

## Der Insektenflug als authentischer Kontext für den Physikunterricht

Lutz Kasper

Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd – Abteilung Physik,  
Oberbettringer Str. 200, 73525 Schwäbisch Gmünd  
[lutz.kasper@ph-gmuend.de](mailto:lutz.kasper@ph-gmuend.de)

### Kurzfassung

Die Flugfertigkeit von Insekten ist faszinierend und bislang unerreicht von unserer Ingenieurkunst. Ungeachtet dessen steht das Know-how um die Manövrierfähigkeit der winzigen Flugobjekte zunehmend im Fokus von Bionik und anderen Forschungsfeldern. Auch für den Physikunterricht bietet es ein großes inhaltliches Potenzial bei hervorragender Anbindung an Alltags- bzw. Naturphänomene. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie man sich mit vergleichsweise einfacher technischer Ausrüstung dem anspruchsvollen Thema auf verschiedenen Niveaustufen nähern kann. Dafür kann die Auswertung von Videodaten einer sehr preiswerten Highspeed-Kamera oder von akustischen Daten eines schlichten USB- bzw. Smartphone-Mikrofons bereits gute Dienste leisten. Und man ahnt es sicher schon: Entgegen eines ebenso verbreiteten wie merkwürdigen Spruches hat die Physik sehr wohl eine Erklärung für den Flug der Hummel!

### 1. Verortung des Themas im Physik- bzw. naturwissenschaftlichen Unterricht

Für eine Behandlung im Unterricht einschlägiger Fächer stellen die Spezifik, die Komplexität und nicht zuletzt die fehlende explizite curriculare Anbindung des Themas „Insektenflug“ hohe Hürden dar.

Auf der anderen Seite faszinieren die Flugfähigkeiten der Insekten Ingenieure wie auch Laien. Wendigkeit und blitzschnelle Manöver, Rückwärtsstarts, Verharren auf der Stelle im Flug und eine extreme Robustheit gegenüber äußeren Störungen machen Insekten zu den wahren Meistern der Luft (Abb. 1).



Abb. 1: Flugkünstler Libelle (Foto: L.Kasper)

Im Sommerhalbjahr stehen Insekten als Studienobjekte in nahezu unbeschränkter Anzahl bei gleichzeitig großer Vielfalt zur Verfügung. Ein „Wald- und Wiesenprojekt“ bietet dabei genau so hervorragende Möglichkeiten wie eine Studie der gelegentlich an den Fensterscheiben der Schule oder in den Terrarien der Biologie-Sammlung auffindbaren Hautflügler. Der Insektenflug lässt sich mit Stichworten wie *Bionik* oder *naturorientiertes Lernen* verknüpfen [1]

und [2]. Insbesondere die Bionik kann dabei als Integrationsprojekt dienen, in dem Fragen nach Strategien und Methoden der Bionik oder dem Zusammenhang von Bionik und Evolution nachgegangen werden kann. Der Fokus kann auch auf andere Schwerpunkte, nämlich auf geeignete Messmethoden gerichtet sein (siehe folgenden Abschnitt).

In einem ausgiebigeren Projekt ließe sich eine thematische Leitlinie *Flugsamen – Vogelflug – Insektenflug – technische Fluggeräte* entwickeln. Hierbei kommen durch wiederholte Vergleiche „technischer“ Lösungen Fragen nach evolutionären Gestaltungsprinzipien wie auch technologischen „Analogien“ auf.

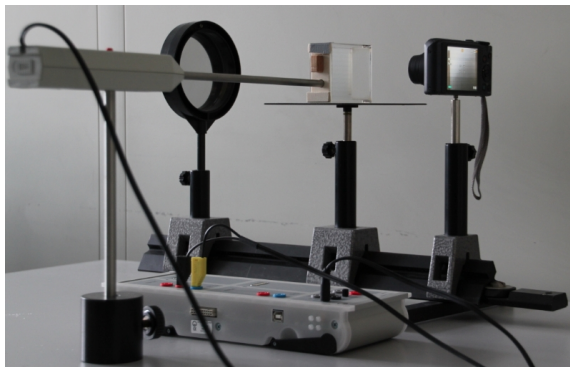
### 2. Verwendung einfacher Messmethoden

#### 2.1 Aufzeichnung mit Highspeedkameras

Die hier vorgeschlagenen Messungen sollen einerseits ohne großen technischen (und damit auch finanziellen) Aufwand ermöglicht werden. Andererseits müssen natürlich die im Abschnitt 3 beschriebenen Messgrößen – insbesondere die vergleichsweise hohe Flügelschlagfrequenz – erfasst werden können. Dafür kommen grundsätzlich sowohl optische als auch akustische Messmethoden infrage.

Für eine optische Messung reicht allerdings die zeitliche Auflösung normaler Videoaufnahmen nicht aus. Bei einer Bildaufnahme Frequenz von 30 Bildern pro Sekunde liegt man mit den Zeitsprüngen deut-

lich über dem Vielfachen einer Flügelschlagperiode zahlreicher Insektenarten. Hier ist eine Highspeed-Kamera erforderlich. Der Handel bietet sehr preiswerte Kameras mit HS-Funktion bis zu 1000 fps („frames per second“) an, die die Flügelschlagbewegungen vieler Insekten hinreichend gut erfassen. Die Bestimmung der Flügelschlagfrequenz kann dann z. B. über die Auszählung einer Standbildserie bei bekannter Aufnahme Frequenz erfolgen. HS-Kameras im Allgemeinen – insbesondere aber die einfachen Modelle – erfordern eine gute Ausleuchtung des Objekts. Die besten Aufnahmen sind dem Autor im Sonnenlicht, also in „Wald- und Wiesen-Situationen“ gelungen. Dort lassen sich dafür die Objekte nicht kontrollieren. Tipp: Wer keine Scheu hat, findet an einem Bienenstock (am Besten unter Anleitung einer Imkerin / eines Imkers) sehr gute Aufnahmebedingungen (Abb. 3).



**Abb. 2:** Aufnahmesituation im „Labor“ – optische und akustische Messung (Foto: L.Kasper)



**Abb. 3:** *Apis mellifera* im Landeanflug (Foto: L. Kasper)

Unter „Laborbedingungen“ (siehe Abb. 2) gelingt die Kontrolle besser. Dafür kommt einer ausreichenden Beleuchtung große Bedeutung bei. Eine Beeinträchtigung der Aufnahmequalität bei netzbetriebener Beleuchtung stellen dabei Helligkeitsschwan-

kungen durch Verwendung ungenügend stabilisierter Netzgeräte dar. Außerdem ist der Flug des Insekts in einem Beobachtungsbehälter nur während sehr kurzer Phasen, nämlich zwischen den Zusammenstößen mit den Wänden wirklich frei. (ethischer Hinweis: Alle vom Autor auf diese Weise untersuchten Fliegen waren jeweils nur wenige Minuten in der Glasküvette und konnten unversehrt wieder entfliegen!)

Prinzipiell reicht es sogar aus, ein an der Fensterscheibe auf- und abfliegendes Insekt zu filmen. Allerdings besteht dann oft eine Gegenlichtsituation.

## 2.2 Akustische Messungen

Sehr gute Möglichkeiten bieten sich bei der akustischen Bestimmung von Flügelschlagfrequenzen. Dies setzt natürlich Insekten voraus, die ihre Flügel mit einer Frequenz im Hörbereich (von Mikrofonen) bewegen. Viele Insekten tun das aber und somit bietet sich dieser bioakustische Weg hervorragend an. Auch die technischen Möglichkeiten sind hier äußerst günstig. Mit etwas größerem Aufwand in der Laborsituation, wie in Abb. 2 dargestellt, kann mit dem Universalmikrofon und einem Sensor-CASSY gearbeitet werden. Ein Vorteil dabei besteht in den von CASSY-Lab zur Verfügung gestellten Routinen zur Auswertung. Es geht allerdings auch sehr viel einfacher: Ausgerüstet mit einem Laptop, einer geeigneten Software (z.B. der Freeware *Audacity*) und einem USB-Mikrofon lassen sich nahezu die gleichen Auswertungen vornehmen (siehe Screenshot im Abschnitt 3.3).

Noch bequemere Aufnahmebedingungen, vor allem aber spontane Messungen bieten Smartphones oder Tablets. Geeignete Apps bieten Darstellungen wie Frequenzspektren oder Amplituden-Zeit-Diagramme (z.B. *Oscilloscope* oder *Audio Kit* für iOS).

## 3. Aerodynamische Kennwerte des Insektenfluges

### 3.1 Flächenbelastung

Eine erste Annäherung an die Aerodynamik von Insekten lässt sich durch einen Vergleich der jeweiligen Flächenbelastung  $m \cdot A^{-1}$  unterschiedlicher Flugobjekte erreichen. Diese Größe verknüpft Auftriebsbeiwert und Fluggeschwindigkeit eines fliegenden Objektes. Für starre Tragflügel gilt dabei, dass eine hohe Flächenbelastung eine hohe Fluggeschwindigkeit erfordert.

Für die Bestimmung der Flächenbelastung eines Insekts muss dessen Flügelfläche abgeschätzt werden. Dabei ist zu beachten, dass Insekten i.d.R. zum Flug zwei Flügelpaare nutzen, die aneinander gekoppelt werden und im Ruhemodus getrennt sind. Eine einfache Abschätzung z.B. für die Flügelfläche der Biene (Abb. 4) könnte über die Ellipsenform gefunden werden:

$$A = \pi \cdot a \cdot b \quad \{1\}$$

$a, b$ : Halbachsen der Ellipse



Abb. 4: Abschätzung der Flügelfläche (Foto: L. Kasper)

Im Beispiel für die Biene (Arbeiterin) lässt sich die Größe eines Vorderflügels bestimmen: größte Länge: ca. 9 mm, größte Breite: ca. 4 mm. Nimmt man diese größten Werte als jeweils doppelte Halbachsenlänge einer Ellipse an, wird die Fläche des „unterschlagenen“ Hinterflügels damit annähernd ausgeglichen. Es ergibt sich ein Wert von ca. 28 mm<sup>2</sup> für ein Flügelpaar, mithin ca. 56 mm<sup>2</sup> für die Gesamtfläche beider Flügelpaare.

Mithilfe einer Laborwaage lässt sich auch die Masse des Insekts (Biene „unbeladen“:  $m \approx 0,1$  g) ermitteln. Man erhält so eine Flächenbelastung der Biene von  $m \cdot A^{-1} \approx 1,8$  kg · m<sup>-2</sup>. Die Arbeiterin als Flugbiene ist jedoch in der Lage, eine zusätzliche Last von ca.  $\frac{3}{4}$  ihres Körpergewichtes im Flug zu befördern ([6], S. 51). Damit steigt die Flächenbelastung auf den Wert von etwa 3 kg · m<sup>-2</sup>. Hinweis: Für solche Untersuchungen der Körpermasse oder der Flügelgröße bzw. -struktur unter dem Mikroskop findet man unmittelbar an Bienenstöcken immer einige gut erhaltene tote Bienen. Die hier durch Abschätzung ermittelten Werte stimmen gut mit morphometrischen Angaben aus der Literatur überein (z. B. [10]). Einen Vergleich der Tragflügel-Flächenbelastung unterschiedlicher Flugobjekte gibt Tabelle 1.

Flugobjekt	Tragflügel-Flächenbelastung in kg · m <sup>-2</sup>	typische Fluggeschwindigkeit in m · s <sup>-1</sup>
Hummel (bombus terrestris)	12,6	max. 6
Biene (apis mellifera)	1,7 ... 3	max. 8
Sperling	2,4	ca. 15
Wanderalbatros	16	max. 35
Airbus A380	700	250

Tab. 1: Flächenbelastungen und Fluggeschwindigkeiten einiger Flugobjekte

Die Vergleichswerte der Tabelle deuten an, dass für Insekten, anders als für Vögel und Flugzeuge, die Tragflügel-Flächenbelastung keine gute Beschreibung des Fluges liefert. Für die geringe Translationsgeschwindigkeit der Insekten ist die Tragflügel-Flächenbelastung offensichtlich zu groß. Besonders auffällig ist das scheinbare Missverhältnis bei den Werten für die Hummel (aus [8]). Darauf gründet das so genannte Hummelparadoxon („Die Hummel dürfte eigentlich gar nicht fliegen ...“).

Es müssen demnach weitere auftriebserzeugende Größen bzw. Mechanismen gesucht werden. Eine solcher Kennwert ist die Reynoldszahl, die im Folgenden betrachtet wird.

### 3.2 Reynoldszahl

Eine aerodynamische Kenngröße, die die Besonderheit des Insektenfluges wiedergibt, ist die Reynoldszahl  $Re$  (vgl. [4]). Sie kann interpretiert werden als Verhältnis von Trägheitskräften auf das fliegende Objekt zur Zähigkeit des anströmenden Mediums. Zwar bewegen sich alle Flugobjekte im gleichen Medium 'Luft', dennoch werden sie unterschiedlich von diesem Medium beeinflusst. Für kleine Objekte wie Insekten ist die „Zähigkeit“ der Luft der dominante Faktor, auf größere Objekte wie Flugzeuge wirken dagegen überwiegend Trägheitskräfte.

$$Re = \rho \cdot v \cdot l \cdot \eta^{-1} \quad \{2\}$$

$\rho$ : Dichte des Mediums;  $v$ : Translationsgeschwindigkeit des fliegenden Objekts;  $l$ : charakteristische Länge (Breite der Flügel zwischen Vorder- und Hinterkante);  $\eta$ : Viskosität des Mediums

Zur Bestimmung der Reynoldszahl für das Beispiel „Biene“ werden Angaben zur Flügelbreite und zur Geschwindigkeit der anströmenden Luft benötigt. Für die Bestimmung der Translationsgeschwindigkeit als ersten Ansatz zur Bestimmung der Geschwindigkeit der anströmenden Luft kann die schon erwähnte Kamera mit HS-Funktion gut verwendet werden.

Werte für Dichte (1,2 kg · m<sup>-3</sup> bei Normdruck und 20°C) und Viskosität (17,4 μN · s · m<sup>-2</sup> bei 20°C) der Luft lassen sich Tabellenwerken entnehmen. Die somit ermittelten Reynoldszahlen für die vermessenen Bienen liegen je nach Fluggeschwindigkeit im Bereich von  $Re_{\text{Biene}} \approx 200 \dots 1600$ . Tabelle 2 zeigt den Vergleich mit typischen Reynoldszahlen anderer Flugobjekte verglichen werden (Angaben aus [3], [7], [8]).

Die überdeutlichen Unterschiede der Reynoldszahlen der ausgewählten Insekten einerseits sowie der von Vögeln und technischen Fluggeräten andererseits weisen auf unterschiedliche Mechanismen der

Auftriebserzeugung hin. Dabei ist klar, dass die hohe Flügelschlagfrequenz von Insekten im Vergleich zu Vögeln und erst recht im Vergleich zur starren Flugzeugtragfläche den Schlüssel zum Verständnis der Auftriebserzeugung darstellt.

Flugobjekt	Reynoldszahl
Fransenflügler (thysanoptera)	0,01 ... 10
Schlupfwespe (encarsia formosa)	23
Biene (apis mellifera)	200 ... 1600
Vögel	$4 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^5$
Sportflugzeuge	ca. $10^7$
Passagierflugzeuge	$4 \cdot 10^7 \dots 7 \cdot 10^7$

Tab. 2: Reynoldszahlen im Vergleich

### 3.3 Flügelschlag-Frequenz

Flügelschlag-Frequenzen von Insekten lassen sich, wie im einführenden Abschnitt beschrieben, optisch und oft auch akustisch bestimmen. Eine Gattung die für eine optische Bestimmung „dankbare“ Flugeigenschaften hat, ist die Florfliege (chrysoperla camea) mit einem relativ langsamen Flügelschlag (vergl. Abb. 5). Die Frequenz ergibt sich hier zu etwa 30 Hz.

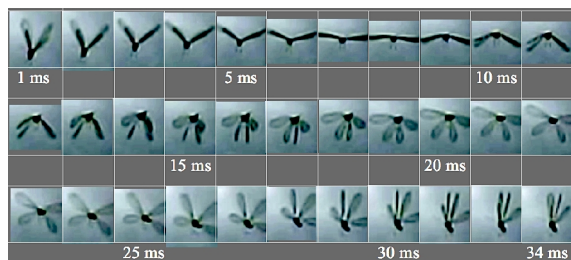


Abb. 5: Standbildserie einer vollständigen Flügelschlagperiode der Florfliege (Fotos L. Kasper, HS 1000 fps)

Da die Florfliege weder für das menschliche Ohr noch für einfache Mikrofone hörbar ist, ist sie einer akustischen Analyse nicht zugänglich. Dies gelingt aber sehr gut bei einer Reihe anderer Insekten, z.B. Bienen und Wespen (Abb. 6).

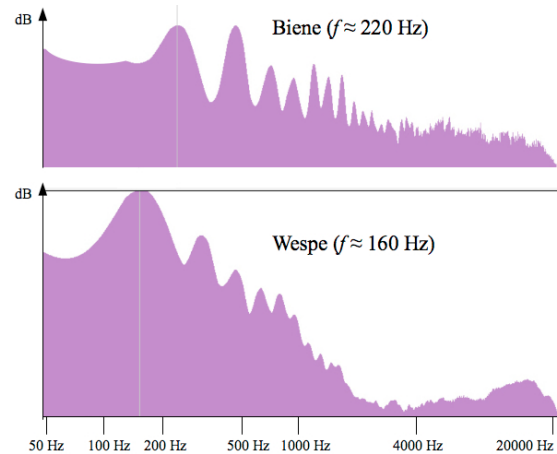


Abb. 6: Flügelschlag-Frequenzspektren: Biene und Wespe (Analyse-Freeware: Audacity)

Das Ergebnis zahlreicher Messungen deutet darauf hin, dass Insekten mit jeweils charakteristischen Flügelschlagfrequenzen fliegen. Die mittlere Frequenz vieler vom Autor „vermessener“ Bienen beträgt etwa 220 Hz bei einer nur geringen Varianz. Die biologisch-physiologische Fachliteratur bestätigt den Insektenflügelschlag als Charakteristikum der Art ([5], S. 259). Sie kann im gesamten Reich der Insekten Werte zwischen 10 und  $10^3$  Hz einnehmen (ebd).

Ein interessanter Punkt dabei ist, wie Insekten diese schnelle Bewegung erreichen können. Die Frequenz hängt einerseits von der Eigenfrequenz des Flügels ab, die mit sinkendem Trägheitsmoment ansteigt. Dieser Zusammenhang wurde experimentell bereits in den 50er an fixierten Insekten bzw. mithilfe von zu Schwingungen angeregten einzelnen Insektenflügeln gefunden. Andererseits greifen die biologischen Aktuatoren (Muskelfasern) nicht direkt am Flügel an. Vielmehr versetzen die Muskeln des Insekts den Thorax in Schwingungen. Die „lose“ angekoppelten Flügel schwingen dann in der Eigenfrequenz des gekoppelten Thorax-Flügel-Systems.

Für das Verständnis des Insektenfluges müssen jeweils Translationsgeschwindigkeit und Schlagfrequenz im Zusammenhang interpretiert werden. Dieser Zusammenhang, *reduzierte Frequenz* genannt, bestimmt letztlich das Spezifische am Schlagflug der Insekten.

### 3.4 Reduzierte Frequenz

Die reduzierte Frequenz  $\omega$  ergibt sich aus der Gleichung

$$\omega = \pi \cdot f \cdot b_m \cdot v_0^{-1} \quad \{3\}$$

$f$ : Schlagfrequenz;  $b_m$ : mittlere Tragflügelbreite;  $v_0$ : Anströmgeschwindigkeit

Sie gibt somit das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten in Bewegungsrichtung und quer zur Bewegungsrichtung am Tragflügel an und kann als

Maß für die Instationarität der Strömung am Tragflügel gedeutet werden.

Trägt man in einem doppelt logarithmischen Diagramm die Reynoldszahlen gegen die reduzierten Frequenzen auf, ergibt sich in grober Näherung eine „Hauptreihe“ von Tieren, die sich durch Schlagflug bewegen (vgl. [7]). Die in diesem Beitrag dokumentierten Messwerte für Bienen passen sich dabei sehr gut in dieses Diagramm ein (Abb. 7).

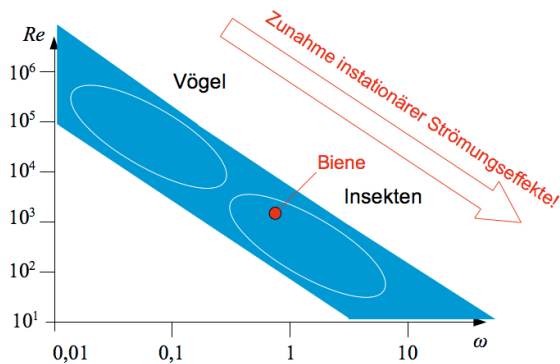


Abb. 7:  $Re(\omega)$ -Diagramm für Vögel und Insekten

Mit sinkender Reynoldszahl und gleichzeitig steigender reduzierter Frequenz, also von den Vögeln hin zu den Insekten nehmen instationäre Strömungseffekte zu. Diese tragen bei den Insekten letztlich wesentlich zur Auftriebserzeugung bei und werden im folgenden Abschnitt kurz betrachtet.

#### 4. Instationäre Effekte zur Auftriebserzeugung

Die Untersuchung der Merkmale „Flächenbelastung und Fluggeschwindigkeit“ wie auch die Abschätzung der Reynoldszahlen von Insekten und ihr Vergleich mit anderen Flugobjekten hat ergeben, dass es grundlegend andere auftriebserzeugende Mechanismen bei Insekten geben muss. Wie in Abb. 7 angedeutet müssen die Ursachen in den instationären Strömungseffekten gesucht werden. Als instationär wird eine Strömung bezeichnet, bei der Strömungsparameter (das Vektorfeld  $v_x, v_y, v_z$ ) und Kräfte nicht zeitlich unabhängig sind.

Die entscheidenden instationären Effekte zur Auftriebserzeugung bzw. -verstärkung beruhen auf der Flexibilität der Insektenflügel, ihrer Rotation und daraus sich ergebender Wirbelbildung. Sie sind: *clap and fling*, *delayed stall*, *rotational lift* und *wake capture*. Der Clap-and-Fling-Effekt ist zumindest mit einer HS-Kamera gut beobachtbar und wird im Folgenden kurz erläutert. Für die weiteren Effekte wird auf die Literatur [7] und [8] verwiesen.

*Clap and Fling* kann am Flug einer künstlichen Libelle gut verdeutlicht werden. Die Flügelpaare sind so angeordnet, dass sie je seitlich auf- und zuklappen und so für Auf- und Vortrieb sorgen (Abb. 8).



Abb. 8: Standbildserie einer fliegenden Kunstlibelle (Fotos: L. Kasper, Aufnahme mit 240 fps)

Beim Zusammenschlagen der Flügel am Umkehrpunkt berühren sich als erstes die Flügelvorderkanten (Abb. 8, untere Reihe). Im weiteren Verlauf legen sich die flexiblen Flügel dann vollständig aneinander, es kommt dabei jeweils an den Flügelhinterkanten zur Wirbelbildung durch ausgestoßene Luft.

Beim Auseinanderschlagen rotieren die Flügel um ihre Hinterkanten, d.h., die Vorderkanten lösen sich als erstes voneinander (Abb. 8, obere Reihe). Die dabei zwischen die Flügel nachströmende Luft wird erneut an den Flügelkanten verwirbelt und verstärkt wiederum den Auftrieb.

Den Clap-and-Fling-Effekt beherrschen übrigens auch Tauben, bei denen er als deutliches Flügelklatschen beim Start zu hören ist. Tauben meistern auch aus diesem Grund schwierige Startsituationen.

#### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Anders als technische Tragflügel und Vogelflügel sind Insektenflügel nicht profiliert, sondern hauchdünn. Sie sind weder starr wie beim Flugzeug, noch aktiv durch Muskeln in ihrer Form veränderbar wie bei Vögeln. Eher sind sie mit einem Segel vergleichbar, das allerdings (meistens) schnell schwingt. Damit greift die in der Schule und Hochschule oft vermittelte Erklärung des aerodynamischen Auftriebes nicht für Insekten. In diesem Defizit liegt ein Potenzial für Lehrveranstaltungen, welches letztlich auch das Hummelparadoxon so populär gemacht hat.

Ein weiteres Gebiet, dem zurzeit von vielen Seiten enormes Interesse entgegengebracht wird, ist die Entwicklung so genannter *Micro Air Vehicles* (MAV). Flugfähige Prototypen haben mit einer Masse von 60 mg und einer Flügelspannweite von 30 mm bereits die Dimensionen von Insekten erreicht (vgl. [9]). Bei einer Behandlung im Schulunterricht oder in Lehrveranstaltungen mit Lehramtskandidaten bietet dieser Kontext darüber hinaus Möglichkeiten zur Entwicklung von Bewertungskompetenz, indem der *dual-use*-Aspekt aktueller technologischer Entwicklungen explizit thematisiert wird (z.B. Spionage und Vöyeurismus vs. Suche nach Katastrophenopfern mithilfe von MAV).

## 6. Literatur

- [1] Nachtigall, W., Blüchel, K. G. (2001) Das große Buch der Bionik. Stuttgart / München: DVA
- [2] Hill, B. (2002) Frag' die Natur – Eine Einführung in Naturorientiertes Lernen. Hildesheim / Berlin: Franzbecker
- [3] Ellington, C. P. (1984) The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. The Quasi-Steady Analysis. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences. Vol. 305, No. 1122 (Feb. 24, 1984) pp. 1-15
- [4] Gerthsen, C. ; Vogel, H. (1999) Gerthsen Physik. 19. Auflage. Berlin / Heidelberg / New York: Springer
- [5] Danzer, A. (1956) Der Flugapparat der Dipteren als Resonanzsystem. In: Zeitschrift für vergleichende Physiologie, Bd. 38, S. 259-283
- [6] Zander, E. (1911) Der Bau der Biene. Stuttgart: Verlagsbuchhandlung Eugen Ulmer
- [7] Hubel, T. (2006) Untersuchungen zur instationären Aerodynamik an einem vogelähnlichen Flügelschlagmodell. TH Darmstadt (Diss.)
- [8] Viieru, D. (2006) Flapping and fixed Wing Aerodynamics of low Reynolds Number Flight Vehicles. University of Florida (Diss.)
- [9] Ostersehl, D. (2008) Flattern für die Wissenschaft – Bionische Forschung an Insekten. In: Unterricht Biologie (332) S. 22-27
- [10] Junge, M. (2003) Kinematische und strömungsmechanische Untersuchungen zum Fächelverhalten der Honigbiene (*Apis mellifera* L.). Taschenbuch, Universität des Saarlandes (Diss.)