G.; De Clercq, K.; Ruijsink, R.; Remes, B. & De Wagter, C. (2009):** *Design, aerodynamics, and vision-based control of the DelFly*. International Journal of Micro Air Vehicles **1**(2): 71–97.
- De Croon, G. C. H. E.; Groen, M. A.; Wagter, C. D.; Remes, B.; Ruijsink, R. & van Oudheusden, B. W. (2012):** *Design, aerodynamics and autonomy of the DelFly*. Bioinspiration & Biomimetics **7**(2): 025 003.
- DeLaurier, J. (1999):** *The development and testing of a full-scale piloted ornithopter*. Canadian aeronautics and space journal **45**(2): 72–82.
- Deng, S.; van Oudheusden, B.; Xiao, T. & Bijl, H. (2012):** *A Computational Study on the Aerodynamic Influence of a Propeller on an MAV by Unstructured Overset Grid Technique and Low Mach Number Preconditioning*. The Open Aerospace Engineering Journal **5**: 11–21.
- D’Errico, J. (2012):** *Inpaint Nans*. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4551>.
- Desbiens, A. & Cutkosky, M. (2009):** *Landing and perching on vertical surfaces with microspines for small unmanned air vehicles*. Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA, 313–327, Springer.
- Di Domenica, A.; Bonini, L.; Calamita, F.; Toscani, G.; Galuppo, C. & Seno, S. (2014):** *Analogue modeling of positive inversion tectonics along differently oriented pre-thrusting normal faults: An application to the Central-Northern Apennines of Italy*. Geological Society of America Bulletin **126**(7-8): 943–955.
- Dickinson, M. (1994):** *The effects of wing rotation on unsteady aerodynamic performance at low Reynolds numbers*. Journal of Experimental Biology **192**(1): 179–206.
- Dickinson, M. H. & Gotz, K. G. (1993):** *Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers*. Journal of Experimental Biology **174**(1): 45–64.
- Dickinson, M. H.; Lehmann, F.-O. & Sane, S. P. (1999):** *Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight*. Science **284**(5422): 1954–1960.
- Dickson, W. B. & Dickinson, M. H. (2004):** *The effect of advance ratio on the aerodynamics of revolving wings*. Journal of Experimental Biology **207**(24): 4269–4281.
- Du, G. & Sun, M. (2008):** *Effects of unsteady deformation of fapping wing on its aerodynamic forces*. Applied Mathematics and Mechanics **29**(6): 731–743.
- Dubief, Y. & Delcayre, F. (2000):** *On coherent-vortex identification in turbulence*. Journal of Turbulence **1**: N11.
- e Silva, M. S.; Stuhmann, B.; Betz, T. & Koenderink, G. H. (2014):** *Time-resolved microrheology of actively remodeling actomyosin networks*. New Journal of Physics **16**(7): 075 010.

- Ellington, C. (1999):** *The novel aerodynamics of insect flight: applications to micro-air vehicles.* Journal of Experimental Biology **202**(23): 3439–3448.
- Ellington, C. (2006):** *Insects versus birds: the great divide.* 44 th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 1–6.
- Ellington, C. P. (1984a):** *The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. I. The Quasi-Steady Analysis.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences **305**(1122): 1–15.
- Ellington, C. P. (1984b):** *The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. III. Kinematics.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences **305**(1122): 41–78.
- Ellington, C. P.; van den Berg, C.; Willmott, A. P. & Thomas, A. L. R. (1996):** *Leading-edge vortices in insect flight.* Nature **384**(6610): 626–630.
- Ennos, A. R. (1988):** *The Importance of Torsion in the Design of Insect Wings.* Journal of Experimental Biology **140**(1): 137–160.
- Ennos, A. R. (1989):** *The Kinematics and Aerodynamics of the Free Flight of some Diptera.* Journal of Experimental Biology **142**(1): 49–85.
- Eppler, R. & Somers, D. M. (1985):** *Airfoil Design for Reynolds Numbers Between 50,000 and 500,000.* Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics, 1–14.
- Eriksson, I.; Powell, J. & Kaplan, A. (2013):** *Melt behavior on the keyhole front during high speed laser welding.* Optics and Lasers in Engineering **51**(0): 735–740.
- FESTO (2011):** *Smartbird.* Techn. rep., FESTO.
- Fincham, A. & Delerce, G. (2000):** *Advanced optimization of correlation imaging velocimetry algorithms.* Experiments in Fluids **29**(1): S013–S022.
- Forliti, D.; Strykowski, P. & Debatin, K. (2000):** *Bias and precision errors of digital particle image velocimetry.* Experiments in Fluids **28**(5): 436–447.
- Friedel, A. & Kähler, C. (2012):** *Measuring and Analyzing the Birds Flight.* Proceedings of the International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition 2012.
- Frigo, M. & Johnson, S. G. (2005):** *The Design and Implementation of FFTW3.* Proceedings of the IEEE **93**(2): 216–231.
- Galinski, C. & Mieloszyk, J. (2012):** *Results of the Gust Resistant MAV Programme.* 28th International Congress of the Aeronautical Sciences 1–10.
- Garcia, D. (2010):** *Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values.* Computational Statistics and Data Analysis **54**(4): 1167–1178.
- Gessow, A. (1948):** *Effect of rotor-blade twist and plan-form taper on helicopter hovering performance,* Technical Note 1542. Technical Note 1542, National Advisory Committee for Aeronautics.
- Gilblom, D. L. & Yoo, S. K. (2004):** *Infrared and ultraviolet imaging with a CMOS sensor having layered photodiodes.* M. M. Blouke; N. Sampat & R. J. Motta, Eds., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 5301, 186–192.
- Giles, M. B. & Cummings, R. M. (1999):** *Wake Integration for Three-Dimensional Flowfield Computations: Theoretical Development.* Journal of Aircraft **36**(2): 357–365.
- Gonzalez, R. C. & Wintz, P. (1987):** *Digital image processing.* Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Grant, I. (1997):** *Particle image velocimetry: A review.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science **211**(1): 55–76.

- Grasmeyer, J. M. & Keennon, M. T. (2001):** *Development of the black widow micro air vehicle.* Progress in Astronautics and Aeronautics **195**: 519–535.
- Green, W. & Oh, P. (2005):** *A MAV that flies like an airplane and hovers like a helicopter.* 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 693–698.
- Green, W. & Oh, P. (2009):** *A hybrid MAV for ingress and egress of urban environments.* IEEE Transactions on Robotics **25**(2): 253–263.
- Guezennec, Y. & Kiritsis, N. (1990):** *Statistical investigation of errors in particle image velocimetry.* Experiments in Fluids **10**(2-3): 138–146.
- Hall, K. C. & Hall, S. R. (2001):** *A rational engineering analysis of the efficiency of flapping flight.* Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, 249–272.
- Haller, G. (2005):** *An objective definition of a vortex.* Journal of Fluid Mechanics **525**: 1–26.
- Hartmann, A., Stamp, M., Kmeth, R., Buchegger, S., Stritzker, B., Saldamli, B., Burgkart, R., Schneider, M. F. & Wixforth, A. (2014):** *A novel tool for dynamic cell adhesion studies - the De-Adhesion Number Investigator DANI.* Lab Chip **14**: 542–546.
- Hedrick, T., Tobalske, B. & Biewener, A. (2002):** *Estimates of circulation and gait change based on a three-dimensional kinematic analysis of flight in cockatiels (Nymphicus hollandicus) and ringed turtle-doves (Streptopelia risoria).* Journal of Experimental Biology **205**(10): 1389–1409.
- Heller, E., Kumar, K., Grill, S. & Fuchs, E. (2014):** *Forces Generated by Cell Intercalation Tow Epidermal Sheets in Mammalian Tissue Morphogenesis.* Developmental Cell **28**(6): 617 – 632.
- Henningsson, P. & Bomphrey, R. J. (2011):** *Time-varying span efficiency through the wingbeat of desert locusts.* Journal of The Royal Society Interface **9**: 1177–1186.
- Henningsson, P. & Hedenstroem, A. (2011):** *Aerodynamics of gliding flight in common swifts.* Journal of Experimental Biology **214**(3): 382–393.
- Henningsson, P., Spedding, G. R. & Hedenstroem, A. (2008):** *Vortex wake and flight kinematics of a swift in cruising flight in a wind tunnel.* Journal of Experimental Biology **211**(5): 717–730.
- Herzog, K. (1968):** *Anatomie und Flugbiologie der Vögel.* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Ho, S., Nassef, H., Pornsinsirak, N., Tai, Y.-C. & Ho, C.-M. (2003):** *Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers.* Progress in Aerospace Sciences **39**(8): 635–681.
- Hu, H., Kumar, A. G., Abate, G. & Albertani, R. (2010):** *An experimental investigation on the aerodynamic performances of flexible membrane wings in flapping flight.* Aerospace Science and Technology **14**(8): 575–586.
- Huang, H., Dabiri, D. & Gharib, M. (1997):** *On errors of digital particle image velocimetry.* Measurement Science and Technology **8**(12): 1427–1440.
- Huang, H., Fiedler, H. & Wang, J. (1993a):** *Limitation and improvement of PIV, Part I: Limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns.* Experiments in Fluids **15**(3): 168–174.
- Huang, H., Fiedler, H. & Wang, J. (1993b):** *Limitation and improvement of PIV, Part II: Particle image distortion, a novel technique.* Experiments in Fluids **15**(4-5): 263–273.
- Hubel, T. (2006):** *Untersuchungen zur instationären Aerodynamik an einem vogelähnlichen Flügelschlagmodell.* Phd thesis, Technische Universität Darmstadt.
- Hubel, T. Y. & Tropea, C. (2010):** *The importance of leading edge vortices under simplified flapping flight conditions at the size scale of birds.* Journal of Experimental Biology **213**(11): 1930–1939.

- Hunt, J.; Wray, A. & Moin, P. (1988):** *Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows.* Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases, 193–208.
- Isogai, K.; Shinmoto, Y. & Watanabe, Y. (1999):** *Effects of Dynamic Stall on Propulsive Efficiency and Thrust of a Flapping Wing.* AIAA 37: 1145–1151.
- Itasse, M.; Moschetta, J.-M.; Ameho, Y. & Carr, R. (2011):** *Equilibrium Transition Study for a Hybrid MAV.* International Journal of Micro Air Vehicles 3(4): 229–246.
- Jalalisendi, M.; Panciroli, R.; Cha, Y. & Porfiri, M. (2014):** *A particle image velocimetry study of the flow physics generated by a thin lamina oscillating in a viscous fluid.* Journal of Applied Physics 115(5): 054901.
- Jambunathan, K.; Ju, X. Y.; Dobbins, B. N. & Ashforth-Frost, S. (1995):** *An improved cross correlation technique for particle image velocimetry.* Measurement Science and Technology 6(5): 507–514.
- Jiang, Y.-J. & Towhata, I. (2012):** *Experimental Study of Dry Granular Flow and Impact Behavior Against a Rigid Retaining Wall.* Rock Mechanics and Rock Engineering 1–17.
- Jones, K.; Bradshaw, C.; Papadopoulos, J. & Platzer, M. (2005):** *Bio-inspired design of flapping-wing micro air vehicles.* Aeronautical Journal 109(1098): 385–394.
- Katz, S. L. & Gosline, J. M. (1993):** *Ontogenetic scaling of jump performance in the african desert locust (Schistocerca gregaria).* The Journal of Experimental Biology 177(1): 81–111.
- Kawamura, Y.; Souda, S.; Nishimoto, S. & Ellington, C. (2008):** *Clapping-wing Micro Air Vehicle of Insect Size.* N. Kato & S. Kamimura, Eds., Bio-mechanisms of Swimming and Flying, 319–330, Springer Japan.
- Keane, R. D. & Adrian, R. J. (1990):** *Optimization of particle image velocimeters. I. Double pulsed systems.* Measurement Science and Technology 1(11): 1202–1215.
- Keane, R. D. & Adrian, R. J. (1992):** *Theory of cross-correlation analysis of PIV images.* Applied Scientific Research 49(3): 191–215.
- Kesel, A. (2000):** *Aerodynamic characteristics of dragonfly wing sections compared with technical aerofoils.* Journal of Experimental Biology 203(20): 3125–3135.
- Kesel, A.; Junge, M. & Nachtigall, W. (1999):** *Einführung in die angewandte Statistik für Biowissenschaftler.* Birkhäuser Verlag.
- Kim, D.-K.; Han, J.-H. & Kwon, K.-J. (2009):** *Wind tunnel tests for a flapping wing model with a changeable camber using macro-fiber composite actuators.* Smart Materials and Structures 18(2): 024 008.
- Kokshaysky, N. V. (1979):** *Tracing the wake of a flying bird.* Nature 279(5709): 146–148.
- Kroo, I. & Kunz, P. (2001):** *Mesoscale Flight and Miniature Rotorcraft Development.* Fixed and flapping wing aerodynamics for micro air vehicle applications 195: 249–272.
- Kunz, P. (2003):** *Aerodynamics and design for ultra-low Reynolds number flight.* Phd thesis, Stanford University.
- Kunz, P. J. & Kroo, I. (2001):** *Analysis and Design of Airfoils for Use at Ultra-Low Reynolds Numbers.* Fixed and flapping wing aerodynamics for micro air vehicle applications 195: 35–59.
- Ladson, C. L.; Brooks, C. W.; Hill, A. S. & Sproles, D. W. (1996):** *Computer Program To Obtain Ordinates for NACA Airfoils.* NASA Technical Memorandum 4741.
- Lehmann, F.-O. (2004):** *The mechanisms of lift enhancement in insect flight.* Naturwissenschaften 91(3): 101–122.

- Leishman, J. G. (2000):** Principles of Helicopter Aerodynamics. Cambridge University Press.
- Lentink, D. & Biewener, A. A. (2010):** *Nature-inspired flight - beyond the leap.* *Bioinspiration & Biomimetics* 5(4): 040 201.
- Lentink, D. & Dickinson, M. H. (2009):** *Rotational accelerations stabilize leading edge vortices on revolving fly wings.* *Journal of Experimental Biology* 212(16): 2705–2719.
- Lentink, D.; Jongerius, S. R. & Bradshaw, N. L. (2009):** *The Scalable Design of Flapping Micro-Air Vehicles Inspired by Insect Flight.* *Flying Insects and Robots*, 185–205, Springer.
- Lentink, D.; Muller, U. K.; Stamhuis, E. J.; de Kat, R.; van Gestel, W.; Veldhuis, L. L. M.; Henningsson, P.; Hedenstroem, A.; Videler, J. J. & van Leeuwen, J. L. (2007):** *How swifts control their glide performance with morphing wings.* *Nature* 446(7139): 1082–1085.
- Leong, T.; Collis, J.; Manasseh, R.; Ooi, A.; Novell, A.; Bouakaz, A.; Ashokkumar, M. & Kentish, S. (2011):** *The Role of Surfactant Headgroup, Chain Length, and Cavitation Microstreaming on the Growth of Bubbles by Rectified Diffusion.* *The Journal of Physical Chemistry* 115(49): 24 310–24 316.
- Lian, Y. & Shyy, W. (2007):** *Aerodynamics of Low Reynolds Number Plunging Airfoil under Gusty Environment.* 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada.
- Liechti, F.; Witvliet, W.; Weber, R. & Bachler, E. (2013):** *First evidence of a 200-day non-stop flight in a bird.* *Nature Communications* 4.
- Lilienthal, O. (1889):** *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst.* R. Gaertners Verlagsbuchhandlung.
- Lima, S. L. & Dill, L. M. (1990):** *Behavioral decisions made under the risk of predation: a review and prospectus.* *Canadian Journal of Zoology* 68(4): 619–640.
- Lin, C.-S.; Hwu, C. & Young, W.-B. (2006):** *The thrust and lift of an ornithopter's membrane wings with simple flapping motion.* *Aerospace Science and Technology* 10(2): 111–119.
- Lipson, H. (2011):** *Untethered Hovering Flapping Flight of a 3D-Printed Mechanical Insect.* *Artificial Life* 17(2): 73–86.
- Liu, H.; Ellington, C. P.; Kawachi, K.; Van Den Berg, C. & Willmott, A. P. (1998):** *A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering.* *Journal of Experimental Biology* 201(4): 461–477.
- Liu, H. & Kawachi, K. (1998):** *A Numerical Study of Insect Flight.* *Journal of Computational Physics* 146(1): 124–156.
- Liu, H. & Kawachi, K. (2001):** *Leading-Edge Vortices of Flapping and Rotary Wings at Low Reynolds Number.* *Fixed and flapping wing aerodynamics for micro air vehicle applications* 195: 275–285.
- Liu, T.; Kuykendoll, K.; Rhew, R. & Jones, S. (2004):** *Avian wings.* 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Liu, Z. & Moschetta, J.-M. (2009):** *Rotary vs. Flapping-Wing Nano Air Vehicles: Comparing Hovering Power.* *Proceedings of the European Micro Aerial Vehicle Conference and Flight Competition 2009.*
- Lourenco, L. & Krothapalli, A. (1995):** *On the accuracy of velocity and vorticity measurements with PIV.* *Experiments in Fluids* 18(6): 421–428.
- Lozán, J. L. & Kausch, H. (1998):** *Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler.* Parey Buchverlag.



- Lu, Y. & Shen, G. X. (2008):** *Three-dimensional flow structures and evolution of the leading-edge vortices on a flapping wing.* Journal of Experimental Biology **211**(8): 1221–1230.
- Marden, J. H. (1987):** *Maximum Lift Production During Takeoff in Flying Animals.* Journal of Experimental Biology **130**(1): 235–258.
- Maxwell, A. D.; Park, S.; Vaughan, B. L.; Cain, C. A.; Grotberg, J. B. & Xu, Z. (2014):** *Trapping of embolic particles in a vessel phantom by cavitation-enhanced acoustic streaming.* Physics in Medicine and Biology **59**(17): 4927.
- Maxworthy, T. (1979):** *Experiments on the Weis-Fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight. Part 1. Dynamics of the ‘fling’.* Journal of Fluid Mechanics **93**(01): 47–63.
- McAlister, K. W.; Schuler, C. A.; Branum, L. & Wu, J. C. (1995):** *3-D Wake Measurements Near a Hovering Rotor for Determining Profile and Induced Drag.* NASA Technical Paper 3577 .
- McGahan, J. (1973):** *Flapping Flight of the Andean Condor in Nature.* Journal of Experimental Biology **58**(1): 239–253.
- Melling, A. (1997):** *Tracer particles and seeding for particle image velocimetry.* Measurement Science and Technology **8**(12): 1406–1416.
- Melnikov, S.; Hoeltzel, A.; Seidel-Morgenstern, A. & Tallarek, U. (2014):** *A Molecular Dynamics Study on the Retention Mechanism in Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography.* Chemie Ingenieur Technik **86**(9): 1631–1632.
- Menditto, A.; Patriarca, M. & Magnusson, B. (2007):** *Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision.* Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement **12**(1): 45–47.
- Micron Technology (2004):** *MT9M413, 1.3-Megapixel CMOS Active-Pixel Digital Image Sensor.* [http://www.pco.de/fileadmin/user\\_upload/db/download/mt9m413c36stc.pdf](http://www.pco.de/fileadmin/user_upload/db/download/mt9m413c36stc.pdf).
- Miller, J.; Michael, J.; Slipchenko, M.; Roy, S.; Meyer, T. & Gord, J. (2013):** *Simultaneous high-speed planar imaging of mixture fraction and velocity using a burst-mode laser.* Applied Physics B **113**(1): 93–97.
- Moschetta, J. & Shkarayev, S. (2008):** *On Fixed-Wing Micro-Air Vehicles with Hovering Capabilities.* 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit .
- Mueller, D.; Bruck, H. & Gupta, S. (2009):** *Measurement of Thrust and Lift Forces Associated With Drag of Compliant Flapping Wing for Micro Air Vehicles Using a New Test Stand Design.* Experimental Mechanics **50**(6): 725–735.
- Mueller, T. J. & DeLaurier, J. D. (2001):** *An Overview of Micro Air Vehicle Aerodynamics.* Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, 249–272.
- Muijres, F.; Spedding, G.; Winter, Y. & Hedenstroem, A. (2011):** *Actuator disk model and span efficiency of flapping flight in bats based on time-resolved PIV measurements.* Experiments in Fluids **1**–15.
- Muijres, F. T.; Henningsson, P.; Stuijver, M. & Hedenstroem, A. (2012a):** *Aerodynamic flight performance in flap-gliding birds and bats.* Journal of Theoretical Biology **306**: 120–128.
- Muijres, F. T.; Johansson, L. C.; Barfield, R.; Wolf, M.; Spedding, G. R. & Hedenstroem, A. (2008):** *Leading-Edge Vortex Improves Lift in Slow-Flying Bats.* Science **319**(5867): 1250–1253.
- Muijres, F. T.; Johansson, L. C.; Bowlin, M. S.; Winter, Y. & Hedenstroem, A. (2012b):** *Comparing Aerodynamic Efficiency in Birds and Bats Suggests Better Flight Performance in Birds.* PLoS

ONE 7(5): e37 335.

- Muijres, F. T.; Johansson, L. C. & Hedenstroem, A. (2012c):** *Leading edge vortex in a slow-flying passerine.* *Biology Letters* 8(4): 554–557.
- Nachtigall, W. (1985):** Warum die Vögel fliegen. Rasch und Röhring, Hamburg, Zürich.
- Nachtigall, W. & Rothe, H.-J. (1982):** *Nachweis eines clap-and-ting-Mechanismus bei der im Windkanal fliegenden Haustaube.* *Journal für Ornithologie* 123(4): 439–443.
- Nachtigall, W. & Wieser, J. (1966):** *Profilmessungen am Taubenflügel.* *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 52(4): 333–346.
- Nakata, T.; Liu, H.; Tanaka, Y.; Nishihashi, N.; Wang, X. & Sato, A. (2011):** *Aerodynamics of a bio-inspired flexible flapping-wing micro air vehicle.* *Bioinspiration & Biomimetics* 6(4): 045 002.
- Neitzke, K.-P. (2013):** *Rotary Wing Micro Air Vehicle Endurance.* Proceedings of the International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition IMAV 2013.
- Nobach, H. & Honkanen, M. (2005):** *Two-dimensional Gaussian regression for sub-pixel displacement estimation in particle image velocimetry or particle position estimation in particle tracking velocimetry.* *Experiments in Fluids* 38(4): 511–515.
- Nogueira, J.; Lecuona, A. & Rodriguez, P. A. (1997):** *Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data.* *Measurement Science and Technology* 8(12): 1493.
- Nonami, K. (2007):** *Prospect and Recent Research & Development for Civil Use Autonomous Unmanned Aircraft as UAV and MAV.* *Journal of System Design and Dynamics* 1(2): 120–128.
- Norberg, U. M. (1990):** *Vertebrate Flight.* Springer-Verlag.
- Nudds, R. L.; Taylor, G. K. & Thomas, A. L. R. (2004):** *Tuning of Strouhal number for high propulsive efficiency accurately predicts how wingbeat frequency and stroke amplitude relate and scale with size and flight speed in birds.* Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences 271(1552): 2071–2076.
- Office of the US Secretary of Defense (2005):** *Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030.* Techn. rep., Office of the US Secretary of Defense.
- Okamoto, K.; Nishio, S.; Saga, T. & Kobayashi, T. (2000):** *Standard images for particle-image velocimetry.* *Measurement Science and Technology* 11(6): 685–691.
- Okamoto, M.; Yasuda, K. & Azuma, A. (1996):** *Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly.* *Journal of Experimental Biology* 199(2): 281–294.
- Okrent, M. (2004):** *Civil UAV Activity Within the Framework of European Commission Research.* AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference, Workshop and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Ozen, C. & Rockwell, D. (2012):** *Flow structure on a rotating plate.* *Experiments in Fluids* 52(1): 207–223.
- Panciroli, R. & Porfiri, M. (2013):** *Evaluation of the pressure field on a rigid body entering a quiescent fluid through particle image velocimetry.* *Experiments in Fluids* 54(12): 1–13.
- Park, J.-H.; Jang, S.-M.; Maeng, J.-S. & Han, S.-Y. (2012):** *A modeling approach to energy savings of flying Canada geese using computational fluid dynamics.* *Journal of Theoretical Biology* 320: 76–85.
- Pelletier, A. & Mueller, T. J. (2000):** *Low Reynolds Number Aerodynamics of Low-Aspect-Ratio, Thin/Flat/Cambered-Plate Wings.* *Journal of Aircraft* 37(5): 825–832.
- Pennycuik, C. J. (1969):** *The mechanics of Bird Migration.* *Ibis* 111(4): 525–556.



- Perez-Arancibia, N. O.; Ma, K. Y.; Galloway, K. C.; Greenberg, J. D. & Wood, R. J. (2011):** *First controlled vertical flight of a biologically inspired microrobot.* *Bioinspiration & Biomimetics* **6**(3): 036 009.
- Pesavento, U. & Wang, Z. J. (2009):** *Flapping Wing Flight Can Save Aerodynamic Power Compared to Steady Flight.* *Physical Review Letters* **103**(11): 118 102.
- Pinder, S. (2008):** *Control Strategy for a Four-Rotor VTOL UAV.* 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- Pines, D. J. & Bohorquez, F. (2006):** *Challenges Facing Future Micro-Air-Vehicle Development.* *Journal of Aircraft* **43**(2): 290–305.
- Piro, V.; Piro, N. & Piro, O. (2012):** *Characterization of intraventricular blood flow using a microbubble-contrast tracking echo-PIV technique.* *Journal of the American College of Cardiology* **59**(13S1): E1139–E1139.
- Pizer, S. M.; Amburn, E. P.; Austin, J. D.; Cromartie, R.; Geselowitz, A.; Greer, T.; ter Haar Romeny, B.; Zimmerman, J. B. & Zuiderveld, K. (1987):** *Adaptive histogram equalization and its variations.* *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **39**(3): 355–368.
- Poelma, C.; Dickson, W. & Dickinson, M. (2006):** *Time-resolved reconstruction of the full velocity field around a dynamically-scaled flapping wing.* *Experiments in Fluids* **41**(2): 213–225.
- Polhamus, E. C. (1966):** *A concept of the vortex lift of sharp-edge delta wings based on a leading-edge-suction analogy.* NASA Technical note **3767**.
- Polhamus, E. C. (1968):** *Application of the leading-edge-suction analogy of vortex lift to the drag due to lift of sharp-edge delta wings.* NASA Technical note **4739**.
- Polhamus, E. C. (1971):** *Predictions of vortex-lift characteristics by a leading-edge suction analogy.* *Journal of Aircraft* **8**(4): 193–199.
- Post, M. (2004):** Plasma actuators for separation control on stationary and oscillating airfoils. Phd thesis, University of Notre Dame.
- Raffel, M.; Willert, C.; Wereley, S. & Kompenhans, J. (2007):** *Particle Image Velocimetry.* Springer, 2nd Edition.
- Ramesh, K.; Ke, J.; Gopalarathnam, A. & Edwards, J. R. (2012):** *Effect of Airfoil Shape and Reynolds Number on Leading Edge Vortex Shedding in Unsteady Flows.* 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference, New Orleans, Louisiana .
- Rayner, J. M. V. (1979):** *A New Approach to Animal Flight Mechanics.* *Journal of Experimental Biology* **80**(1): 17–54.
- Rayner, J. M. V. (1985):** *Bounding and undulating flight in birds.* *Journal of Theoretical Biology* **117**(1): 47–77.
- Rayner, J. M. V. (2001):** *Thrust and Drag in Flying Birds: Applications to Birdlike Micro Air Vehicles.* Fixed and flapping wing aerodynamics for micro air vehicle applications **195**: 217–229.
- Rayner, J. M. V.; Viscardi, P. W.; Ward, S. & Speakman, J. R. (2001):** *Aerodynamics and Energetics of Intermittent Flight in Birds.* *American Zoologist* **41**(2): 188–204.
- Rival, D.; Kriegseis, J.; Schaub, P.; Widmann, A. & Tropea, C. (2014):** *Characteristic length scales for vortex detachment on plunging profiles with varying leading-edge geometry.* *Experiments in Fluids* **55**(1): 1–8.
- Roberts, J.; Cory, R. & Tedrake, R. (2009):** *On the controllability of fixed-wing perching.* American Control Conference, 2009, 2018–2023.

- Robinson, S. K.; Kline, S. & Spalart, P. (1989):** *A review of quasi-coherent structures in a numerically simulated turbulent boundary layer.* Techn. rep., NASA TM-102191.
- Roesgen, T. (2003):** *Optimal subpixel interpolation in particle image velocimetry.* Experiments in Fluids **35**(3): 252–256.
- Ros, I. (2007):** Bird flight and LEVs. Master thesis, Rijksuniversiteit Groningen.
- Rosén, M.; Spedding, G. & Hedenstroem, A. (2004):** *The relationship between wingbeat kinematics and vortex wake of a thrush nightingale.* Journal of Experimental Biology **207**(24): 4255–4268.
- Roy, A.; Metaxas, A. & Ross, T. (2012):** *Swimming patterns of larval *Strongylocentrotus droebachiensis* in turbulence in the laboratory.* Marine Ecology Progress Series **453**: 117–127.
- Ryerson, W. G. & Schwenk, K. (2012):** *A simple, inexpensive system for digital particle image velocimetry (DPIV) in biomechanics.* Journal of Experimental Zoology **317**(2): 127–140.
- Sanchez, T.; Chen, D. T. N.; DeCamp, S. J.; Heymann, M. & Dogic, Z. (2012):** *Spontaneous motion in hierarchically assembled active matter.* Nature **491**(7424): 431–434.
- Sarris, Z. (2001):** *Survey of UAV applications in civil markets.* The 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation.
- Savile, D. B. O. (1950):** *The Flight Mechanism of Swifts and Hummingbirds.* The Auk **67**(4): 499–504.
- Scarano, F. & Riethmuller, M. L. (1999):** *Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset.* Experiments in Fluids **26**(6): 513–523.
- Scarano, F. & Riethmuller, M. L. (2000):** *Advances in iterative multigrid PIV image processing.* Experiments in Fluids **29**(0): S051–S060.
- Schempp-Hirth Flugzeugbau GmbH (2007):** *Nimbus-4 Datasheet.* [http://www.schempp-hirth.com/fileadmin/Pdfs/intern\\_pdf/N-4-Pros-07.pdf](http://www.schempp-hirth.com/fileadmin/Pdfs/intern_pdf/N-4-Pros-07.pdf).
- Schlüsler, R.; Czarske, J. & Fischer, A. (2014):** *Uncertainty of flow velocity measurements due to refractive index fluctuations.* Optics and Lasers in Engineering **54**(0): 93–104.
- Selig, M. S.; Gopalarathnam, A.; Giguere, P. & Lyon, C. (2001):** *Systematic airfoil design studies at low Reynolds numbers.* Fixed and flapping wing aerodynamics for micro air vehicle applications **195**: 143–167.
- Senatore, C.; Wulfmeier, M.; Vlahinić, I.; Andrade, J. & Iagnemma, K. (2013):** *Design and implementation of a particle image velocimetry method for analysis of running gear-soil interaction.* Journal of Terramechanics **50**(5–6): 311–326.
- Serokhvostov, S. V. & Pushchin, N. A. (2012):** *Direct Experimental Comparison of Flapping Wing and Fixed Wing Efficiency.* Proceedings of the International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition 2012.
- Shavit, U.; Lowe, R. & Steinbuck, J. (2007):** *Intensity Capping: a simple method to improve cross-correlation PIV results.* Experiments in Fluids **42**(2): 225–240.
- Shi, Q.; Ghosh, R. P.; Engelke, H.; Rycroft, C. H.; Cassereau, L.; Sethian, J. A.; Weaver, V. M. & Liphardt, J. T. (2014):** *Rapid disorganization of mechanically interacting systems of mammary acini.* Proceedings of the National Academy of Sciences **111**(2): 658–663.
- Shkarayev, S. & Moschetta, J. M. (2007):** *Aerodynamic Design of VTOL Micro Air Vehicles.* 3rd US-European Competition and Workshop on Micro Air Vehicle Systems & European Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition .
- Shyy, W.; Berg, M. & Ljungqvist, D. (1999a):** *Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles.* Progress in Aerospace Sciences **35**(5): 455–505.

- Shyy, W.; Klevebring, F.; Nilsson, M.; Sloan, J.; Carroll, B. & Fuentes, C. (1999b): *Rigid and Flexible Low Reynolds Number Airfoils*. *Journal of Aircraft* **36**(3): 523–529.
- Shyy, W.; Lian, Y.; Tang, J.; Viieru, D. & Liu, H. (2008): *Aerodynamics of low Reynolds number flyers*. Cambridge University Press, New York.
- Simmons, C. S.; Ribeiro, A. & Pruitt, B. L. (2013): *Formation of composite polyacrylamide and silicone substrates for independent control of stiffness and strain*. *Lab Chip* **13**: 646–649.
- Singh, B.; Ramasamy, M.; Chopra, I. & Leishman, J. (2005): *Experimental studies on insect-based flapping wings for micro hovering air vehicles*. 46th annual structural dynamics and materials conference 2005, Austin, Texas **20742**.
- Sipos, O.; Nagy, K. & Galajda, P. (2014): *Patterns of Collective Bacterial Motion in Microfluidic Devices*. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* **28**(2): 233–240.
- Somps, C. & Luttgies, M. (1985): *Dragonfly Flight: Novel Uses of Unsteady Separated Flows*. *Science* **228**(4705): 1326–1329.
- Soria, J. (1996): *An investigation of the near wake of a circular cylinder using a video-based digital cross-correlation particle image velocimetry technique*. *Experimental Thermal and Fluid Science* **12**(2): 221–233.
- Spedding, G. R. (1993): *On the significance of unsteady effects in the aerodynamic performance of flying animals*. *Contemporary Mathematics* **141**: 401–419.
- Spedding, G. R.; Rayner, J. M. & Pennycuik, C. J. (1984): *Momentum and Energy in the Wake of a Pigeon (Columba Livia) in Slow Flight*. *Journal of Experimental Biology* **111**(1): 81–102.
- Srygley, R. B. & Thomas, A. L. R. (2002): *Unconventional lift-generating mechanisms in free-flying butterflies*. *Nature* **420**(6916): 660–664.
- Stamhuis, E. J. (2006): *Basics and principles of particle image velocimetry (PIV) for mapping biogenic and biologically relevant flows*. *Aquatic Ecology* **40**(4): 463–479.
- Stamhuis, E. J. & Nauwelaerts, S. (2005): *Propulsive force calculations in swimming frogs II. Application of a vortex ring model to DPIV data*. *Journal of Experimental Biology* **208**(8): 1445–1451.
- Stamhuis, E. J.; Thielicke, W.; Ros, I. G. & Videler, J. J. (2012): *Unsteady aerodynamics essential during low speed flapping flight in bird*, submitted for publication.
- Stamhuis, E. J. & Videler, J. J. (1995): *Quantitative flow analysis around aquatic animals using laser sheet particle image velocimetry*. *Journal of Experimental Biology* **198**(2): 283–294.
- Stepniewski, W. Z. & Keys, C. N. (1984): *Rotary-Wing Aerodynamics*. Dover Publications, Inc., New York.
- Sun, C.-I. & Hsiao, T.-h. (2013): *On the background design for microscale background-oriented schlieren measurements of microfluidic mixing*. *Microfluidics and Nanofluidics* 1–17.
- Sunada, S. & Tsuji, K. (2012): *Advantages of a Flapping Wing over a Propeller*. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Swaddle, J. P. & Lockwood, R. (1998): *Morphological Adaptations to Predation Risk in Passerines*. *Journal of Avian Biology* **29**(2): 172–176.
- Swaddle, J. P. & Witter, M. S. (1997): *The effects of molt on the flight performance, body mass, and behavior of European starlings (Sturnus vulgaris): an experimental approach*. *Canadian Journal of Zoology* **75**(7): 1135–1146.

- Swartz, S. M.; Groves, M. S.; Kim, H. D. & Walsh, W. R. (1996):** *Mechanical properties of bat wing membrane skin.* *Journal of Zoology* **239**(2): 357–378.
- Taddeucci, J.; Valentine, G. A.; Sonder, I.; White, J. D. L.; Ross, P.-S. & Scarlato, P. (2013):** *The effect of pre-existing craters on the initial development of explosive volcanic eruptions: an experimental investigation.* *Geophysical Research Letters* **40**(3): 507–510.
- Takahashi, H.; Aoyama, Y.; Ohsawa, K.; Tanaka, H.; Iwase, E.; Matsumoto, K. & Shimoyama, I. (2010):** *Differential pressure measurement using a free-flying insect-like ornithopter with an MEMS sensor.* *Bioinspiration & Biomimetics* **5**(3): 036 005.
- Tanaka, H. & Shimoyama, I. (2010):** *Forward flight of swallowtail butterfly with simple flapping motion.* *Bioinspiration & Biomimetics* **5**(2): 026 003.
- Tarashima, S.; Tange, M.; Someya, S. & Okamoto, K. (2010):** *GPU accelerated direct cross-correlation PIV with window deformation.* *Proceedings 15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics.*
- Taylor, G. K.; Nudds, R. L. & Thomas, A. L. R. (2003):** *Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency.* *Nature* **425**(6959): 707–711.
- Thielicke, W. (2007):** *Flow Patterns on a Flapping Swift-like Wing Model.* Master thesis, Technische Universität Darmstadt & Rijksuniversiteit Groningen.
- Thielicke, W.; Kesel, A. B. & Stamhuis, E. J. (2011):** *Reliable Force Predictions for a Flapping-wing Micro Air Vehicle: A "Vortex-lift" Approach.* *International Journal of Micro Air Vehicles* **3**(4): 201–216.
- Thomas, A. L. R. & Hedenstroem, A. (1998):** *The Optimum Flight Speeds of Flying Animals.* *Journal of Avian Biology* **29**(4): 469–477.
- Thomas, A. L. R.; Taylor, G. K.; Srygley, R. B.; Nudds, R. L. & Bomphrey, R. J. (2004):** *Dragonfly flight: free-flight and tethered flow visualizations reveal a diverse array of unsteady lift-generating mechanisms, controlled primarily via angle of attack.* *Journal of Experimental Biology* **207**(24): 4299–4323.
- Tian, H. (2000):** *Noise analysis in CMOS image sensors.* Phd thesis, Stanford University.
- Tobalske, B. W. (2001):** *Morphology, Velocity, and Intermittent Flight in Birds.* *American Zoologist* **41**(2): 177–187.
- Todaro, M. C.; Choudhuri, I.; Belohlavek, M.; Jahangir, A.; Carerj, S.; Oreto, L. & Khandheria, B. K. (2012):** *New echocardiographic techniques for evaluation of left atrial mechanics.* *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging* **13**(12): 973–984.
- Torres, G. E. & Mueller, T. J. (2001):** *Aerodynamic Characteristics of Low Aspect Ratio Wings at Low Reynolds Numbers.* *Fixed and flapping wing aerodynamics for micro air vehicle applications* **195**: 115–141.
- Trojanowski, N. F.; Padovan-Merhar, O.; Raizen, D. M. & Fang-Yen, C. (2014):** *Neural and genetic degeneracy underlies *Caenorhabditis elegans* feeding behavior.* *Journal of Neurophysiology* .
- Tucker, V. A. (1970):** *Energetic cost of locomotion in animals.* *Comparative Biochemistry and Physiology* **34**(4): 841–846.
- Tucker, V. A. (1990):** *Body drag, feather drag and interference drag of the mounting strut in a peregrine falcon, *Falco Peregrinus*.* *Journal of Experimental Biology* **149**(1): 449–468.

- Tucker, V. A. (1991):** *The Effect of Molting on the Gliding Performance of a Harris' Hawk (Parabuteo unicinctus)*. *The Auk* **108**(1): 108–113.
- Unal, M.; Lin, J.-C. & Rockwell, D. (1997):** *Force prediction by PIV imaging: A momentum-based approach*. *Journal of Fluids and Structures* **11**(8): 965–971.
- Usherwood, J. R. (2009):** *Inertia may limit efficiency of slow flapping flight, but mayflies show a strategy for reducing the power requirements of loiter*. *Bioinspiration & Biomimetics* **4**(1): 015 003.
- Usherwood, J. R. & Ellington, C. P. (2002a):** *The aerodynamics of revolving wings. I. Model hawkmoth wings*. *Journal of Experimental Biology* **205**(11): 1547–1564.
- Usherwood, J. R. & Ellington, C. P. (2002b):** *The aerodynamics of revolving wings. II. Propeller force coefficients from mayfly to quail*. *Journal of Experimental Biology* **205**(11): 1565–1576.
- van Breugel, F.; Regan, W. & Lipson, H. (2008):** *From insects to machines*. *Robotics & Automation Magazine* **15**(4): 68–74.
- van den Berg, C. & Ellington, C. P. (1997):** *The three-dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **352**(1351): 329–340.
- van den Hout, P. J.; Mathot, K. J.; Maas, L. R. & Piersma, T. (2010):** *Predator escape tactics in birds: linking ecology and aerodynamics*. *Behavioral Ecology* **21**(1): 16–25.
- Videler, J. J. (2005):** *Avian Flight*. Oxford University Press.
- Videler, J. J.; Stamhuis, E. J. & Povel, G. D. E. (2004):** *Leading-Edge Vortex Lifts Swifts*. *Science* **306**(5703): 1960–1962.
- Viieru, D.; Tang, J.; Lian, Y.; Liu, H. & Shyy, W. (2006):** *Flapping and Flexible Wing Aerodynamics of Low Reynolds Number Flight Vehicles*. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada.
- Vogel, S. (1994):** *Life in Moving Fluids*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- von Busse, R.; Swartz, S. M. & Voigt, C. C. (2013):** *Flight metabolism in relation to speed in Chiroptera: Testing the U-shape paradigm in the short-tailed fruit bat *Carollia perspicillata**. *The Journal of Experimental Biology* **216**: 2073–2080.
- Walker, J. A. (2002):** *Rotational lift: something different or more of the same?* *Journal of Experimental Biology* **205**(24): 3783–3792.
- Walker, S. M.; Thomas, A. L. R. & Taylor, G. K. (2009):** *Deformable wing kinematics in the desert locust: how and why do camber, twist and topography vary through the stroke?* *Journal of The Royal Society Interface* **6**(38): 735–747.
- Wang, C.; Qiu, S. & Eliasson, V. (2013):** *Quantitative Pressure Measurement of Shock Waves in Water Using a Schlieren-Based Visualization Technique*. *Experimental Techniques* **Early View**.
- Wang, Z. J. (2004):** *The role of drag in insect hovering*. *Journal of Experimental Biology* **207**(23): 4147–4155.
- Wang, Z. J.; Birch, J. M. & Dickinson, M. H. (2004):** *Unsteady forces and flows in low Reynolds number hovering flight: two-dimensional computations vs robotic wing experiments*. *Journal of Experimental Biology* **207**(3): 449–460.
- Warrick, D. R.; Bundle, M. W. & Dial, K. P. (2002):** *Bird Maneuvering Flight: Blurred Bodies, Clear Heads*. *Integrative and Comparative Biology* **42**(1): 141–148.
- Warrick, D. R.; Tobalske, B. W. & Powers, D. R. (2005):** *Aerodynamics of the hovering hummingbird*. *Nature* **435**(7045): 1094–1097.

- Weis-Fogh, T. (1973):** *Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production.* Journal of Experimental Biology **59**(1): 169–230.
- Weis-Fogh, T. (1975):** *Unusual Mechanisms for the Generation of Lift in Flying Animals.* Scientific American **233**: 80–87.
- Westerweel, J. (1993):** *Digital Particle Image Velocimetry - Theory and Application.* Phd thesis, TU Delft.
- Westerweel, J.; Dabiri, D. & Gharib, M. (1997):** *The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings.* Experiments in Fluids **23**(1): 20–28.
- Westerweel, J. & Scarano, F. (2005):** *Universal outlier detection for PIV data.* Experiments in Fluids **39**(6): 1096–1100.
- White, C.; Watkins, S.; Lim, E. & Massey, K. (2012):** *The Soaring Potential of a Micro Air Vehicle in an Urban Environment.* International Journal of Micro Air Vehicles **4**(1): 1–14.
- Whitney, J. P. & Wood, R. J. (2012):** *Conceptual design of flapping-wing micro air vehicles.* Bioinspiration & Biomimetics **7**(3): 036 001.
- Willert, C. E. (1996):** *The fully digital evaluation of photographic PIV recordings.* Applied Scientific Research **56**(2-3): 79–102.
- Willert, C. E. & Gharib, M. (1991):** *Digital particle image velocimetry.* Experiments in Fluids **10**(4): 181–193.
- Willmott, A. P.; Ellington, C. P. & Thomas, A. L. R. (1997):** *Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, Manduca sexta.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences **352**(1351): 303–316.
- Withers, P. C. (1981):** *An Aerodynamic Analysis of Bird Wings as Fixed Aerofoils.* Journal of Experimental Biology **90**(1): 143–162.
- Wolf, M.; Ortega-Jimenez, V. M. & Dudley, R. (2013):** *Structure of the vortex wake in hovering Anna's hummingbirds (Calypte anna).* Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences **280**(1773): 1–7.
- Wood, R. (2008):** *The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect.* IEEE Transactions on Robotics **24**(2): 341–347.
- Wood, R.; Finio, B.; Karpelson, M.; Ma, K.; Perez-Arancibia, N.; Sreetharan, P.; Tanaka, H. & Whitney, J. (2012):** *Progress on pico air vehicles.* The International Journal of Robotics Research **31**(11): 1292–1302.
- Woods, M.; Henderson, J. & Lock, G. (2001):** *Energy requirements for the flight of micro air vehicles.* Aeronautical Journal **105**(1045): 135–149.
- Wu, J. & Sun, M. (2004):** *Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing.* Journal of Experimental Biology **207**(7): 1137–1150.
- Wu, J.; Vakili, A. & Wu, J. (1991):** *Review of the physics of enhancing vortex lift by unsteady excitation.* Progress in Aerospace Sciences **28**(2): 73–131.
- Wu, Y.; Jiang, X.; Sun, T. & Wang, W. (2014):** *Exposing video inter-frame forgery based on velocity field consistency.* Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014 IEEE International Conference on, 2674–2678.
- Yang, L.-J. (2012):** *The Micro-Air-Vehicle Golden Snitch and Its Figure-of-8 Flapping.* Journal of Applied Science and Engineering **15**(3).




- Young, J.; Walker, S. M.; Bomphrey, R. J.; Taylor, G. K. & Thomas, A. L. R. (2009):** *Details of Insect Wing Design and Deformation Enhance Aerodynamic Function and Flight Efficiency.* Science **325**(5947): 1549–1552.
- Zanker, J. M. & Gotz, K. G. (1990):** *The Wing Beat of Drosophila Melanogaster. II. Dynamics.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences **327**(1238): 19–44.
- Zheng, L.; Hedrick, T. L. & Mittal, R. (2013a):** *A comparative study of the hovering efficiency of flapping and revolving wings.* Bioinspiration & Biomimetics **8**(3): 036 001.
- Zheng, L.; Hedrick, T. L. & Mittal, R. (2013b):** *Time-Varying Wing-Twist Improves Aerodynamic Efficiency of Forward Flight in Butterflies.* PLoS ONE **8**(1): e53 060.
- Zhou, B.; Fraser, K. H.; Poelma, C.; Mari, J.-M.; Eckersley, R. J.; Weinberg, P. D. & Tang, M.-X. (2013):** *Ultrasound Imaging Velocimetry: Effect of Beam Sweeping on Velocity Estimation.* Ultrasound in Medicine & Biology **39**(9): 1672–1681.









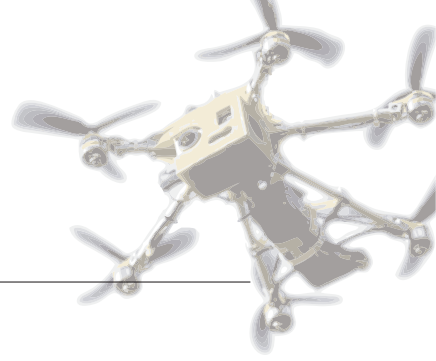
I am really happy that I was given the opportunity to conduct the research presented in this thesis. I want to thank a number of people that supported me and helped me accomplishing my aims. The first huge thank you goes to my supervisor Eize Stamhuis: Without your help and your input, this project clearly would have been impossible. Thank you for the great discussions, your feedback and your expertise. No matter in which mood I entered your office, I always left it with new motivation, new ideas and new confidence. Thanks for hosting me during the measurement marathon and for the collaboration on PIVlab. Very special thanks also go to Anita Buma for her kind willingness to be my first promotor. I am grateful to Antonia Kesel for her kind support during my time in Bremen and for being my co-supervisor. I am very thankful to Hester Bijl, Johan van Leeuwen and Patrick Onck for taking the time to evaluate my thesis. Many thanks to the people from Ocean Ecosystems, I enjoyed my time in Groningen a lot! Furthermore, I really enjoyed working at the Biomimetics-Innovation-Centre. Thanks to all my colleagues for the great atmosphere, and special thanks to René Sonntag and Florian Hoffmann for their help with wind and water tunnels. Many thanks to Klaus-Peter Neitzke for the amicable rivalry in developing the coolest multirotors and also for the discussions we had on control theory and practice, aerodynamics and electronics. Thanks to Malenthe for the dutch translation and to John for proofreading the manuscript.

Finally, I want to thank my whole family for their continuing support - I *really* appreciate it. Lena, you are such a special person in my life, thank you so much for your support during this period of time, for your understanding and for being here! ♥♥♥



## CURRICULUM VITAE

---



William Thielicke was born in Hamburg, Germany on June 23<sup>rd</sup>, 1980. Being enthusiastic about both the achievements of technology and nature, he decided to first study biology at the Humboldt University in Berlin and to specialize on biomimetics later. After completing his diploma thesis on the aerodynamics of bird flight at the University of Groningen, he was awarded a degree in biology in 2007 at the University of Darmstadt with a specialization in biomimetics, animal physiology and zoology.

William then started to work at the Biomimetics-Innovation-Centre at the Hochschule Bremen in 2008. Simultaneously, he began to work on the research presented in this thesis at the Rijksuniversiteit Groningen. During this period he initiated two open-source projects – an award-winning micro air vehicle system and a popular particle image velocimetry tool.

He currently lives in Bremen, together with Lena and their two beloved daughters Line and Malia.

E-mail: [w.th@gmx.de](mailto:w.th@gmx.de)

Website: [William.Thielicke.org](http://William.Thielicke.org)

