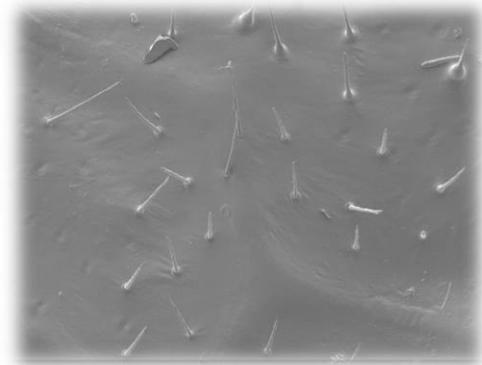
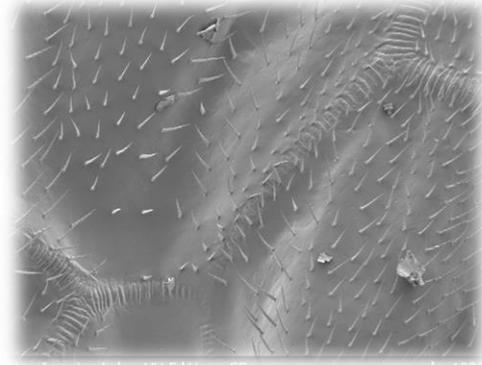
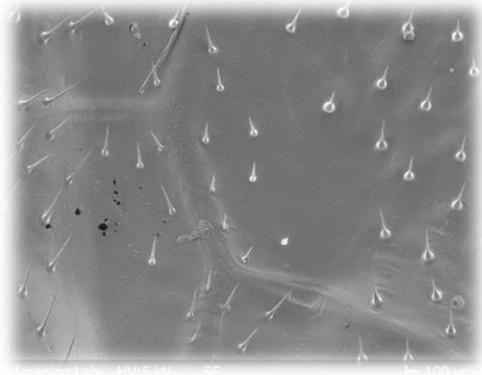


# Adernsystem auf Insektenflügeln

## Adernsystem auf den Flügeln von Bienen, Wespen und Hummeln: Gemeinsamkeiten und Unterschiede



Jana Egli, 4d  
Gymnasium Oberwil  
September 2023  
Nicholas Wentzlaff

# Inhalt

1	Zusammenfassung.....	4
2	Einleitung.....	5
3	Anatomie und Aufbau des Insektenflügels .....	6
3.1	Der Insektenflügel.....	6
3.2	Der Aufbau einer Ader .....	9
3.3	Die Funktion der Adern.....	9
3.4	Der schematische Aufbau eines Flügelgäders .....	10
4	Material und Methoden .....	11
4.1	Probenbeschaffung .....	11
4.2	Lasermikroskop.....	11
4.3	Rasterelektronenmikroskop.....	12
4.3.1	Funktionsweise.....	12
4.3.2	Probenvorbereitung .....	13
4.4	Durchgeführte Messungen.....	14
5	Resultate.....	17
5.1	Geometrie der Flügel.....	17
5.2	Grad der Flügelsymmetrie eines Individuums .....	18
5.3	Variabilität innerhalb einer Art .....	19
5.4	Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Arten .....	21
5.4.1	Gemeinsamkeiten .....	21
5.4.2	Unterschiede.....	21
5.4.3	Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Querschnitte .....	23
5.5	Korrelationen.....	23
6	Diskussion.....	25
7	Reflexion.....	27
8	Danksagungen.....	28
9	Verzeichnis .....	29
9.1	Internetquellenverzeichnis.....	29
9.2	Literaturverzeichnis.....	31

9.3	Abbildungsverzeichnis .....	32
9.4	Tabellenverzeichnis .....	33
10	Selbstständigkeitserklärung .....	34

# 1 Zusammenfassung

Die Adern auf den Flügeln sind für die Fluginsekten unerlässlich. Ohne sie hätte der Flügel keine Stabilität und würde austrocknen. Die Adern sind essenziell, da sie dafür sorgen, dass der gesamte Flügel mit Hämolymphe versorgt wird. Zudem beinhalten sie einen Nerv, der die für die Stabilität im Flug wichtigen Infos von den Sensillen an den Körper weitergibt. Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops wurden Nahaufnahmen der Adern auf Bienen-, Wespen- und Hummelflügeln gemacht. Pro Art wurden fünf rechte Flügel abgebildet und ausgemessen und von einem Tier pro Art zusätzlich noch der linke Flügel. Ebenfalls wurde pro Art ein Querschnitt abgebildet und vermessen. Durch den Vergleich der Bilder und die Auswertung der Messungen stellte sich heraus, dass das Adernmuster innerhalb einer Art keine signifikanten Unterschiede aufweist. Auch was die Dicke der Adern innerhalb einer Art anbelangt, konnte keine relevante Variabilität festgestellt werden. Jedoch variiert das Adernmuster zwischen den einzelnen Arten. Ein sehr interessanter Unterschied ist, dass die Adern der Wespen, im Gegensatz zu den Adern auf Bienen- und Hummelflügeln, aus einzelnen Segmenten aufgebaut sind. Der rechte und linke Flügel eines Tieres sind vertikale Spiegelbilder voneinander. Bezüglich der Grösse der Flügel haben sich keine Überraschungen ergeben. Das kleinste untersuchte Insekt, die Honigbiene, hat flächenmässig die kleinsten Flügel und das grösste untersuchte Insekt, die Erdhummel, flächenmässig die grössten. Um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, müssten jedoch mehr als nur 5 Flügel pro Art untersucht werden.

## 2 Einleitung

Besonders in der Bionik<sup>1</sup> erlangen die Insektenflügel aufgrund ihrer Flexibilität und Strapazierfähigkeit, die sie ihrem speziellen Aufbau zu verdanken haben, immer mehr an Aufmerksamkeit.<sup>2</sup> Forscher:innen untersuchen die Flügel, um das Wissen in der Technik, wie zum Beispiel im Flugzeugbau, anzuwenden.

Diese Arbeit fokussiert sich auf das Adernsystem auf den vorderen rechten Flügeln von Hautflüglern. Die Arbeit soll die Frage klären: «Wie unterscheidet sich das Adernmuster auf den Flügeln von Bienen, Wespen und Hummeln?». Die Hautflügler oder Hymenoptera, die gebraucht wurden, sind: Bienen, Wespen und Hummeln. Sie gehören alle zur Unterklasse Pterygota, den Fluginsekten, zur Überordnung der Neoptera, den Neuflüglern, und zur Ordnung Hymenoptera, den Hautflüglern.<sup>3</sup> Hymenoptera kommt vom griechischen, *hymēn* = Haut, Häutchen und *petron* = Flügel.<sup>4</sup> Hautflügler zeichnen sich durch ihre durchsichtigen, häutigen Flügel aus.<sup>5</sup> Untersuchungsgegenstand ist das Muster der Adern. Es wird untersucht, ob es sich unter den verschiedenen Arten unterscheidet. Nebst dem Unterschied zwischen den Arten wird in der Arbeit auch ein Blick darauf geworfen, ob es innerhalb einer Art Unterschiede gibt. Zudem wird das Adernsystem auf dem rechten und linken Flügel eines Individuums auf seine Symmetrie untersucht. Darüber hinaus wird ein Querschnitt eines Flügels pro Art abgebildet, um zu schauen, ob der typische Aufbau auf selbst gemachten Fotos mit dem Rasterelektronenmikroskop zu erkennen ist.

Die Hypothesen sind:

- (i) Der linke und rechte Flügel eines Tieres sind symmetrisch, sowohl in Anbetracht des Adernmusters als auch der Grösse. Dies, weil Asymmetrien das Flugverhalten ungünstig beeinflussen.
- (ii) Innerhalb einer Art werden keine größeren Unterschiede erwartet, da eine Art auf der gleichen Stufe der Evolution steht, ausser es wäre eine Mutation.
- (iii) Das Adernmuster unterscheidet sich zwischen den drei verschiedenen Arten, da alle Arten ein anderes Flugverhalten, einen anderen Körperbau und dementsprechend eine andere Flügelgrösse aufweisen.

---

<sup>1</sup> Bionik = Biologie und Technik, bezeichnet die Verknüpfung von biologischem Wissen und Technik; Bionik.de. Faszination Bionik. 24.09.2023

<sup>2</sup> Autocad-Magazin. Was Insektenflügel zum Vorbild für die Konstruktion machen könnte. 24.09.2023

<sup>3</sup> Wikipedia. Insekten. 20.08.2023

<sup>4</sup> Spektrum.de. Hymenoptera. 24.09.2023

<sup>5</sup> Nabu. Hautflügler. 24.09.2023

## 3 Anatomie und Aufbau des Insektenflügels

### 3.1 Der Insektenflügel

Die Form und Struktur aller Insektenflügel zielen in erster Linie darauf ab, aerodynamisch vorteilhaft zu sein.<sup>6</sup> Ausserdem ermöglicht deren Aufbau, dass die Flügel nach der Landung auf dem Rücken in Längsrichtung, selten auch in Querrichtung zusammengefaltet werden können. Die Flügel der Insekten machen nur rund 1-2% des Gesamtgewichts des Insekts aus.<sup>7</sup> Abgesehen von der Ordnung der Zweiflügler<sup>8</sup> besitzen alle Insekten zwei Flügelpaare, wobei bei Hautflüglern die vorderen Flügel grösser sind als die hinteren Flügel.<sup>9</sup> Die Flügel von Insekten sind über die hochkomplexen Flügelgelenke mit dem Thorax verbunden.<sup>10</sup> Die Vorderflügel sind mit dem Mesothorax, dem mittleren Brustsegment, verbunden und die Hinterflügel mit dem Metathorax, dem hinteren Brustsegment.<sup>11</sup> Der vordere Rand der Flügel wird Rippenrand genannt, der äussere Rand Scheitelrand und der hintere Rand Analrand.<sup>12</sup> Während dem Flug sind die Flügel gekoppelt und funktionieren als eine Einheit. Die Hautflügler besitzen an dem Rippenrand des hinteren Flügels eine Reihe von winzigen Haken, den Hamuli, die sich in eine Falte des Vorderflügels einhaken. In Ruhe sind die Flügel entkoppelt und flach über dem Rücken zusammengefaltet. Der hintere Flügel ist dabei unter dem vorderen Flügel verborgen. Auf der Oberfläche der Flügel, besonders ausgeprägt entlang der Adern, befinden sich winzige Haare, welche von blossen Auge nicht erkennbar sind: die Mikrotrichien oder Haarsensillen. Dies sind Mechanorezeptoren<sup>13</sup>, die auf Berührung reagieren und somit Änderungen des Luftstroms über den Flügel registrieren. Die Mikrotrichien dienen ebenfalls dazu, den Luftwiderstand zu vermindern. Auf der an den Thorax anschliessenden Flügelbasis sitzen campaniforme<sup>14</sup> Sensillen, ebenfalls Mechanorezeptoren, welche für die Stabilität im Flug wichtig sind, da ihre sensorischen Informationen dazu dienen, die Ausgleichsreflexe auszulösen und somit das Gleichgewicht im Flug zu behalten.<sup>15</sup> Die Flügel bestehen aus einer dünnen Membran und Adern.<sup>16</sup> Die Membran ist durchsichtig, schillernd. Sie besteht aus zwei eng aneinander liegenden Schichten des Integuments. Eine Schicht Integument besteht aus einer unteren Schicht, der Epidermis, welche bedeckt wird von der darüberliegenden Schicht, der Kutikula. Die Epidermis besteht aus einzelnen Epidermiszellen. Die Epidermis hat

---

<sup>6</sup> Hier und im Folgenden: Chapman (1998). S. 185-225

<sup>7</sup> ScienceDirect. Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method. 21.08.2023

<sup>8</sup> Zweiflügler ist eine Ordnung der Fluginsekten, die pro Seite nur einen Flügel haben. (Wikipedia. Zweiflügler. 11.09.2023)

<sup>9</sup> Nabu. Tipps und Tricks zum Insekten bestimmen. 27.08.2023. Ebenso: Wikipedia. Hautflügler. 21.08.2023

<sup>10</sup> Chapman (1998). S.185-225

<sup>11</sup> Wikipedia. Flügel (Insekt). 27.08.2023

<sup>12</sup> Hier und im Folgenden: Chapman (1998). S. 185-225

<sup>13</sup> Rezeptoren, die mechanische Reize in elektrische Signale umwandeln. (DocCheck Flexikon. Mechanorezeption. 10.09.2023)

<sup>14</sup> campaniform = glockenförmig

<sup>15</sup> Wikipedia. Campaniforme Sensillen. 10.09.2023

<sup>16</sup> Hier und im Folgenden: Chapman (1998). S.185-225

die Aufgabe, die Kutikula mit allen möglichen Substanzen und, am wichtigsten, mit Wasser zu versorgen und den Austausch von Molekülen zwischen der Kutikula und der Hämolymphe, dem Blut der Insekten, zu fördern.<sup>17</sup> Die Kutikula ist wiederum aus drei verschiedenen Schichten aufgebaut: der Epikutikula, der Exokutikula und der Endokutikula.<sup>18</sup> Die Epikutikula, die äusserste Schicht des Integuments, ist nur 1-4 µm dick. Sie besteht aus Lipiden, Proteinen und Lipoproteinen. Auf ihr befindet sich noch eine Schicht Wachs, die dazu dient, die Kutikula abzudichten. Die Exokutikula und die Endokutikula, welche auch als Prokutikula zusammengenommen werden, können zusammen über 200 µm dick werden. Im Gegensatz zur Epikutikula besteht die Prokutikula hauptsächlich aus Chitin und einigen Proteinen. Die Chitinpolymere kristallisieren in Form von Mikrofibrillen<sup>19</sup>, welche in einer Matrix aus Kutikularproteinen liegen und dort einen supramolekularen Chitinkomplex formen. Zwischen den zwei Schichten verläuft das Adernsystem. Dort, wo die Adern verlaufen, ist das Integument dicker und dementsprechend stabiler. Zudem ist das Integument an dieser Stelle zusätzlich mit einer Schicht Resilin überzogen, welches aufgrund dessen Elastizität essenziell ist für die Energierückgabe beim Flügelschlag und das Falten der Flügel. Das Flügelgeäder teilt den Flügel in eine Vielzahl von verschiedenen grossen und geformten Zellen. Ihren Namen haben die Zellen der Ader zu verdanken, die die vordere Grenze der Zelle formt. Ist eine Zelle komplett von Adern umgeben, wird diese als geschlossen bezeichnet. Befindet sich die Zelle am Scheitelrand und ist somit auf mindestens einer Seite nicht von einer Ader begrenzt, bezeichnet man die Zelle als offen. Bei vielen Insekten ist eine Zelle am vorderen Rand des Flügels dunkel gefärbt und dicker.<sup>20</sup> Dies ist das sogenannte Flügelmal oder Pterostigma. Dadurch, dass das Pterostigma eine Verdickung der Flügelmembran ist und somit auch schwerer ist, trägt das Flügelmal als Trimmgewicht zu einem stabilen Flug bei. Der Flügel muss einerseits steif sein, für den Abschlag und um sich während des Fluges nicht zusammenzufalten, und andererseits verformbar, für den Aufschlag und um im Ruhezustand zusammengefaltet werden zu können.<sup>21</sup> Daher wird der Flügel in Zonen der Steifigkeit und Zonen der Verformbarkeit unterteilt. Diese Zonen kooperieren als integrierte Mechanismen zusammen, um die bestmögliche Leistung zu erbringen. Für die Steifigkeit sind vor allem die Adern verantwortlich sowie einige Zellen wie zum Beispiel das Pterostigma. Die Strukturen der Steifigkeit werden von verformbaren Zellen unterbrochen. Diese Linien entlang des Flügels, an denen solche Unterbrechungen stattfinden, werden als Beuge- oder Faltlinien bezeichnet, entlang dieser sich der Flügel während des Flugs verformt und im Ruhezustand faltet. Bei fast allen Insekten treten die längs verlaufenden Clavalfurche (engl. claval furrow) und Media-Beugelinie (engl. median flexion line) auf. Die Clavalfurche zieht sich entlang der Posterior Cubitus (CuP) (siehe Kapitel 3.4) und die

---

<sup>17</sup>ScienceDirect. Beyond aerodynamics: The critical roles of the circulatory and tracheal systems in maintaining insect wing functionality. 12.09.2023

<sup>18</sup> Hier und im Folgenden: Chapman (1998) S.185-225

<sup>19</sup> Winzige Fasern

<sup>20</sup> Hier und im Folgenden: Wikipedia. Hautflügler. 21.08.2023

<sup>21</sup> Hier und im Folgenden: Chapman (2013). Edited by Simpson, Douglas. S.194-201

Media-Beugelinie entspringt, wie der Name bereits verrät, in der Nähe der Media (M) (siehe Kapitel 3.4) und verläuft hinter dem radialen Sektor (Rs). Ein Grossteil der Neuflügler, zu denen auch die Hautflügler gehören, besitzen auf dem Vorderflügel eine weitere Faltlinie, die Jugalfalte. Die Jugalfalte (engl. jugal fold) befindet sich direkt hinter der dritten Analader (3A) (siehe Kapitel 3.4). Auf der Abbildung sind die drei Beugelinien als gepunktete Linien interhalb des Adernmusters dargestellt.

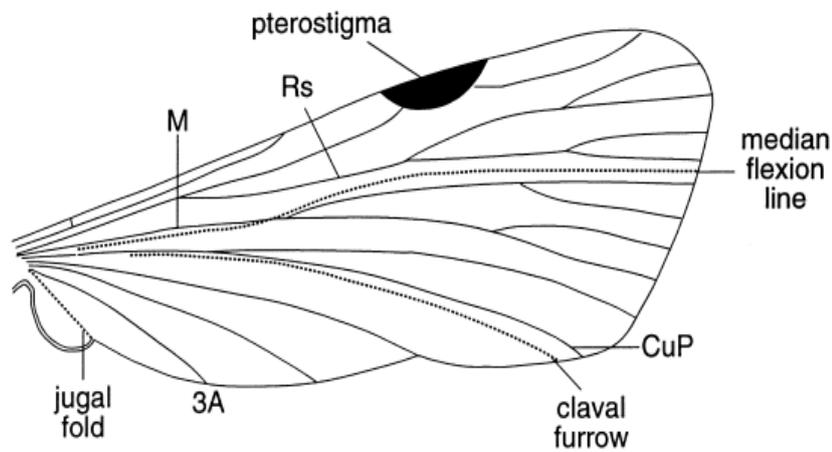


Abb. 1 Schematische Darstellung Beugelinien

### 3.2 Der Aufbau einer Ader

Jede Ader ist ein in die Membran eingelassener Hohlraum, durch welchen Hämolymphe, also das Blut der Insekten, fließt. Auf der Abbildung wird dieser Hohlraum «blood space» genannt. Neben Hämolymphe beinhalten die längsverlaufenden Adern auch einen Nerv (engl. nerve) und einen Tracheenast (engl. trachea) (siehe Kapitel 3.3), wie auf der unteren Abbildung zu sehen ist.<sup>22</sup> Durch die Queradern hingegen läuft in der Regel kein Tracheenast.<sup>23</sup>

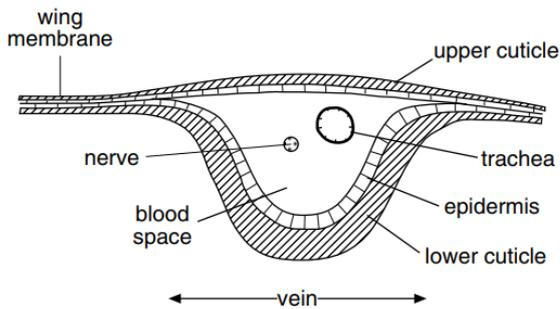


Abb. 2 Schematischer Querschnitt Flügelaeder

### 3.3 Die Funktion der Adern

Die Adern haben im Wesentlichen zwei wichtige Funktionen: Einerseits die Stabilisation der Flügel und andererseits das Versorgen der Insektenflügel und ihrer Bestandteile mit lebenswichtigen Substanzen.<sup>24</sup> Um den Flügel optimal zu stützen, verlaufen Längsadern über die gesamte Flügelfläche und sind untereinander mit Queradern verbunden.<sup>25</sup> Am Rippenrand der Vorderflügel befindet sich eine verstärkte Randader, die Costalader, welche den Flügel verstärkt.<sup>26</sup> Die Adern dienen als Transportweg für Hämolymphe, durch die das lebende Gewebe und die Strukturen mit den nötigen Flüssigkeiten und Nährstoffen versorgt werden.<sup>27</sup> Die Adern sorgen indirekt auch dafür, dass die Flügel funktionsfähig bleiben, denn ohne Hämolymphezirkulation würden die Flügel austrocknen. Die Hämolymphe, welche vom Herzen kommt, fließt durch die vorderen Adern hin bis zum Scheitelrand und dann durch die hinteren Adern zurück zum Thorax. Zudem fungieren die Adern als Leiter für Nervenimpulse und sensorische Informationen von den Sensillen zurück zum Körper und vom Körper in den Flügel. Die Tracheen sorgen für den Gasaustausch,

<sup>22</sup> Chapman (1998). S.185.225

<sup>23</sup> ScienceDirect. Beyond aerodynamics: The critical roles of the circulatory and tracheal systems in maintaining insect wing functionality. 12.09.2023

<sup>24</sup> Oxford Academic. Circulation in Insect Wings. 21.08.2023

<sup>25</sup> Chapman (1998). S.185-225

<sup>26</sup> Wikipedia. Hautflügler. 21.08.2023

<sup>27</sup> Hier und im Folgenden: Oxford Academic. Circulation in Insect Wings. 21.08.2023

genauer für die Versorgung mit Sauerstoff und den Abtransport von Kohlenstoffdioxid.<sup>28</sup> Über winzige Kanäle im Integument nehmen die Tiere Sauerstoff aus der Luft auf und geben Kohlenstoffdioxid ab.

### 3.4 Der schematische Aufbau eines Flügelgeäders

Der Ursprungsort aller Längsadern sind die Flügelgelenke, über welche die Flügel mit dem Thorax verbunden sind.<sup>29</sup> Adern, die auf einer Wölbung liegen, nennt man konvexe Adern. Adern, die sich in einer Mulde befinden, nennt man konkave Adern.<sup>30</sup> Durch die Evolution sind jedoch alle konkaven Adern, bis auf die Subcosta, bei den Hautflüglern verloren gegangen.<sup>31</sup> Die Benennung und Aufteilung der Adern beruhen auf dem Comstock-Needham-System. Wie auf der nachfolgenden Abbildung dargestellt können sich die Hauptadern (Costa, Subcosta, Radius, Radial Sektor, Media (Anterior Media, Posterior Media), Anterior Cubitus, Posterior Cubitus, Anal) beliebig oft verzweigen. Die aus den Verzweigungen entstehenden Adern werden mit aufsteigenden Nummern versehen. Die Queradern (engl. cross-vein) können willkürlich verteilt sein, auf der Abbildung unten sind lediglich vier als Beispiel eingezeichnet. Die Queradern werden nach den Hauptadern benannt, die sie verbinden, mit einigen wenigen Ausnahmen: Die Queradern zwischen der Costa und der Subcosta werden Humeral-Queradern genannt und die Queradern zwischen R<sub>3</sub> und R<sub>4</sub> Sektoral-Querader.

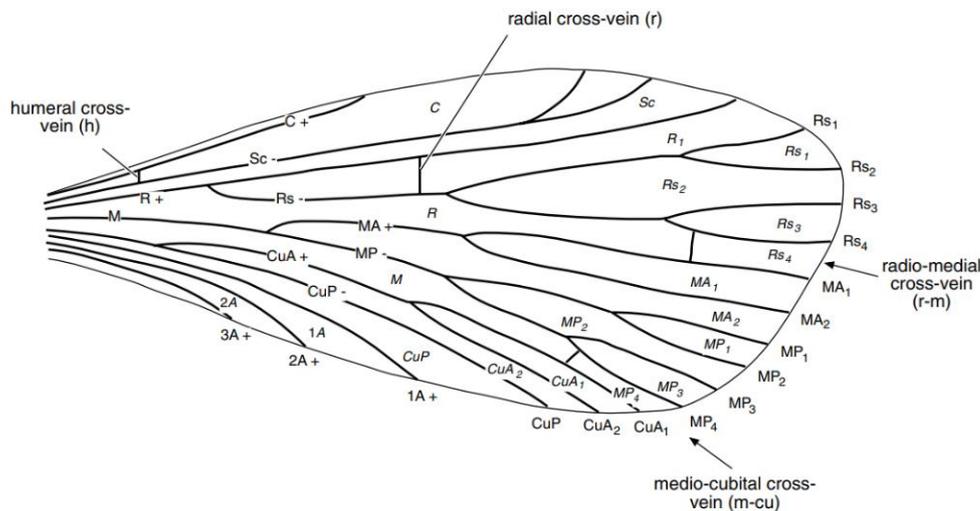


Abb. 3 Schematischer Aufbau Flügelgeäder

<sup>28</sup> Hier und im Folgenden: Wikipedia. Trachee. 12.09.2023

<sup>29</sup> Spektrum.de. Insektenflügel. 21.08.2023

<sup>30</sup> Chapman (2013). Edited by Simpson, Douglas. S. 195

<sup>31</sup> Wikipedia. Hautflügler. 21.08.2023

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Probenbeschaffung

Um an die Insektenflügel zu gelangen, welche Gegenstand der Untersuchung sind, mussten zuerst lebende Bienen, Wespen und Hummeln gefangen und getötet werden. Für die Untersuchung wurden Honigbienen verwendet, da diese, im Gegensatz zu vielen Arten von Wildbienen, nicht vom Aussterben bedroht sind. Als Wespen-Art wurden Gemeine Wespen gefangen, da diese die am häufigsten vorkommenden in Mitteleuropa sind. Aus demselben Grund wurden die Flügel von Erdhummeln verwendet. Um die Tiere anzulocken, wurde Sirup, ein Stück einer Frucht und etwas Speck in den blumenreichen Garten gestellt. Zudem wurde auf Blumenfeldern nach Tieren Ausschau gehalten. Gefangen wurden die Bienen, Wespen und Hummeln mit einer «Znünibox». Die Tiere mussten lebendig sein, damit die Garantie da war, dass die Flügel nicht bereits durch den Kontakt mit dem Boden verschmutzt und kaputt waren. Getötet wurden die Tiere, indem sie in den Gefrierschrank gestellt wurden, da Erfrieren einer der schmerzlosesten Tode sein soll. Danach wurde den Tieren mit einer feinen Schere der Flügel abgeschnitten und dieser mit einer Pinzette auf einen Probentisch geklebt. Dabei durfte der Flügel nicht gross berührt werden, um ihn nicht zu beschädigen.

### 4.2 Lasermikroskop

Für den Probeversuch und um zu entscheiden, was genau untersucht wird, wurde nebst dem Rasterelektronenmikroskop (vgl. Kapitel 4.3) auch das Lasermikroskop verwendet. «VK-X1000» von der Firma Keyence ist das Modell, welches die Universität Basel besitzt und mit dem ich die Bilder aufgenommen habe. Das Modell hat fünf verschiedene Vergrößerungen: 5-fach, 10-fach, 20-fach, 50-fach und 150-fach. Mit dem «VK-X1000» kann man mit dem Laser ein Bild aufnehmen, welches in allen Ebenen scharf ist. Am Ende des Vorgangs wird das Präparat mit weisem Licht gescannt, was dazu führt, dass das Bild realitätsgetreu farbig ist. Der Laser eines solchen Lasermikroskops hat eine Wellenlänge von 404 nm.<sup>32</sup>

Nicht weiter verfolgt wurden die Untersuchungen mit dem Lasermikroskop, weil die Auflösung und Tiefenschärfe mit dem Rasterelektronenmikroskop besser ist und die Zeit, um Bilder mit beiden Mikroskopen zu machen, nicht reichte.

---

<sup>32</sup> Keyence, Steuerung VK-X1000. (28.06.2023)

## 4.3 Rasterelektronenmikroskop

### 4.3.1 Funktionsweise

Das Rasterelektronenmikroskop, auch REM genannt, wird genutzt, um Bilder eines Präparats mit einer hohen Schärfentiefe zu erzeugen.<sup>33</sup> Im Rasterelektronenmikroskop können nur trockene Proben oder mit Stickstoff schockgefrorene Kryoproben abgebildet werden.<sup>34</sup> Der Elektronenstrahl hat eine Wellenlänge von etwa 5 Nanometern.<sup>35</sup> Dadurch kann man im Rasterelektronenmikroskop Auflösungen von bis zu 10 Nanometern erreichen. Im Innenraum des REMs herrscht ein Vakuum, damit die Elektronen des Elektronenstrahls auf dem Weg zum Präparat und die Sekundärelektronen vom Präparat weg zum Detektor nicht abgelenkt werden. Ebenfalls ein Vakuum herrscht bei der sogenannten Gun, von welcher aus der Elektronenstrahl kommt. Beim Auftreffen des gebündelten Elektronenstrahls auf das präparierte Präparat werden Sekundärelektronen aus den Schalen geschlagen und die Elektronen des Elektronenstrahls nehmen den Platz auf der Schale ein. Diese Sekundärelektronen werden von einem Detektor registriert. Dieser erstellt daraus ein dreidimensionales Bild. Der gebündelte Elektronenstrahl fährt das Präparat in einem vorgegebenen Raster ab.

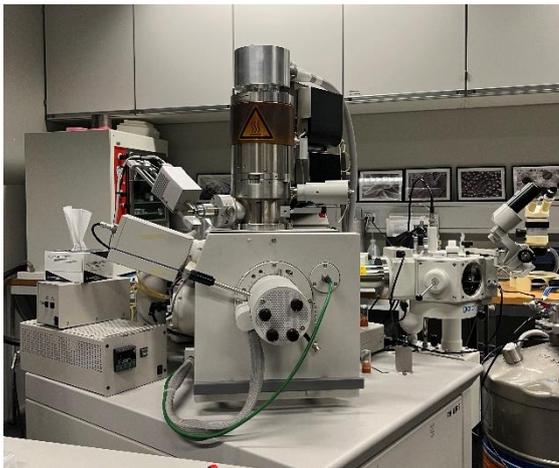


Abb. 4 Rasterelektronenmikroskop der Universität Basel



Abb. 5 Innenraum des Rasterelektronenmikroskops, mit Detektor und Probentisch

<sup>33</sup> Hier und im Folgenden: Wikipedia, Rasterelektronenmikroskop. (28.06.2023) Ebenso: Lichtmikroskop.net, Rasterelektronenmikroskop. (28.06.2023)

<sup>34</sup> Susanne Erpel (REM-Operateurin an Uni Basel)

<sup>35</sup> Hier und im Folgenden: Uni-frankfurt.de. Rasterelektronenmikroskopie. 24.09.2023

### 4.3.2 Probenvorbereitung

Bevor das Präparat im REM untersucht werden kann, muss es mit einer dünnen Goldschicht versehen werden. Dieser Vorgang wird «Besputtern» genannt. Dies wurde im Gerät «LEICA EM ACE600» durchgeführt. Die Proben wurden auf eine kreisförmige Metallplatte gesteckt, die Tür geschlossen und die Luft aus dem Innenraum herausgepumpt, so dass ein Vakuum entsteht. Währenddessen wurde auf dem Display eingestellt, mit was die Proben beschichtet werden sollen und wie dick die Schicht werden soll. In diesem Fall mit 20 nm Gold. Danach wird die Platte mit den Proben nach oben gefahren, gekippt und die Platte, aber auch die einzelnen Proben, fangen an, sich zu drehen. Gleichzeitig wird die Kammer mit Argon Gas gefüllt. Ist die Kammer voll, wird eine Spannung angelegt. Die positiv geladenen Argon-Gas-Ionen werden von der Goldfolie, der Kathode, angezogen. Dort spicken Teilchen der Goldfolie ab, die sich als feiner Goldstaub auf den Proben absetzen.

Das Präparat muss mit einer Goldschicht überzogen werden, um störende Aufladungen zu vermeiden.<sup>36</sup> Die Goldschicht führt dazu, dass nichtleitende Proben eine geringe Leitfähigkeit erhalten und so elektrische Aufladungen vermieden werden können. Ein weiterer Grund, die Probe zu vergolden, ist: Das Rasterelektronenmikroskop misst die Sekundärelektronen, also die Elektronen, die aus der Probe bzw. den Molekülen, aus denen die Probe besteht, herausgeschlagen werden. Da es sich bei den Proben dieser Arbeit um etwas Biologisches handelt und fast alles Biologische aus Kohlenstoff aufgebaut ist, der nur sehr wenige Elektronen besitzt, braucht es das Gold, welches sehr viele Elektronen besitzt. Dadurch ist eine grössere Signalausbeute gewährleistet, was wiederum zu einer besseren und schärferen Bildqualität führt.



Abb. 6 Besputtern der Proben



Abb. 7 Proben mit 20 nm Gold

<sup>36</sup> Hier und im Folgenden: Wiley Analytical Science Magazin, REM-Proben ohne Gold-Bedampfung (28.06.2023) Ebenso: Universitätsmedizin Rostock, Präparation REM (28.06.2023)

#### 4.4 Durchgeführte Messungen

In den nachfolgenden Tabellen sind alle durchgeführten Messungen an den Flügeloberflächen und Querschnitten dargestellt.

<b>Bienen</b>	B1	B2	B3	B4	B5	BL (4)
	Alle Angaben in [ $\mu\text{m}$ ]					
Flügellänge	9470	9390	9140	9550	9130	9500
Flügelbreite an schmaler Stelle	720	738	687	751	771	700
Flügelbreite an breiter Stelle	3320	3100	3270	3120	3230	3170
Anzahl Queradern	7	7	7	7	7	7
Dicke der Adern in Nähe der Flügelbasis	115	105.5	115.3	112.3	115	114
Dicke der Adern in Nähe des Scheitelrandes	38	36.4	36.15	30.1	36.3	29.5

*Tab. 1 Messungen Bienenflügel*

<b>Wespen</b>	W1	W2	W3	W4	W5	WL (4)
	Alle Angaben in [ $\mu\text{m}$ ]					
Flügellänge	10719	8010	12010	11440	11510	11380
Flügelbreite an schmaler Stelle	741	630	859	924	779	946
Flügelbreite an breiter Stelle	3270	2460	3870	3980	3890	3800
Anzahl Queradern	8	8	8	8	8	8
Dicke der Adern in Nähe der Flügelbasis	98.7	108.6	114	102	116	103
Dicke der Adern in Nähe des Scheitelrandes	38.1	32.45	28.9	34.35	29.9	34.8

*Tab. 2 Messungen Wespenflügel*

<b>Hummeln</b>	H1	H2	H3	H4	H5	HL (1)
	Alle Angaben in [ $\mu\text{m}$ ]					
Flügel <span>länge</span>	12300	12650	12990	14200	12170	12110
Flügel <span>breite an schmal-</span> ter Stelle	792	851	938	1250	1190	789
Flügel <span>breite an breitester</span> Stelle	4370	4481	4780	5110	4600	4480
Anzahl Quer <span>adern</span>	9	9	9	9	9	9
Dicke der Adern in Nähe der Flügel <span>basis</span>	164	173	187.5	184	208	169
Dicke der Adern in Nähe des Scheitel <span>randes</span>	38.9	39.25	42	53.3	49.3	38.4

*Tab. 3 Messungen Hummelflügel*

<b>Biene</b>	Ader 1	Ader 2	Ader 3	Ader 4
	Alle Angaben in [ $\mu\text{m}$ ]			
Breite Aderhohlraum	18.7	20.7	16.09	-
Höhe Aderhohlraum	3.95	5.06	4.88	-
Flügeldicke oberhalb Ader	1.91	1.55	1.79	-
Flügeldicke unterhalb Ader	1.81	1.52	1.86	-
Flügeldicke neben Ader	1.41	1.5	1.49	-

Tab. 4 Messungen Querschnitt Bienenflügel

<b>Wespe</b>	Ader 1	Ader 2	Ader 3	Ader 4
	Alle Angaben in [ $\mu\text{m}$ ]			
Breite Aderhohlraum	30.5	15.5	15.2	19.3
Höhe Aderhohlraum	15.7	10.6	8.7	6.13
Flügeldicke oberhalb Ader	11	3.5	3.91	2.17
Flügeldicke unterhalb Ader	8.15	3.46	2.5	1.93
Flügeldicke neben Ader	4.5	2	2.01	1.78

Tab. 5 Messungen Querschnitt Wespenflügel

<b>Hummel</b>	Ader 1	Ader 2	Ader 3	Ader 4
	Alle Angaben in [ $\mu\text{m}$ ]			
Breite Aderhohlraum	30.9	31	29.9	29.1
Höhe Aderhohlraum	16.3	15.8	17.1	10
Flügeldicke oberhalb Ader	9.02	8.97	7.19	5.58
Flügeldicke unterhalb Ader	8.2	7.8	6.38	7.12
Flügeldicke neben Ader	2.09	3.6	5.2	3.96

Tab. 6 Messungen Querschnitt Hummelflügel

## 5 Resultate

### 5.1 Geometrie der Flügel

Anhand der oben angeführten Messungen wird klar ersichtlich, dass die Bienenflügel flächenmässig die kleinsten sind, die Wespenflügel die zweitkleinsten und die Hummelflügel die grössten. Die mittlere Flügellänge und Breite an der breitesten Stelle betragen bei Bienen 9363  $\mu\text{m}$  und 3202  $\mu\text{m}$  (vgl. Tab. 1), respektive bei Hummeln 12737  $\mu\text{m}$  und 4637  $\mu\text{m}$  (vgl. Tab. 3). Die mittlere Flügellänge und Breite an der breitesten Stelle der Wespen liegen mit 10844.8  $\mu\text{m}$  und 3545  $\mu\text{m}$  (vgl. Tab. 2) zwischen den beiden anderen Arten. Auch die Mittelwerte der anderen Messungen belegen, dass die Hummel die grössten Flügel aufweist. Betrachtet man die Form der Flügel, fällt auf, dass jeder Flügel individuell ist. Sie haben zwar alle eine ähnliche Form, sind jedoch nicht deckungsgleich. Die Flügel sind an der Basis am schmalsten und werden nach aussen hin breiter. Das Verhältnis der Länge zur Breite der Flügel ist bei allen Arten näherungsweise 3:1. Die Breite des Flügels hängt demnach mit der Länge des Flügels zusammen. Dies belegt, dass die Proportionen der Flügel der drei Arten übereinstimmen.

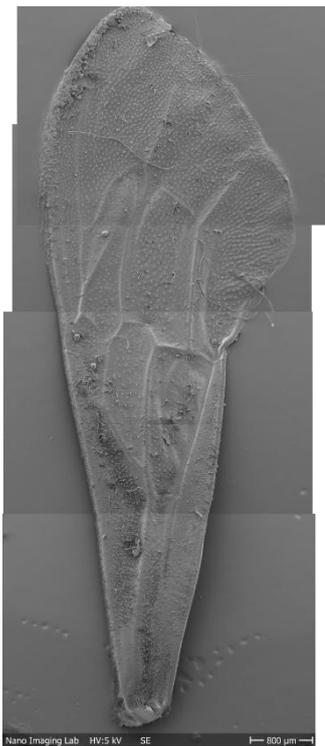
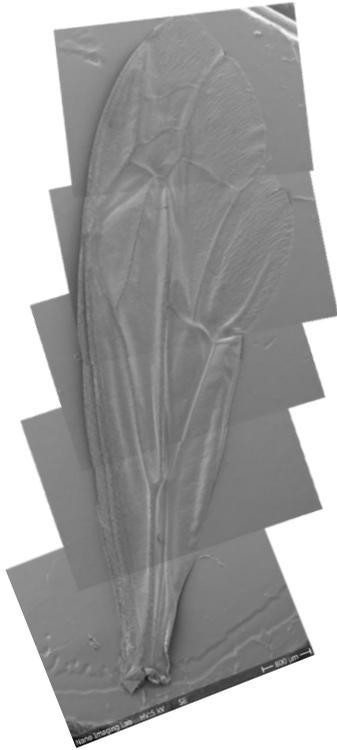


Abb. 8 Bienenflügel 1



Abb. 9 Bienenflügel 3



*Abb. 10 Wespenflügel 1*

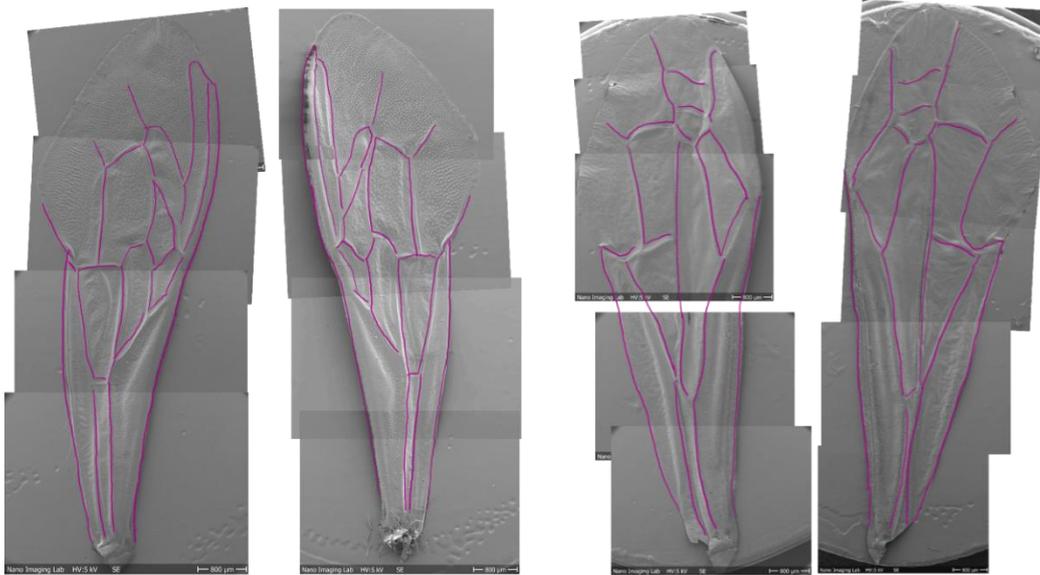


*Abb. 11 Hummelflügel 5*

## 5.2 Grad der Flügelsymmetrie eines Individuums

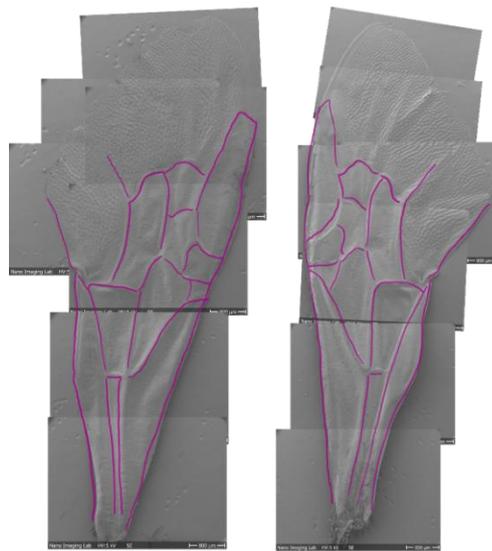
Durch die Analyse der Bilder hat sich ergeben, dass bei allen drei untersuchten Arten eine Flügelsymmetrie zwischen dem rechten und dem linken Flügel vorhanden ist. Die beiden Flügel sind sowohl in Bezug auf die Geometrie als auch das Adernmuster symmetrisch. In den Tabellen wird ersichtlich, dass es zwischen dem linken und rechten Flügel oft nur eine sehr kleine Differenz gibt. Dies kann auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein (vgl. Kapitel 6). Auf den Abbildungen Abb. 12, Abb. 13 und Abb. 14, auf der folgenden Seite, ist jeweils links der linke Flügel des Tieres zu sehen und rechts der rechte Flügel. Auf diesen Bildern wird die Symmetrie des Adernmusters veranschaulicht. Man erkennt, dass das Adernmuster auf den beiden Flügeln, wie die Linien auf den Handflächen von Menschen, einer vertikalen Spiegelung entspricht.

Für die Abbildungen Abb. 12, Abb. 13 und Abb. 14 gilt der Massstab:  $\text{---} 800 \mu\text{m}$



*Abb. 12 Symmetrie Adernmuster Bienenflügel*

*Abb. 13 Symmetrie Adernmuster Wespenflügel*



*Abb. 14 Symmetrie Adernmuster Hummelflügel*

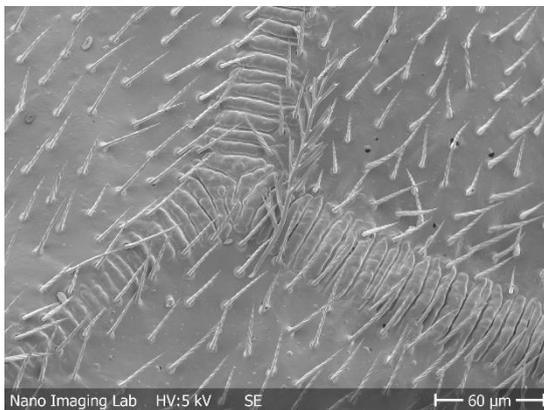
### 5.3 Variabilität innerhalb einer Art

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass keine relevanten Variabilitäten betreffend Adernmuster und Geometrie innerhalb einer Art gefunden wurden. Fokussiert man auf das Adernmuster, ist zu erkennen, dass die Anzahl an Queradern innerhalb jeder der drei untersuchten Arten konstant ist. Es ist nahezu unmöglich, die Flügel einer Art allein an den Adern auseinander zu halten. Denn nicht nur die Anzahl, sondern auch die Anordnung der Adern ist exakt die gleiche. Alle Flügel

haben etwa die gleiche Form, aber trotzdem ist jeder Flügel individuell mit kleinen Einbuchtungen oder Ausstülpungen entlang des Umrisses. Wenn ein Blick auf die Geometrie geworfen wird, kann festgestellt werden, dass sich die Flügel auch in ihren Proportionen kaum unterscheiden.

Dennoch sind nicht alle Werte, die aus den Messungen resultierten, genau die gleichen. Daran sieht man, dass es trotzdem Unterschiede gibt, was die Grösse der Flügel betrifft. Die gemessenen Längen und Breiten bei den Honigbienen variieren um 4.4% respektive 6.4%. Bei den Hummeln variieren sie zwischen 14.7% respektive 14.5%. Bei den Wespen sogar um 33.3% respektive 38.2%. Ob diese Grössenunterschiede genetisch bedingt sind, wie bei den Menschen, oder ob sie darauf zurückzuführen sind, dass Insekten im Verlaufe ihres Lebens wachsen, kann aus den Untersuchungen dieser Arbeit nicht ergründet werden.

Bei den Wespen unterscheiden sich die Adern, die geripgelt sind. Sie unterscheiden sich nicht in der Lage, sondern in ihrem nach aussen hin sichtbaren Aufbau, nämlich der einzelnen Segmente. Die Segmente sind nicht alle gleich gross und haben nicht alle die gleiche Form. Dementsprechend lassen sich die Wespenflügel auseinanderhalten, wenn man eine Nahaufnahme von Adern hat, die aus solchen Segmenten aufgebaut sind. Dies ist auf den folgenden beiden Abbildungen Abb. 15 und Abb. 16 ersichtlich, welche einen bezüglich der Lage auf dem jeweiligen Flügel identischen Bildausschnitt zeigen.



*Abb. 15 Wespe 1 gerippelte Adern*



*Abb. 16 Wespe 2 gerippelte Adern*

## 5.4 Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Arten

### 5.4.1 Gemeinsamkeiten

Alle drei Arten haben ein stark reduziertes Adernmuster im Vergleich zum schematischen Aufbau des Flügelgeäders (siehe Kapitel 3.2) von Comstock und Needham. Bei den Bienen, Wespen und Hummeln entspringen dem Flügelgelenk vier Hauptadern, während es beim schematischen Flügelgeäder acht Hauptadern sind. Dementsprechend können sich nur vier Adern verzweigen. Deshalb haben die untersuchten Insekten auch distal viel weniger Adern als auf der schematischen Darstellung dargestellt.

Die Differenz zwischen dem kleinsten mittleren Wert der distal gelegenen Adern, dem der Wespen mit 33.1  $\mu\text{m}$ , und dem grössten mittleren Wert, dem der Hummel mit 43.5  $\mu\text{m}$ , beträgt 10.4  $\mu\text{m}$ . Die Differenz zwischen dem kleinsten mittleren Wert der proximal gelegenen Adern, dem der Wespen mit 107.05  $\mu\text{m}$ , und dem grössten mittleren Wert, dem der Hummel mit 180.9  $\mu\text{m}$ , beträgt 73.85  $\mu\text{m}$ . Daraus kann man schliessen, dass die Dicke der Adern in der Nähe des Scheitelrandes nicht von der Grösse der Flügel abhängig ist. Egal, wie dick die Adern in der Nähe der Flügelbasis sind, in der Nähe des Scheitelrandes sind diese ähnlich gross. Es kann sein, dass es für die Funktionalität der Adern eine untere Grenze für den Durchmesser gibt. Es ist zu erwarten, dass die Hämolymphe aufgrund ihrer Viskosität eine gewisse Aderngrösse braucht, um ungehindert fließen zu können. So gesehen würde ein minimaler Durchmesser durchaus Sinn ergeben.

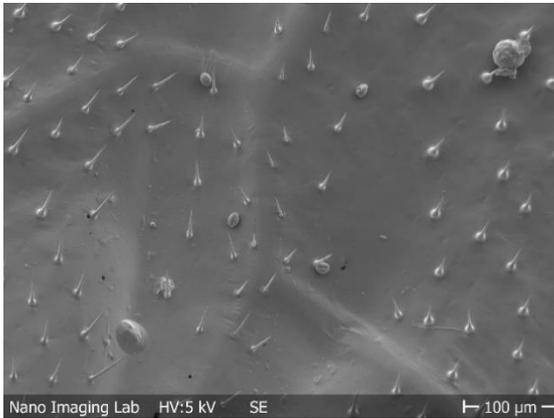
### 5.4.2 Unterschiede

Ein sehr prägnanter Unterschied konnte zwischen den Adern der Wespen und den Adern der anderen beiden Arten festgestellt werden. Die distal gelegenen Adern von Bienen und Hummeln weisen eine eher glatte Oberfläche auf und sind durchgängig, wie auf den Abbildungen Abb. 17 und Abb. 18, auf der nächsten Seite, zu erkennen ist. Betrachtet man die Abbildung Abb. 19, stellt man fest, dass die Adern der Wespen nicht diese glatte Oberfläche besitzen. Im Gegensatz zu denen der Bienen und Hummeln, sind die distal gelegenen Adern von Wespen aus einzelnen Segmenten zusammengesetzt, was den Adern eine wellenartige Oberfläche verleiht. Dennoch haben auch die Bienen und Hummeln vereinzelt Adern, die teilweise in einer solchen gerippten Form vorliegen. Jedoch sind dies nur ganz wenige Queradern, die in der Mitte gerippt sind und sonst dieselbe glatte Oberfläche haben, wie die restlichen Adern. Diese Segmente steigern die Flexibilität des Flügels.<sup>37</sup> Es wurde beobachtet, dass nach dem Erfrieren der Tiere die Flügel der Wespen einmal längs gefaltet waren. Die Flügel der Bienen und Hummeln hingegen waren zwar über dem Rücken, jedoch nicht gefaltet.

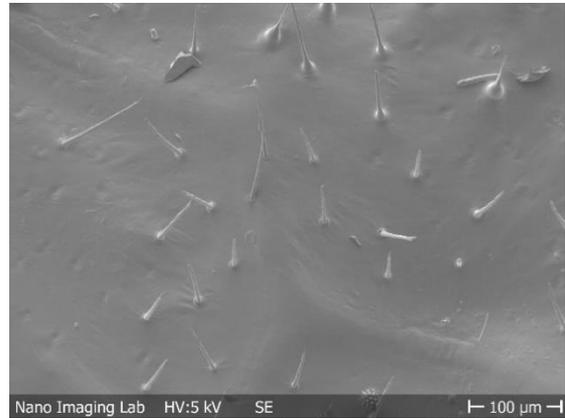
---

<sup>37</sup> Chapman (1998). S.205

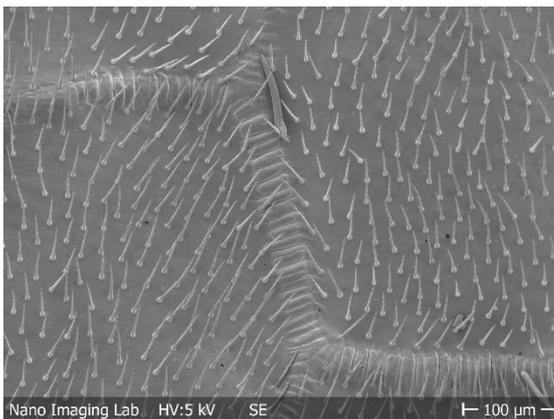
In der Aufsicht der Flügel wurde die Differenz zwischen dem Durchmesser der breitesten und der schmalsten Ader gemessen, diese beträgt bei den Bienen 65.1  $\mu\text{m}$ , während die Differenz bei den Hummeln doppelt so gross ist mit 137.4  $\mu\text{m}$ .



*Abb. 17 Adern Bienenflügel*



*Abb. 18 Adern Hummel Flügel*



*Abb. 19 Adern Wespenflügel*

Des Weiteren unterscheiden sich die Arten in ihrem für ihre Art spezifischen Adernmuster. Das Adernmuster unterscheidet sich einerseits in der Anzahl der Queradern (vgl. Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3). Andererseits unterscheidet es sich auch in der Ausdehnung über den Flügel. Während das Adernsystem bei den Wespen fast bis zum Scheitelrand verläuft, hört es bei den Bienen und Hummeln bereits vor dem Erreichen des Scheitelrandes auf, beziehungsweise ist in den REM-Bilder nicht mehr erkennbar.

Sensillen sind zwar nicht das Thema dieser Arbeit, jedoch ist beim Analysieren der Bilder aufgefallen, dass die Wespen bedeutend mehr Sensillen auf der Oberseite der Flügel tragen als die Bienen und Hummeln, wie auf den Abbildungen Abb. 17, Abb. 18 und Abb. 19 zu sehen ist. Zudem sind die Sensillen der Wespen länger und stärker gezwirbelt.

### 5.4.3 Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Querschnitte

Es wurde versucht, den Schnitt durch die Flügel für die Querschnitte immer mit dem gleichen Abstand zur Flügelbasis auszuführen. Auf den Bildern der Querschnitte konnte die in der Theorie beschriebene Verdickung des Integuments rund um die Adern beobachtet werden. Die Messungen zeigen, dass die Flügeldicke neben den Adern immer kleiner ist als ober- und unterhalb der Adern (vgl. Tab. 4, Tab. 5 und Tab. 6). Die Messungen haben ebenfalls ergeben, dass der Hummelflügel am dicksten ist mit einer durchschnittlichen Dicke von  $3.71 \mu\text{m}$ . Die durchschnittliche Flügeldicke des Bienenflügels ist  $1.47 \mu\text{m}$  und die des Wespenflügels  $2.57 \mu\text{m}$ .

Weitere Beobachtungen an den Adern waren nicht Ziel führend, da lediglich zu erkennen war, dass es sich um einen Hohlraum handelt. Die weiteren Bestandteile, der Nerv und der Tracheenast, konnten nicht beobachtet werden. Mögliche Gründe sind in Kapitel 6 aufgeführt.

## 5.5 Korrelationen

Eine durchschnittliche Honigbiene wiegt gerade mal  $0.115\text{g} - 0.128\text{g}$ .<sup>38</sup> Eine Wespe wiegt zwischen  $0.029\text{g}$  und  $0,159\text{g}$ .<sup>39</sup> Eine Erdhummel wiegt zwischen  $0.05\text{g}$  und  $0.4\text{g}$ .<sup>40</sup> Damit lässt sich erklären, dass Honigbienen und Wespen eine kleinere Flügelfläche haben als Hummeln, denn die Flügel der Bienen und Wespen müssen ein viel geringeres Gewicht tragen als die Flügel der Hummel. Bei Bienen und Wespen korreliert die Flügelgröße nicht bemerkenswert mit dem Gewicht.

Die Flügelschlagfrequenz von Bienen beträgt  $180-250$  mal pro Sekunde, respektive von Wespen  $117-247$  mal pro Sekunde, respektive von Hummeln etwa  $200$  mal pro Sekunde.<sup>41</sup> Da sich diese Werte zu ähnlich sind, kann zwischen der Flügelschlagfrequenz und der Flügelgröße oder dem Adernmuster keine Korrelation hergestellt werden.

Die Fluggeschwindigkeit von Bienen beläuft sich auf  $6.7 \text{ms}^{-1}$  bis  $8.9 \text{ms}^{-1}$ .<sup>42</sup> Die von Wespen beläuft sich auf  $2.6 \text{ms}^{-1}$  bis  $13.4 \text{ms}^{-1}$ .<sup>43</sup> Hummeln fliegen nur mit einer Geschwindigkeit von  $3 \text{ms}^{-1}$  bis  $4.5 \text{ms}^{-1}$ .<sup>44</sup> Die viel langsamere Maximal-Geschwindigkeit der Hummel lässt sich durch das grössere Gewicht erklären. Die hohe Maximal-Geschwindigkeit der Wespe könnte die

---

<sup>38</sup> National Center of Biotechnology Information. Breakfast Canyon discovered in honeybee hive weight curves. 27.09.2023

<sup>39</sup> National Center of Biotechnology Information. Wasp size and prey load *Cerceris fumipennis*. 27.09.2023

<sup>40</sup> Bumblebee.org. *Bombus terrestris* (buff-tailed bumblebee) and *lucorum* (white-tailed bumblebee). 27.09.2023

<sup>41</sup> PNAS. Short-amplitude high-frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight. 27.09.2023. Ebenso: Landcare Research. Frequently asked questions: How many times does a wasp beat its wings every second? 27.09.2023. Ebenso: Animal Dynamics. How do bumblebee's fly. 27.09.2023

<sup>42</sup> British Beekeepers Association. How fast can honeybees fly?. 27.09.2023

<sup>43</sup> School of bees. How fast can bees, yellow jackets, hornets, and wasps fly?. 27.09.2023

<sup>44</sup> Bumblebee.org. Bumblebee wings. 27.09.2023

Erklärung dafür sein, weshalb die Adern der Wespen bis hin zum Scheitelrand verlaufen, beziehungsweise bis dort sichtbar sind. Denn je schneller ein Insekt fliegt, desto grösser ist der Luftwiderstand, gegen den der Flügel ankämpfen muss, und desto stabiler muss der Flügel sein.

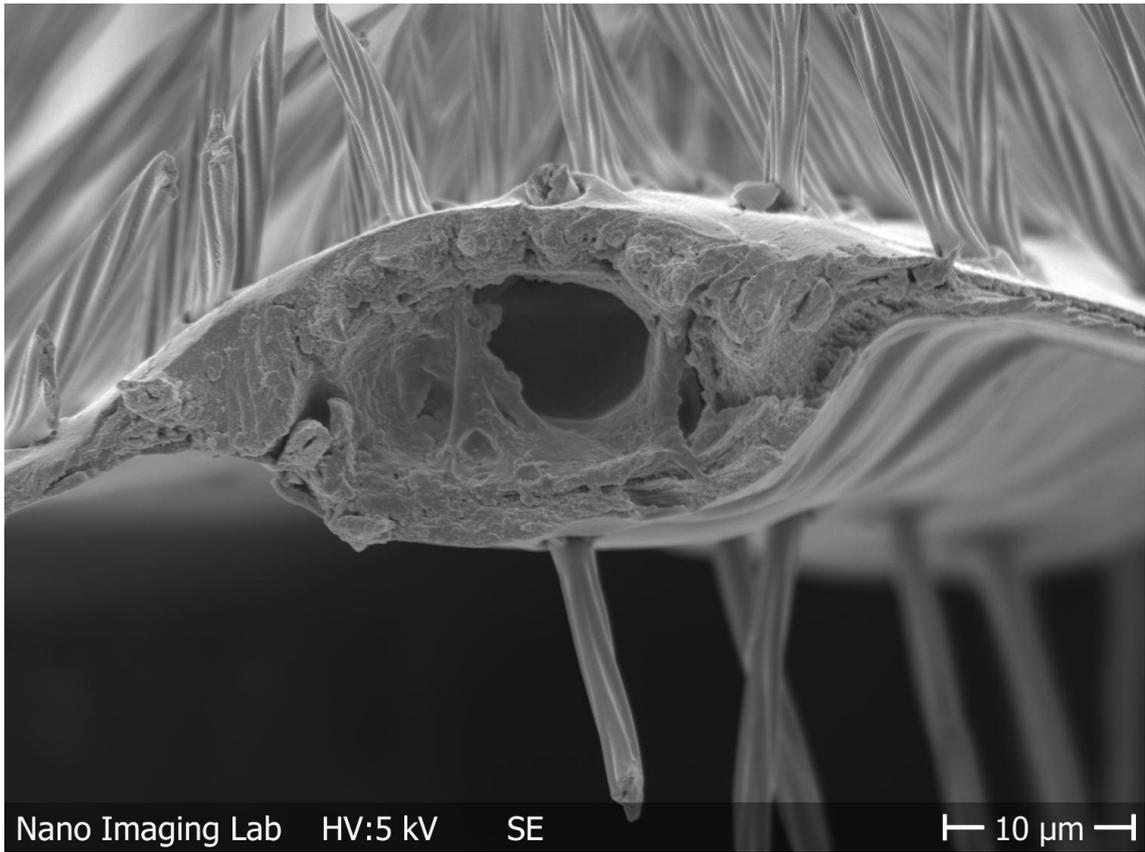
Das Flugverhalten der Wespen ist viel hektischer und unruhiger als das der Bienen und Hummeln. Dies könnte der Grund sein für die gerippten, also aus Segmenten aufgebauten Adern. Denn durch das aufgeregtere Flugverhalten kann es sein, dass die Wespen mit ihren Flügeln öfter als Bienen und Hummeln an Hindernissen ankommen. Ohne die erhöhte Flexibilität würden die Flügel in einem solchen Fall Schaden nehmen.

Vielleicht besteht ein Zusammenhang zwischen der Segmentstruktur der Umhüllung der Adern und diesem Flugverhalten, welches die Flügel stärker beanspruchen dürfte als beim Bienen- oder Hummelflug.

## 6 Diskussion

Die erste Hypothese, dass die Flügel eines Individuums symmetrisch sind, konnte anhand der Bilder bestätigt werden. Das Adernmuster und die Proportionen des Flügels sind dieselben, unabhängig davon, ob man den linken oder rechten Flügel betrachtet. Ebenso wurde die zweite Hypothese bestätigt. Alle Tiere einer hier untersuchten Art haben grundsätzlich die gleiche Flügelgeometrie und ein gleiches Adernmuster. Auch die Dicke der Adern unterscheidet sich von Flügel zu Flügel nicht gross. Es muss vermutet werden, dass die Unterschiede, die es gibt, auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind und darauf, dass nicht alle Tiere innerhalb einer Art gleich gross sind. Schliesslich konnte auch die dritte und letzte Hypothese mit der Arbeit bestätigt werden. Nicht alle Arten haben das gleiche Adernmuster, obwohl sie alle zur gleichen Unterordnung gehören, den Hymenoptera.

Zu beachten gilt, dass diese Arbeit eine pseudostatistische Untersuchung ist, da nur 5 Tiere pro Art zur Untersuchung genutzt wurden. Dementsprechend sind die Ergebnisse nicht statistisch aussagekräftig. Eine mögliche Fehlerquelle liegt beim Abtrennen der Flügel. Durch den Tod des Tieres haben die Flügel ihre Elastizität verloren und wurden trocken und zerbrechlich. Dies hat dazu geführt, dass die Flügel nicht alle exakt beim Flügelgelenk abgeschnitten werden konnten und dass bei der Abnahme des hinteren Flügels teilweise ein kleiner Teil des vorderen Flügels beim Rippenrand abgerochen ist. Eine weitere mögliche Fehlerquelle liegt beim Aufkleben der Flügel auf die Probenplatte. Besonders bei den Wespen, deren Flügel nach dem Einfrieren zusammengeklappt waren, war es sehr schwierig, die Flügel ohne Falten und ohne, dass ein Stück am Rand umgeklappt ist, aufzukleben. Ebenfalls unvermeidbare Ungenauigkeiten entstanden bei den Querschnitten, denn durch das Durchschneiden der Flügel wurde diese Stelle des Flügels gequetscht. Dadurch ist es schwierig, aussagekräftige Messungen zu machen, die wirklich der Realität eines mit Hämolymphe gefüllten Flügels entsprechen. Darüber hinaus muss bedacht werden, dass zwischen dem Fangen und dem Aufkleben auf den Probenplatte des ersten Tieres und des letzten Tieres mehrere Wochen vergangen sind. Da die Flügel aber aus organischem und somit abbaubarem Material sind, kann es sein, dass der Flügel an der Stelle, an der er abgeschnitten wurde, um den Querschnitt zu betrachten, bereits angefangen hat, sich zu zersetzen oder zu schimmeln. Das könnte ein weiterer Grund sein, weshalb auf den Bildern kein klarer Aufbau zu sehen ist. Auf dem folgenden Bild beispielsweise ist nicht mehr der ganze Adern-Hohlraum zu sehen. Der linke Teil davon ist entweder durch Quetschungen des Flügels verstopft, beim Aufkleben an den Kleber gekommen und verklebt oder von Schimmel befallen worden.



*Abb. 20 Querschnitt Wespenflügel*

## 7 Reflexion

Die Planung der Arbeit und den Zeitplan, den ich letzten März erstellt habe, fand ich dafür, dass ich dies zum ersten Mal gemacht habe, relativ gut. Er hätte detaillierter sein können, da ich besonders im Endspurt der Arbeit gemerkt habe, wie wichtig ein Zeitplan ist. Die Umsetzung der Planung hätte definitiv besser verlaufen können, vor allem in Anbetracht dessen, dass ich während der Sommerferien keine Zeit hatte, mich mit meiner Maturarbeit zu beschäftigen. Da dies jedoch meine allererste Arbeit in einem solchen Umfang ist, die ich allein schreiben musste, ist das Ergebnis zufriedenstellend und ich konnte vieles daraus lernen. Ebenso war die Entscheidung, eine Maturarbeit mit Bezug zu Sommerinsekten zu schreiben, wenn in den Sommerferien keine Zeit war und Wespen eher im Spätsommer eingefangen werden können, nicht abschliessend durchdacht. Es hat jedoch sehr grossen Spass bereitet, so eine Untersuchung durchzuführen und wissenschaftlich zu arbeiten. Zusätzlich hat mir meine Maturarbeit, einen Einblick in die Nanowissenschaften ermöglicht. Etwas, das ich unbedingt mitnehmen will aus dieser Arbeit, ist, dass es für eine erfolgreiche Untersuchung wichtig ist, sich bereits vor der Untersuchung Gedanken zu möglichen Fehlerquellen zu machen.

## **8 Danksagungen**

Selbstverständlich danke ich meiner Betreuungslehrperson Nicholas Wentzlaff. Besonders bedanken möchte ich mich dafür, dass er mir eine Arbeit mit einem solchen Mikroskop ermöglicht hat. Ein grosses Dankeschön geht an die Universität Basel, die mir ihr Lasermikroskop und ihr Rasterelektronenmikroskop zur Verfügung gestellt hat. Ebenfalls ein riesiges Dankeschön geht an Suanne Erpel, eine Nanowissenschaftlerin von der Universität Basel, die mich am REM betreut hat und mit mir einen Teil meiner Proben abgebildet hat und Evi Bieler, die mit mir zusammen die Bilder für den Probeversuch am Lasermikroskop erstellt hat. Ebenfalls danke ich meinen Eltern, die mich während des ganzen Prozesses, von der Themenfindung über das Schreiben bis zum Drucken und Binden der Arbeit, unterstützt haben.

## 9 Verzeichnis

### 9.1 Internetquellenverzeichnis

Animal Dynamics. How do bumblebee's fly. <https://www.animal-dynamics.com/blogs-news/how-do-bumblebees-fly/#:~:text=The%20key%20is%20the%20speed,those%20of%20birds%20and%20bats.> (27.09.2023)

Autocad-Magazin. Was Insektenflügel zum Vorbild für die Konstruktion machen könnte. <https://www.autocad-magazin.de/was-insektenfluegel-zum-vorbild-fuer-die-konstruktion-machen-koennte/> (24.09.2023)

Bionik.de. Faszination Bionik. <https://www.biokon.de/bionik/was-ist-bionik/#:~:text=Der%20Begriff%20Bionik%20setzt%20sich,Physikern%2C%20Chemikern%20und%20Materialforschern%20zusammen.> (24.09.2023)

British Beekeepers Association. How fast can honeybees fly?. <https://www.bbka.org.uk/faqs/how-fast-can-honey-bees-fly/#:~:text=The%20normal%20top%20speed%20of,%2C%20pollen%2C%20propolis%20or%20water.> (27.09.2023)

Bumblebee.org. Bombus terrestris (buff-tailed bumblebee) and lucorum (white-tailed bumblebee). <https://www.bumblebee.org/terr.htm#:~:text=Bombus%20lucorum%20workers%20weight%20range,and%20a%20distinctive%20yellow%20nose.> (27.09.2023)

Bumblebee.org. Bumblebee wings. <https://www.bumblebee.org/bodyWing.htm> (27.09.2023)

DocCheck Flexikon. Mechanorezeption. <https://flexikon.doccheck.com/de/Mechanorezeption> (10.09.2023)

DocCheck Flexikon. Propriozeptor. <https://flexikon.doccheck.com/de/Propriozeptor> (10.09.2023)

Keyence, Steuerung VK-X1000. [https://www.keyence.eu/dede/products/microscope/laser-microscope/vk-x100\\_x200/models/vk-x1000/](https://www.keyence.eu/dede/products/microscope/laser-microscope/vk-x100_x200/models/vk-x1000/) (28.06.2023)

Landcare Research. Frequently asked questions: How many times does a wasp beat its wings every second?. <https://www.landcareresearch.co.nz/discover-our-research/biodiversity-biosecurity/invasive-invertebrates/vespula-wasps/faq/#:~:text=How%20many%20times%20does%20a,and%20247%20beats%20per%20second.> (27.09.2023)

Lichtmikroskop.net, Rasterelektronenmikroskop. <https://www.lichtmikroskop.net/elektronenmikroskop/rasterelektronenmikroskop.php#:~:text=Beim%20REM%20wird%20die%20zu,auf%20einem%20Monitor%20anschauen%20kann.> (28.06.2023)

Nabu. Hautflügler. [https://niedersachsen.nabu.de/tiere-und-pflanzen/insekten/hautfluegler/index.html#:~:text=Von%20Bienen%2C%20Wespen%2C%20Hummeln%20und%20Hornissen&text=Den%20Namen%20Hautfl%C3%BCgler%20\(Hymenoptera\)%20hat,%C3%BCber%20dem%20Hinterleib%20zusammengelegt%20werden.](https://niedersachsen.nabu.de/tiere-und-pflanzen/insekten/hautfluegler/index.html#:~:text=Von%20Bienen%2C%20Wespen%2C%20Hummeln%20und%20Hornissen&text=Den%20Namen%20Hautfl%C3%BCgler%20(Hymenoptera)%20hat,%C3%BCber%20dem%20Hinterleib%20zusammengelegt%20werden.) (24.09.2023)

Nabu. Tipps und Tricks zum Insekten bestimmen. <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/aktionen-und-projekte/insektensommer/mitmachen/24349.html#:~:text=Die%20meisten%20erwachsenen%20Insekten%20besitzen,der%20Eichenbockk%C3%A4fer%20oder%20manche%20Schmetterlinge.> (27.08.2023)

National Center of Biotechnology Information. Breakfast Canyon discovered in honeybee hive weight curves. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6316558/#:~:text=The%20average%20weight%20of%20a,95%25%20percentile%20of%20249%20g.> (27.09.2023)

National Center of Biotechnology Information. Wasp size and prey load in *Cerceris fumipennis*. [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6164872/#:~:text=In%202014%2C%20data%20on%20a,26.139%3B%20p%20%3C%200.0001\).](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6164872/#:~:text=In%202014%2C%20data%20on%20a,26.139%3B%20p%20%3C%200.0001).) (27.09.2023)

Oxford Academic. Circulation in Insect Wings. <https://academic.oup.com/icb/article/60/5/1208/5900265> (21.08.2023)

PNAS. Short-amplitude high-frequency wing strokes determine the aerodynamics of honeybee flight. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0506590102#:~:text=For%20example%2C%20honeybees%20Apis%20mellifera,wings%20200%20times%20per%20second.> (27.09.2023)

ScienceDirect. Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite method. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010482598000183> (21.08.2023)

ScienceDirect. Beyond aerodynamics: The critical roles of the circulatory and tracheal systems in maintaining insect wing functionality. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1467803918300677> (12.09.2023)

School of bees. How fast can bees, yellow jackets, hornets, and wasps fly?. <https://schoolof-bees.com/how-fast-can-bees-yellow-jackets-hornets-and-wasps-fly/> (27.09.2023)

Spektrum.de. Hymenoptera. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/hymenoptera/33266> (24.09.2023)

Spektrum.de. Insektenflügel. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/insektenfluegel/34181> (21.08.2023)

Uni-frankfurt.de. Rasterelektronenmikroskopie. <https://www.bio.uni-frankfurt.de/43229358/einfuehrung.pdf> (24.09.2023)

Universitätsmedizin Rostock, Präparation REM. <https://emz.med.uni-rostock.de/ausstattung/paerparation-rem> (28.06.2023)

Wikipedia. Campaniforme Sensillen. [https://de.wikipedia.org/wiki/Campaniforme\\_Sensillen](https://de.wikipedia.org/wiki/Campaniforme_Sensillen) (10.09.2023)

Wikipedia. Flügel (Insekt). [https://de.wikipedia.org/wiki/Fl%C3%BCgel\\_\(Insekt\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Fl%C3%BCgel_(Insekt)) (27.08.2023)

Wikipedia. Hautflügler. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hautfl%C3%BCgler> (21.08.2023)

Wikipedia. Insekten. <https://de.wikipedia.org/wiki/Insekten#Systematik> (20.08.2023)

Wikipedia. Rasterelektronenmikroskop. <https://de.wikipedia.org/wiki/Rasterelektronenmikroskop> (28.06.2023)

Wikipedia. Trachee. [https://de.wikipedia.org/wiki/Trachee\\_\(Wirbellose\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Trachee_(Wirbellose)) (12.09.2023)

Wikipedia. Zweiflügler. <https://de.wikipedia.org/wiki/Zweifl%C3%BCgler> (11.09.2023)

Wiley Analytical Science Magazin, REM-Proben ohne Gold-Bedampfung. <https://analyticalscience.wiley.com/do/10.1002/gitfach.12748/> (28.06.2023)

Zoo Basel. Honigbienen Volk. <https://www.zoobasel.ch/de/tiere/tierlexikon/tierbeschreibung/179/honigbienen-volk/> (26.09.2023)

## 9.2 Literaturverzeichnis

Chapman, Reginald, Frederick. 1998. The Insects Structure and Function – 4<sup>th</sup> edition. Cambridge University Press. Cambridge. S. 185 – 225.

Chapman, Reginald, Frederick. 2013. The Insects Structure and Function – 5<sup>th</sup> edition. Edited by Stephen J. Simpson, Angela E. Douglas. Cambridge University Press. Cambridge. S.194-201

### 9.3 Abbildungsverzeichnis

Titelbild 1: Honigbiene. Wissenschaft.de. <https://www.wissenschaft.de/erde-umwelt/europaweit-erste-genbank-fuer-honigbienen/> (26.09.2023)

Titelbild 2: Gemeine Wespe. Fotocommunity. <https://www.fotocommunity.de/photo/gemeine-wespe-xdreamer/43793377> (26.09.2023)

Titelbild 3: Erdhummel. Naturetouch. <https://www.naturetouch.info/lexikon/detail/dunkle-erdhummel.html> (26.09.2023)

Abb.1: Schematische Darstellung Beugelinien. Chapman, Reginald, Frederick. 1998. The Insects Structure and Function – 4<sup>th</sup> edition. Cambridge University Press. Cambridge. S. 188

Abb.2: Schematischer Querschnitt Flügellader. Chapman, Reginald, Frederick. 1998. The Insects Structure and Function – 4<sup>th</sup> edition. Cambridge University Press. Cambridge. S. 185

Abb.3: Schematischer Aufbau Flügelgeäder. Chapman, Reginald, Frederick. 1998. The Insects Structure and Function – 4<sup>th</sup> edition. Cambridge University Press. Cambridge. S. 186

Abb. 4: Rasterelektronenmikroskop der Universität Basel. Selbst erstellt

Abb. 5: Innenraum des Rasterelektronenmikroskops, mit Detektor und Probenstisch. Selbst erstellt

Abb. 6: Besputtern der Proben. Selbst erstellt

Abb. 7: Proben mit 20 nm Gold. Selbst erstellt

Abb. 8: Bienenflügel 1. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 9: Bienenflügel 3. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 10: Wespenflügel 1 Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 11: Hummelflügel 5. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 12: Symmetrie Adernmuster Bienenflügel. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 13: Symmetrie Adernmuster Wespenflügel. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 14: Symmetrie Adernmuster Hummelflügel. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 15: Wespe 1 gerippte Adern. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 16: Wespe 2 gerippte Adern. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 17: Adern Bienenflügel. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 18: Adern Hummelflügel. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 19: Adern Wespenflügel. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

Abb. 20: Querschnitt Wespenflügel. Selbst erstellt mit REM der Universität Basel

#### **9.4 Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Messungen Bienenflügel. Selbst erstellt

Tab. 2: Messungen Wespenflügel. Selbst erstellt

Tab. 3: Messungen Hummelflügel. Selbst erstellt

Tab. 4: Messungen Querschnitt Bienenflügel. Selbst erstellt

Tab. 5: Messungen Querschnitt Wespenflügel. Selbst erstellt

Tab. 6: Messungen Querschnitt Hummelflügel. Selbst erstellt

## 10 Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig durchgeführt und keine anderen als die angegebenen Quellen, Hilfsmittel und Hilfspersonen beigezogen habe. Alle Textstellen in der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäss aus Quellen entnommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum Oberwil, 28.03.23

Unterschrift J. Sp.