



Masterarbeit

Titel der Masterarbeit

„Von der Grenzschicht auf dem Spinnenbein.“

„Entwicklung eines DPIV-Versuchsaufbaus und Darstellung der instationären Grenzschicht einer oszillierenden, inkompressiblen Laminarströmung auf einer ebenen Platte für biologisch relevante Messungen“

Verfasserin

Janine Johara Jägers

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (M.Sc.)

Wien, 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 878

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Masterstudium Verhaltens-, Neuro- und Kognitionsbiologie
UG2002

Betreuer:

Ao. Univ. – Prof. Axel Schmid

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Danksagung	3
Zusammenfassung	5
Abstract	6
1 Einführung	8
Motivation und Zielsetzung.....	11
2 Jagdposition von <i>Cupiennius salei</i>	13
2.1 Material und Methode.....	13
Bestimmung der Jagdposition.....	13
Präparation der Spinne	14
2.2 Ergebnisse	16
Bestimmung der Jagdposition.....	16
Präparation der Spinne	17
2.3 Diskussion.....	19
Bestimmung der Jagdposition.....	19
Präparation der Spinne	20
3 Die Entwicklung eines PIV Versuchsaufbaus	22
Was ist ein PIV.....	22
Anforderungen an das PIV für Messungen am Spinnenbein	23
Entwicklungsschritte des Versuchsaufbaus	24
3.1 Material und Methode.....	27
Versuchsaufbau – Digital Particle Image Velocimetry (DPIV)	27
Datenaufnahme	29
3.2 Ergebnisse	29
3.3 Diskussion.....	33
4 Charakterisierung der Grenzschicht	35

4.1 Material und Methode.....	35
Versuchsaufbau – Digital Particle Image Velocimetry (DPIV)	35
Datenaufnahme	35
Bestimmung der Einhüllenden von U [m/s] (Pappe und Glas)	36
Zeitliche Auflösung.....	38
4.2 Ergebnisse	39
Bestimmung der Einhüllenden von U [m/s]	39
Zeitliche Auflösung.....	41
4.3 Diskussion	45
Bestimmung der Einhüllenden von U [m/s]	45
Zeitliche Auflösung.....	47
Wie entsteht der Annulareffekt?	48
5 Wie sieht die Grenzschicht auf dem Spinnenbein aus?.....	51
5.1 Das Mathematische Modell von Humphrey <i>et al.</i>	51
5.2 Die Messungen am Spinnenbein von Barth <i>et al.</i>	53
5.3 Das natürliche Signal: Wie würde die Grenzschicht bei einem Fliegensignal aussehen?.....	56
6 Literaturverzeichnis	62
Anhang	64
Eidesstattliche Erklärung	78
Curriculum Vitae	79

Danksagung

Ich möchte mich zu aller erst bei allen Beteiligten bedanken, die mir während der Arbeit auf ganz unterschiedliche Art und Weise unterstützend zur Seite standen. Jede Hilfe war einzigartig und damit nicht höher- oder minderwertiger als die der anderen. Ich habe mich daher für eine alphabetische Reihenfolge der Danksagungen entschieden.

Professor Friedrich G. Barth: Ich möchte mich ausdrücklich für die unabdingbare Lebenserfahrung, die diese Arbeit mit sich gebracht hat, bedanken! Diese Arbeit hat mich für meine berufliche Laufbahn nachhaltig geprägt.

Ein besonderer Dank geht an **Professor Stefan Braun und Dr. Stefan Scheichl** vom Institut of Fluid Mechanics and Heat Transfer an der Technischen Universität Wien. Ich bedanke mich ausdrücklich für die hilfegebenden Gespräche und konstruktiven Diskussionen meiner Datensätze, sowie für die spontane und unkomplizierte Übernahme der Betreuung meiner Arbeit.

Mag. Lisa Fenk: Lisa! Was hätte ich nur getan ohne deine Physikkenntnisse und vor allem deiner Freundschaft! Auch dir möchte ich für sämtliche konstruktiven Kritiken und Anregungen danken!

Thomas Hoinkes: Ich danke dem weltbesten „Technischen Assistenten“ für sein unglaubliches Wissen, Engagement, Hilfsbereitschaft und für viele private Gespräche!

Ich danke **Dr. Christian Klopsch** für die anfänglichen Einweisungen und Hilfestellungen, die mir eine solide Grundlage für das Arbeiten mit einem DPIV gegeben haben.

Mag. Clemens Schaber: Ich möchte dir, lieber Clemens, für deine vielen konstruktiven Gespräche und ständige Hilfsbereitschaft während meiner Arbeit danken. Du warst mir immer mein liebster Zimmergenosse. Dein beruhigendes, ausgleichendes Gemüt ist unbezahlbar. Danke Clemens!

Professor Axel Schmid: Ich bedanke mich ausdrücklich für das einzigartige Engagement und für die Hilfe, die ich wahrlich gebraucht habe um dieser Arbeit ein Ende zu setzen. Vielen lieben Dank!

Walter Witek: Dir möchte ich danken für deine fruchtbaren Ideen und dein Engagement. Erst durch dein handwerkliches Geschick ist der Versuchsaufbau ein voller Erfolg geworden – vielen Dank!

Zu guter Letzt möchte ich mich bei **Mag. Maria Burgstaller, Miroslav Dragasev, Elisabeth Fritz-Palank, Mag. Rainer Müllan, Dr. Dirk Schorkopf, Ing. Andreas Szpetkowski, Professor Harald Tichy, Maria Wieser** und **Lydia Zopf** bedanken, für viele unvergessliche Grillabende, nette Gespräche und Aufmunterungen und einfach für eine wirklich unkomplizierte Atmosphäre am Institut. Es wird mir sehr schwer fallen eine Abteilung mit so vielen unterschiedlichen, aber sehr lebenswürdigen Mitmenschen zu verlassen.

Zusammenfassung

Die Wanderspinne *Cupiennius salei* (Keys. 1877) nimmt zum Beutefang eine charakteristische Lauerposition ein. Fliegt ein potenzielles Beutetier in Reichweite vorbei, springt sie hoch und fängt es aus der Luft. Laborversuche haben gezeigt, dass die Spinne diese Leistung auch blind, mit Hilfe von strömungssensitiven Mechanosensoren durchführen kann. Sie besitzt pro Bein ca. 100 Trichobothrien, welche die von Beutetieren und Fressfeinden verursachte Luftströmung detektieren. Bisherige theoretische Modelle haben gezeigt, dass verschiedene Längen der Sensillen auf verschiedene Frequenzbereiche ausgelegt sind. Hierbei soll die Ausbildung einer Grenzschicht auf dem Spinnenbein eine signifikante Rolle spielen. Die Grenzschicht wird mit steigender Frequenz kleiner, die kleineren Trichobothrien sind für höhere Frequenzen und die größeren für niedrigere Frequenzen konzipiert (Barth, 2001).

Unerwarteterweise trat bei Messungen der Grenzschicht der von Richardsons 1929 entdeckte Annulareffekt, anstatt der erwarteten stationären Grenzschicht auf. Durch die oszillatorische Bewegung des Lautsprechers entsteht eine zeitlich abhängige Grenzschicht, die sich innerhalb einer Periode stark in Größe und Geschwindigkeit ändert und ein Maximum im plattennahen Bereich aufweist. Das ursprüngliche Ziel dieser Arbeit, Messungen am Spinnenbein durchzuführen, die zeigen wie das Trichobothrium mit der Grenzschicht zusammen wirkt, wurde daher während der Messphase verworfen und neu definiert. Die aufgenommenen Daten entsprechen vollkommen der Theorie.

Das neue Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Grundlage für Messungen am Spinnenbein zu schaffen, mit der die Theorie experimentell überprüft werden kann. Hierzu wird zunächst die genaue Lauerposition bestimmt und eine Präparationsmethodik entwickelt, die es erlaubt, ein lebendes Tier in der Stellung ohne Spinnenhalter für DPIV-Messungen (Digital Particle Image Velocimetry) zu fixieren. Desweiteren wird ein Versuchsaufbau konstruiert, der es ermöglicht Grenzschichten räumlich und zeitlich, bei verschiedenen Frequenzen hochaufgelöst wiederzugeben und darzustellen. Für zukünftige Messungen am Spinnenbein bietet er die Möglichkeit, die Parameter schnell und einfach auszubauen und zu variieren.

Wie sich heraus stellte, sind die Winkel der Gelenke für alle acht Beine, während der Jagdposition, annähernd identisch: Femur-Patella: $137^\circ \pm 15$, Patella-Tibia: $186^\circ \pm 6$,

Tibia-Metatarsus: $157^\circ \pm 10$, Metatarsus-Tarsus: $209^\circ \pm 12$. Die Beine sind um die Spinne gleichmäßig verteilt. Mit der entwickelten Präparationsmethodik ist es gelungen, das Tier in dieser Position ohne Spinnenhalter zu fixieren.

Die Arbeit hat mit der Bestimmung der Lauerposition, der Entwicklung der Präparationsmethodik, sowie des Versuchsaufbaus und der Charakterisierung der Grenzschicht eine Grundlage geschaffen, die unabdingbar für nachfolgende Projekte ist.

Abstract

The wandering spider *Cupiennius salei* (Keys. 1877) captures prey by hunting. If an insect flies above the spider, it jumps from a characteristic lurk position into the air and catches the animal. Experiments have shown that the hunter is able to perform this in artificial blindness as well, relying on its mechanical sensory system, with which the spider detects the air stream. *Cupiennius salei* has approximately 100 sensors or trichobothria on each leg, with which the spider detects the airflow produced by the prey or by other hunters. Theoretical considerations indicate that different hair-lengths are tuned to distinct frequencies, and therefore dependent on a boundary layer above the spider's leg. The boundary layer gets higher by low frequencies and vice versa; the short trichobothria detect high frequencies and the long trichobothria detect the low (Barth, 2001).

During the measurements of the boundary layer it was found, that the layer is not as stable as expected but unstable and shows the Annulareffect, found by Richardson at 1929. The instability was caused by the oscillating movement of the speaker. A time-dependent boundary layer was created, which modifies its height and velocity over the period and possesses a maximum near the wall. Because of this new condition the original aim was changed from showing how the Trichobothria are interacting with the boundary layer to an illustration of this effect. The data produced from this study is consistent with theoretical background.

The aim of this work is now to build the fundamental framework to enable theoretical verification through informed experimentation. Therefore, the first step was to determine the exact hunting position of the spider. Following this, a methodology was created by which the spider would remain artificially sedentary. This enabled measurements with a DPIV (Digital Particle Image Velocimetry), where a loud speaker delivers the signal. In addition, an experimental set up is constructed to

determine the boundary layer in diverse frequencies with a high spatial and temporal resolution. Future experimental analysis on the spider's leg could be easily recreated, and the setup can be varied to expand experimental conditions.

This study shows that the ankles of the joints within one leg are approximately the same as the remaining legs as follows; Femur-Patella: $137^{\circ} \pm 15^{\circ}$, Patella-Tibia: $186^{\circ} \pm 6^{\circ}$, Tibia-Metatarsus: $157^{\circ} \pm 10^{\circ}$, Metatarsus-Tarsus: $209^{\circ} \pm 12^{\circ}$. The positions of the legs are equally distributed around the spider. The method described above was implemented in order to obtain this information.

Therefore, it is thought that this work will provide a robust, fundamental basis from which on can develop further experiments.

1 Einführung

Tagsüber versteckt sich die mittelamerikanische Wander- und Jagdspinne *Cupiennius salei* (Keyserling 1877) (Abb.: 1) in Schlupfwinkeln von Pflanzen. Aktiv



Abbildung 1: Adultes Weibchen von *Cupiennius salei* (Keyserling 1877)

wird sie erst wenn die Dämmerung einsetzt. Ist es soweit, entfernt sich *Cupiennius salei* von ihrer Ruhestätte und sucht sich einen geeigneten Beutefangplatz, meist auf dem äußeren Blattrand der Pflanze und wird ihrem Namen als „sit and wait“ Jäger gerecht. Fliegt nun ein potenzielles Beutetier in Reichweite über die lauernde Spinne, springt diese hoch und fängt das Insekt mit hoher Präzision aus der Luft

und verspeist es sogleich (Barth, 2001).

Laborversuche haben gezeigt, dass *Cupiennius salei* diese höchst beeindruckende Leistung auch ohne visuellen Input durchführen kann (Klopsch, 2010). Möglich ist das durch über 936 (± 31 s.d.) Mechanosensoren, die auf dem Tarsus, dem Metatarsus, der Tibia und der Pedipalpen der Spinne sitzen und die vom Beutetier erzeugte Luftströmung detektieren (Abb.: 2) (Barth *et al.*, 1993). *Cupiennius* besitzt die höchste bekannte Anzahl der Sensoren, was darauf schließen lässt, dass die Wahrnehmung der Luftströmung für *Cupiennius salei* besonders wichtig ist. Diese Sensoren tragen den Namen Trichobothrien, wobei *Trichos* das lateinische Wort für Haar ist und *Bothrum* auf Griechisch Becher bedeutet – ein „Becherhaar“ (Barth, 2001). Wie das Trichobothrium die Signale des Beutetiers detektiert und

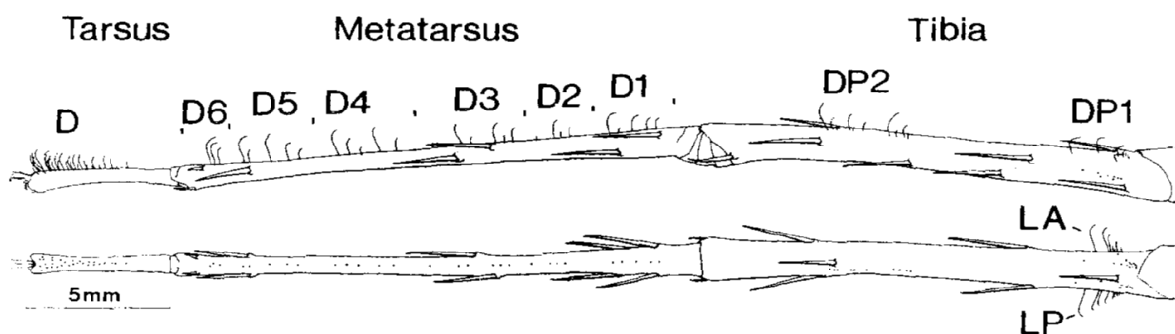


Abbildung 2: Schemazeichnung eines Spinnenbeins von *Cupiennius salei*. Zu sehen ist die Verteilung der einzelnen Trichobothriengruppen entlang des Beins (Barth, 2001).

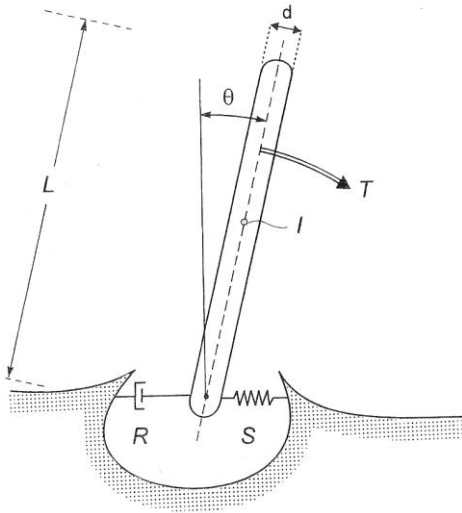


Abbildung 3: Schematische Zeichnung eines Trichobothriums. **T:** Drehmoment, **R:** Dämpfungskonstante, **S:** elastische Rückstellkraft, **I:** Trägheitsmoment, **θ:** Auslenkungswinkel, **L:** Haarlänge, **d:** Durchmesser (Barth, 2001)

Kombination einer dämpfenden und einer elastischen Komponente. Die Dämpfungshöhe R bestimmt den Krafteinfluss, der auf das Haar ausgeübt werden muss, um es um den Winkel θ auszulenken. Die elastische Rückstellkraft S bewerkstelligt, dass das Haar nach der Krafteinwirkung wieder in seine ursprüngliche Position zurück schwingt. Allgemein gilt, je geringer die Masse und je weicher die Aufhängung, desto leichter kann das Trichobothrium ausgelenkt werden, desto sensibler ist der Mechanorezeptor (Barth, 2001).

Die feinen Härchen variieren in ihrer Länge bei 100–1400 μm , der Durchmesser an der Basis liegt bei 5-15 μm (Barth *et al.* 1993). Wie der Abbildung 2 zu entnehmen

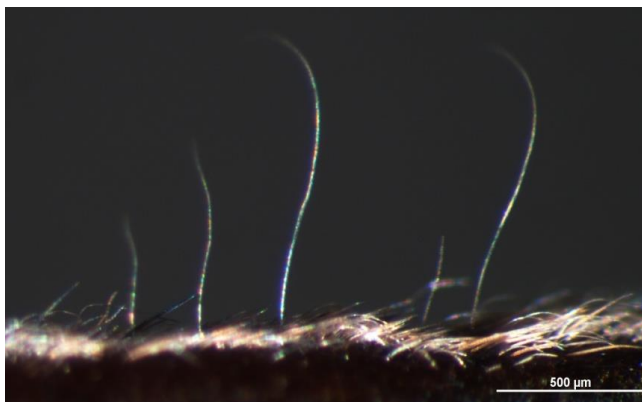


Abbildung 4: Nahaufnahme der Trichobothrien-gruppe D5

wie das Signal zu einem Verhalten, wie dem Sprung führt, ist hoch kompliziert und noch nicht vollständig verstanden. Fest steht, wird das Trichobothrium angeströmt, wirkt über die gesamte Haarlänge L eine Kraft, die auf die Reibung zwischen den Luftpartikeln und dem Becherhaar zurückzuführen ist. Das Haar wird um den Winkel θ ausgelenkt. Die mechanische Antwort des Becherhaars auf die Strömung hängt von verschiedenen Parametern wie seiner Masse, der Steifigkeit und dem inneren Reibungswiderstand ab. Abbildung 3 zeigt eine technische Skizze des Trichobothriums. Der Sensor ist über eine becherähnliche Struktur in der Kutikula aufgehängt. Charakteristisch ist die

ist, sind sie in verschiedenen Gruppen auf dem Spinnenbein angeordnet. Abbildung 4 zeigt eine Fotografie der Gruppe D5. Auffällig ist die Konstellation der Trichobothrien. Die Frage, warum die Mechanosensoren von *Cupiennius salei* unterschiedliche Größen haben und diese in

Verbänden zusammen stehen, untersuchten Professor Friedrich G. Barth *et al.* in ihrer Pionierarbeit von 1993. Ihre Idee beruht darauf, dass bestimmte Längen für die Wahrnehmung von unterschiedlich hohen Frequenzbereichen konzipiert sind. Versuche haben bestätigt, dass die kurzen Trichobothrien hochfrequente Signale und lange Trichobothrien tiefe Frequenzen sehr gut wiedergeben (Barth *et al.* 1993). Somit bildet eine Ansammlung von unterschiedlich langen Sensoren einen Bereich von hoher Sensitivität, da auf kleinem Raum unterschiedliche Wellenbereiche wahrgenommen werden können. Der Längenbereich der Trichobothrien korreliert hierbei mit der Grenzschichthöhe (Humphrey *et al.*, 2003; Humphrey *et al.*, 2008; Shimozawa *et al.*, 2003). Barth *et al.* (1993) vermuten daher einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Längenanordnung der Trichobothrien und einer Grenzschicht, die sich beim Anströmen der Spinnen auf dem Spinnenbein bildet. Für ein besseres Verständnis wird im folgenden Abschnitt zunächst eine allgemeine Beschreibung einer stationären Grenzschicht gegeben.

Eine Grenzschicht ist eine Schicht, die an der Grenze zwischen zwei Fluiden oder einem Fluid und einem Festkörper aufgrund von Reibungseffekten auftritt. Der einfachste Fall, eine Couette-Strömung, ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei strömt ein beliebiges Medium wie z.B. Luft über eine unendlich lange ebene Platte. Die Geschwindigkeit U ist konstant. Die Luft wird hierbei nicht als zusammenhängende Masse angesehen, sondern in einzelne aufeinander gestapelte Lagen unterteilt, wobei jede Lage eine individuelle Geschwindigkeit u besitzt. Die erste Schicht liegt direkt auf der unbewegten Platte auf und wird durch diese sehr stark abgebremst.

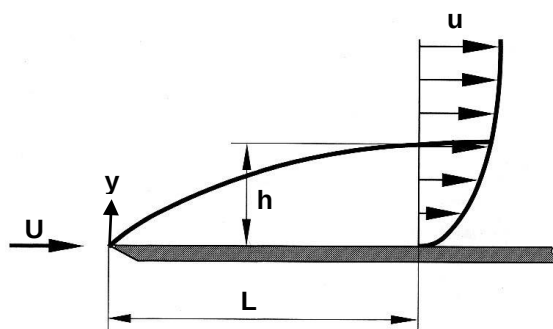


Abbildung 5: Couette-Strömung. Schematische Darstellung einer stationären Strömung über einer ebenen Platte. U : Strömungsgeschwindigkeit; h : Plattendistanz; u : Geschwindigkeit der Fluidlayer; L : Plattenlänge (Oertel *et al.*, 2006).

Die zweite wird durch die sehr langsame erste Lage verlangsamt und beeinflusst wiederum die auf ihr liegende dritte Schicht und so weiter. Dies setzt sich solange fort, bis die Strömungsgeschwindigkeit U erreicht wird und die Lagen sich nicht mehr gegenseitig beeinflussen. Es entsteht ein von Geschwindigkeitsgradienten geprägter Bereich, die Grenzschicht (Oertel *et al.*, 2006).

Motivation und Zielsetzung

Von sämtlichen bekannten Mechanorezeptoren in der Tierwelt gehören die Trichobothrien der Spinne *Cupiennius salei* zu den sensitivsten (Humphrey et al., 2008). In der Biologie besteht ein großes Interesse daran, die Sensoren und ihre Fähigkeiten zu verstehen, um ein tiefer gehendes Verständnis über den Sinnesapparat der Spinne und damit über innerartliche Kommunikation und andere Verhaltensweisen zu erlangen. Doch nicht nur die Biologie würde Nutzen von diesem Wissen ziehen, sondern auch die Ingenieurwissenschaften. Mechanosensoren sind in der Technik in sämtlichen Bereichen, wie z.B. Luft- und Raumfahrt, sehr gefragt und bieten daher ein höchst aktuelles und vielfältiges Forschungsgebiet.

Ziel und Motivation dieser Arbeit ist es, herauszufinden, inwieweit die Grenzschicht auf dem Spinnenbein die Wirkungsweise des Trichobothriums beeinflusst. Hierfür werden vier Aspekte bearbeitet.

Der erste Schritt der Arbeit besteht darin, die genaue Position der Spinne bei der Jagd zu ermitteln und eine adäquate Präparationsmethodik zu entwickeln. Der Anspruch ist, dass das lebende Tier in der Lauerposition hinreichend fixiert wird, um Messungen durchführen zu können. Die Präparationsrückstände sollen dabei so gering wie möglich gehalten werden, um die Strömung nicht zu beeinflussen.

In einem zweiten Schritt soll ein funktionsfähiger Versuchsaufbau für ein DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) kreiert werden, der es erlaubt, die Grenzschicht auf einer ebenen Platte bei verschiedenen Frequenzen hochauflösend darzustellen. Der dritte Schritt besteht darin, die Grenzschicht auf einer ebenen Platte bei verschiedenen Frequenzen darzustellen. Diese Messungen ermöglichen zum einen, einen Vergleich zwischen der Strömung auf der ebenen Platte mit und ohne Spinne und dienen zum anderen, als Testlauf für die Funktionsweise des Versuchsaufbaus und den dazugehörigen Messeinstellungen.

Der vierte und abschließende Schritt befasst sich mit Messungen am Spinnenbein. Es sollen die Strömungsverhältnisse über dem gesamten Bein sowie Detailaufnahmen von bestimmten Beinausschnitten bzw. einzelner Trichobothrien angefertigt werden.

Die Präparationstechnik, der Versuchsaufbau, die Charakterisierung der Grenzschicht auf der Messplatte und die Strömungsmessungen am Spinnenbein

bilden das Fundament für ein besseres Verständnis inwieweit die Trichobothrien der Spinne mit der Luftströmung agieren und welche Rolle die Grenzschicht dabei einnimmt.

2 Jagdposition von *Cupiennius salei*

2.1 Material und Methode

Bestimmung der Jagdposition

Die Spinne *Cupiennius salei* nimmt grundsätzlich zum Jagen eine charakteristische Lauerstellung ein. Es ist daher anzunehmen, dass in dieser Jagdposition die Trichobothrien optimal zur Signalquelle ausgerichtet sind und die Strömung, welche vom Beutetier ausgeht, bestmöglich detektiert werden kann. Für Messungen am Trichobothrium, die dazu beitragen sollen, das Zusammenspiel zwischen Sensor und Signal besser zu verstehen, ist die Charakterisierung der Jagdposition unabdingbar. In bisherigen Veröffentlichungen (Barth, 2001) ist bislang lediglich die Beinstellung ermittelt worden. Für eine vollständige Charakterisierung gehören, zusätzlich zu der Beinstellung, die Winkel der einzelnen Beinglieder zueinander. Diese gilt es im Folgenden zu ermitteln und somit die Charakterisierung der Lauerstellung von *Cupiennius salei* zu vervollständigen.

Die Messungen wurden ausschließlich mit subadulten Weibchen, der tropischen Wanderspinne *Cupiennius salei* (Keyserling 1877) durchgeführt, die ihre letzte Häutung noch vor sich hatten und entsprechend gefräßig waren. Alle Tiere stammen aus der hauseigenen Zucht der Universität Wien. Für die Aufnahmen der Jagdposition ist eine Spinne auf einer freistehenden, mit Millimeterpapier versehenen, Platte platziert worden. Nach einer dem Tier individuell angepassten Eingewöhnungsphase wurde die Spinne mit einer Schmeißfliege *Calliphora erythrocephala*, die über einen Faden an eine Stange gekoppelt war, stimuliert. Der Faden wurde mittels eines Wachstropfens an den Fliegenthorax angebracht, wobei darauf geachtet wurde, dass die Flügel funktionsfähig blieben und das Tier uneingeschränkt seine Flügel schlagen konnte. Die Spinne wurde gereizt, indem der Köder über ihr kursierte oder direkt auf der Platte aufgesetzt wurde. Sobald der Jäger seine Lauerposition eingenommen hatte, konnte mit den Aufnahmen begonnen werden. Fotografiert wurde mit einer Ex Sigma Spiegelreflexkamera von Canon (Objektiv: 105 mm 1:2,8 DG Macro). Jedes Bein wurde größtmöglich abgebildet, wobei darauf geachtet wurde, dass die Kameralinse orthogonal zu den jeweiligen Gliedmaßen ausgerichtet ist. Insgesamt wurden je drei Jagdpositionen (n=9) von drei Spinnen (M101, M103, M108; N=3) an verschiedenen Tagen aufgenommen. Der

nächste Schritt bestand darin, die Winkel, beginnend von Femur zu Patella, von Beinsegment zu Beinsegment, vom ersten bis zum vierten Beinpaar pro Individuum zu bestimmen. Die coxalen Übergänge konnten wegen fehlender Sichtbarkeit nicht vermessen werden. Die Bilder wurden mit der Software ImageJ Launcher Version 1.42 vermessen. Für eine generelle Aussage über die Winkelstellung bei der Jagdposition wurde der Durchschnitt von allen Tieren gebildet.

Vorbereitung

Da die Spinne auf externe Stimuli sehr empfindlich reagiert, ist eine längere Vorbereitungsphase für Mensch und Tier stark zu empfehlen! Hierzu gehört das ruhige und routinierte Rausholen und wieder Reinsetzen des Lebewesens in sein vertrautes Territorium, das Umstellen von Tag- und Nachtzyklus und die Durchführung der Messung in einer verdunkelten, für die nachtaktive Spinne angenehme Umgebung. Das Tragen eines Mundschutzes war unabdingbar, um möglichst nahe an die Spinne heranzutreten ohne sie durch Luftbewegungen zu erschrecken!

Präparation der Spinne

Das Tier wird lebendig präpariert. Für die anstehenden Versuchsreihen ist ein intakter Stoffwechsel der Spinne von Nöten. Somit wird sichergestellt, dass die Materialeigenschaften der Trichobothrien nicht durch Austrocknungseffekte beeinflusst werden.

Als Vorbereitung für die Präparation müssen zunächst folgende Hilfsmittel angefertigt und bereitgestellt werden: 1) Plexiglasquader ($4 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$), der als Spinnenhalter dient. 2) Acht Strohhalme, die auf die Beinlänge der Spinne zugeschnitten und mit Drahtstücken versehen sind. Sie ermöglichen eine schonende Ausrichtung und wiederholbare Korrekturen der Beinstellung, ohne das Bein zu schädigen, insbesondere die empfindlichen Trichobothrien. 3) Styroporbett mit passender Kuhle für den Spinnenhalter. 4) Schablonen der verschiedenen Beinwinkel aus verstärktem Papier, welche für ein korrektes Ausrichten und anschließender Fixierung der Beinsegmente benötigt werden. 5) Wachs-Kolophoniummischung. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Schmelzpunkt einerseits niedrig genug ist, um die Spinne nicht zu verbrennen und andererseits das Material steif genug bleibt, um das Tier bestmöglich zu fixieren. 6) Knetmasse als Stütz- und Fixierhilfe. 7) Skalpell für die Rasur. 8) Medizinisches Klebeband.

Während der Bereitstellung der Materialien wird die Spinne für 1,5 – 2 Stunden in einem Kühlschrank bei 2°C gekühlt und anschließend mit CO₂ betäubt. Die Präparation beinhaltet insgesamt acht Schritte, die nachstehend chronologisch aufgeführt sind.

- Schritt 1:** Die Spinne wird mit ventraler Seite nach oben auf den Plexiglashalter gelegt. Pedipalpen und Abdomen werden vorsichtig mit medizinischem Klebeband fixiert.
- Schritt 2:** Die Halterung wird nun in die Kuhle des Styroporbetts eingelassen und mit Knetmasse stabilisiert.
- Schritt 3:** Die vorpräparierten Strohhalme werden vorsichtig über die Beine gestreift und ausgerichtet. Befestigt werden sie durch das Hineinstecken des Drahtes in das Styropor.
- Schritt 4:** Rasieren des Sternums mit einem Skalpell. Um eine Befreiung der Spinne vorzubeugen, muss das Sternum möglichst gut fixiert werden. Die Haare auf dem Sternum erschweren das Vordringen der Wachs-Kolophoniummischung zur Kutikula erheblich und müssen daher vor dem Auftragen entfernt werden.
- Schritt 5:** Die Coxen werden mit Hilfe des Wachs-Kolophoniumgemisches mit dem Sternum so verbunden, dass sie gemeinsam eine Ebene bilden. Diese Befestigung ist bereits richtungsweisend für die Beinstellung und sollte möglichst akkurat durchgeführt werden.
- Schritt 6:** Präparation der Gelenke: Jedes Bein wird einzeln bearbeitet. Der Strohalm wird so weit zurück geschoben bis das erwünschte Gelenk frei zugänglich ist. Anschließend wird die Verbindung mit Hilfe der, zu diesem Gelenk passenden, Schablone ausgerichtet und mit kleinen Wachs-Kolophoniumportionen blockiert. Der Übergang von Coxa zu Trochanter befindet sich auf der Körperebene und bedarf keiner Schablone. Zwischen der jeweiligen Überleitung von Femur zu Patella zu Tibia sollte eine dünne, aber durchgehende Wachsschicht bestehen. Der Metatarsus muss nicht mit dem Tarsus verbunden werden, da das Gewicht der Spinne den Tarsus in die korrekte Endhaltung drückt.
- Schritt 7:** Sind alle Beingelenke fixiert, muss zusätzlich die dorsale Seite der Coxa-Femur Verbindung gesichert sein! Dafür wird der Spinnenhalter aus dem Styroporbett herausgenommen, die Spinne umgedreht. Das

Plexiglasstück wird von einer Laborzange so gehalten, dass die Tarsen der Spinne auf dem Boden plan aufliegen. Nun wird eine flächendeckende Wachs-Kolophonium-Schicht über die Coxen bis hin zum Carapax gezogen.

Schritt 8: Abschließend können bei Bedarf die Beinstellung und die einzelnen Gelenkwinkel korrigiert und überschüssiges Material abgenommen werden.

Die Prozedur bedeutet für das Tier den sicheren Tod nach ca. 3-6 Tagen, da sie nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Ich bitte daher um einen verantwortungsvollen Umgang mit der Technik und so mit dem Leben der Spinne.

Bilder von der Präparation können dem Anhang (Abbildungen A1-A6) bzw. der beigefügten CD entnommen werden.

2.2 Ergebnisse

Bestimmung der Jagdposition

Der Tabelle 1 sind Mittelwerte der Winkel zwischen den benachbarten Laufbeinen während der Lauerstellung der Spinnen M101, M103 und M108 zu entnehmen (N=3). Die Stellungsunterschiede zwischen den Individuen sind gering. Auffällig ist, dass sich die Winkel für eine Gelenkverbindung über alle acht Beine decken.

Der Winkel zwischen Femur und Patella variiert mit 126° bei M108 und 148° bei M103 um insgesamt 22°, der Durchschnitt liegt bei 137° mit einer Standardabweichung von 15°. Zwischen Patella zu Tibia variiert der Winkel mit 183-189° um 6°, der Mittelwert beträgt 186° bei einer Standardabweichung von 6°. Die Tiere M108 und M103 besitzen mit Winkeln zwischen 159° und 161°, in etwa die gleiche Stellung der Tibia zum Metatarsus, M101 weist mit einer Auslenkung von höchsten 150° den kleinsten Winkel auf. Der Durchschnitt beträgt 157°, die Standardabweichung ca. 10°.

Unterschiede von Metatarsus zu Tarsus liegen zwischen 208° (M108) und 212° (M101), die Mittelwerte für die ersten drei Beinpaare liegen bei 209°, beim 4. Beinpaar bei 210°, die Standardabweichung beträgt hierbei für alle 12°.

Tabelle 1: Winkel [°] und Standardabweichung (grau) der Beinsegmente zueinander bei der Jagdposition von drei Spinnen.

M 101					M 108			
Beinpaar :	Fem_Pat	Pat_Tib	Tib_Met	Met_Ta	Fem_Pat	Pat_Tib	Tib_Met	Met_Ta
1.	136 11	185 7	153 15	211 8	127 12	189 5	161 9	209 18
2.	136 11	184 7	151 12	211 8	126 12	188 5	161 9	209 18
3.	136 11	184 7	151 12	212 8	126 12	189 5	160 9	209 18
4.	137 10	184 6	150 12	212 8	127 11	189 5	160 9	209 18

M103					Alle			
1.	148 16	183 6	160 6	207 7	137 15	186 6	157 11	209 12
2.	148 16	183 6	160 6	207 6	137 15	186 6	157 10	209 12
3.	146 17	183 6	159 7	208 6	136 15	186 6	157 10	209 12
4.	146 17	184 6	159 7	208 7	137 15	186 6	157 10	210 12

Präparation der Spinne

In Abbildung 6 ist ein Vergleich der lateralen Ansicht, zwischen einer aktiv jagenden Spinne (oben) und einer lebenden aber präparierten Spinne (unten), gezeigt.

Abbildung 7 zeigt einen aus dorsaler Sicht schematischen und fotografischen Vergleich der Beinstellungen von *Cupiennius salei* bei der Jagd. Die schematische Darstellung weist die ermittelten Mittelwerte $\bar{x}$ des mit der Längsachse eingenommenen Winkels mit zugehöriger Streuung σ auf. Die Fotografie rechts daneben zeigt eine durch die Präparationsmethodik bearbeitete Spinne.



Abbildung 6: Zu sehen ist der Vergleich zwischen einer aktiv jagenden Spinne (oben) und einer präparierten (unten), Maßstab: 1,5 cm.

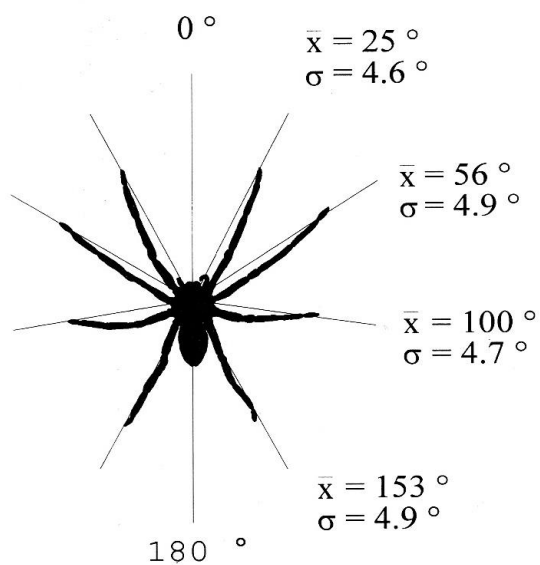


Abbildung 7: Dorsale Ansicht der charakteristischen Beinstellung von *Cupiennius salei* bei der Jagd. Links: $\bar{x}$ Mittelwert des mit der Längsachse eingenommenen Winkels, σ Streuung (Barth, 2001) Rechts: Präparierte Spinne.

2.3 Diskussion

Bestimmung der Jagdposition

Die Fangbereitschaft der Spinne wird durch eine typische Jagdposition charakterisiert. Hierbei hebt die Spinne ihren Hinterleib etwas an, bringt ihre Beine in Position und setzt kurz vor dem Sprung einen Sicherungsfaden ab. Die Beinstellung variiert nur sehr wenig und wurde erstmals von Hergenröder und Barth 1983 bestimmt (Abbildungen 6 und 7).

Die Werte der Ergebnisse sind in sich sehr homogen und variieren nur geringfügig von Spinne zu Spinne. Die Unterschiede könnten durch die unterschiedlichen Größen der Tiere begründet werden. Wie bereits erwähnt, wurden auf Grund der größeren Jagdbereitschaft juvenile Tiere, die ihre letzte Häutung noch vor sich haben und dementsprechend gefräßig sind, für die Bestimmung der Jagdposition herangezogen. Obwohl penibel darauf geachtet wurde, dass die Tiere die gleiche Größe und Entwicklungsstufe aufwiesen und ihre Statur einer adulten Spinne bestmöglich glich, sind geringe Unterschiede nicht auszuschließen.

Die Stellung der Beine zueinander und die Winkel zwischen den Beinsegmenten ergeben eine konstante und sehr regelmäßige Lauerstellung. Auffällig ist, dass jedes Bein einen Gegenspieler besitzt. Das erste Bein links und das vierte rechts, sowie das dritte Beinpaar liegen jeweils auf einer Ebene. Lediglich das zweite Bein besitzt keinen direkten Partner. Das zweite Beinpaar deckte sich grundsätzlich mit dem ersten! Zudem konnte beobachtet werden, dass *Cupiennius salei* sich grundsätzlich frontal zur Signalquelle ausrichtet. Durch die Gleichstellung von 1. und 2. Beinpaar und der Körperausrichtung erfährt eine erhöhte Anzahl von Sensoren den gleichen bzw. einen sehr ähnlichen Input. Es ist daher anzunehmen, dass *Cupiennius salei* stark darauf ausgerichtet ist Reize von vorne aufzunehmen. Die einzelnen Beine der Spinne sind autark, das heißt, die Beinpaare können auch unabhängig voneinander ausgelenkt werden und verschieden große Kräfte aufbauen (Karner, 1999 unpubliziert). Die Kombination aus den autark steuerbaren Beinen, den Gegenspielern und die rundum Verteilung ergibt eine höchst effiziente Ausgangsposition, um flexibel und schnell in jede Richtung adäquat zu agieren. Zudem ist die Ausrichtung der Trichobothrien so, dass die Spinne von sämtlichen Richtungen einen Input erfährt und eine genaue Situationseinschätzung erfolgen

kann. Je nach Reizeinfluss kann die Spinne ein Flucht- oder Fangverhalten in jede beliebige Richtung einleiten und somit ihren Jagderfolg und Fitness steigern.

Präparation der Spinne

Die angeführten Vergleichsbilder von lateraler und ventraler Sicht einer präparierten sowie einer unbehandelten Spinne sind weitestgehend kongruent (Abbildung 6 und 7). Unterschiede zeigen sich lediglich bei der Lage des Opisthosomas. Das jagende Tier befindet sich in einem Zustand von hoher Wachsamkeit. Der Hinterleib ist leicht angehoben und bildet mit dem Sternum eine Ebene. Diese Körperspannung geht bei dem fixierten Tier verloren. Mit aufliegendem Hinterleib verändert sich an dieser Stelle das Strömungsfeld um das Tier. Allerdings konnte beobachtet werden, dass auch die aktiv jagende Spinne ihren Hinterleib senkte, um z.B. einen Sicherungsfaden zu setzen und anschließend in dieser Position bis zum Angriff zu verharren. Es ist demnach keine unübliche Körperhaltung. Es sollte ebenfalls bedacht werden, dass eine Fixierung des Opisthosomas viel Material in Anspruch nehmen würde und somit ebenfalls das Strömungsfeld auf eine unnatürliche Art und Weise verfälscht. Aus diesen Gründen wurde auf eine Präparation des Hinterleibs verzichtet. Es ist jedoch zu empfehlen, die Lage während der Messungen zu dokumentieren.

Bei der Entwicklung der Methoden, wurde großen Wert darauf gelegt, so wenig Fixiermaterial wie möglich anzuwenden. Daher wird das Metatarsus-Tarsus-Gelenk nicht fixiert! Das Gewicht der Spinne drückt automatisch den Tarsus auf den Boden und somit in die richtige Position. Es ist möglich, dass der Tarsus nach der Präparation nicht komplett plan auf dem Substrat aufliegt. Das ist keine unnatürliche Stellung. Bei den Fotoanalysen konnte oftmals beobachtet werden, dass die Spinne die Boden-Tarsus-Kontaktfläche minimiert. Vermutlich kurz vor dem Sprung. Befreiungsversuche konnten lediglich während der Präparation beobachtet werden. Danach war die Bewegungsfreiheit der Spinne soweit eingeschränkt, dass nur noch Beißversuche stattgefunden haben. Die Präparation ist dauerhaft.

Zusammenfassend ist es durch die hier vorgestellte Methodik möglich, ein noch lebendes Tier in der Lauerstellung anhaltend zu fixieren. Dabei wird darauf geachtet, dass so wenig Material wie möglich verwendet wird um das Strömungsfeld nicht zu verfälschen. Hinzu kommt, dass das Material beliebig oft Korrekturen zulässt und somit ein optimales Ergebnis garantiert. Die entwickelte Präparationsmethodik ermöglicht das lebende Tier in der Lauerposition für Messungen zu fixieren, wobei

Präparationsrückstände minimal sind und somit die Strömung bestmöglich nicht beeinflussen. Die anfänglich gestellten Ansprüche sind erfüllt. Der 1. Punkt für die Beantwortung der Frage, inwieweit Trichobothrium und Grenzschichthöhe zusammen wirken ist erfolgreich behandelt worden.

3 Die Entwicklung eines PIV Versuchsaufbaus

Was ist ein PIV

Anhand eines PIV (Particle Image Velocimetry) ist es möglich Strömungsfelder bildlich darzustellen. Dies beinhaltet Aussagen über die Geschwindigkeit und Richtung der Strömung. Im Folgenden werden kurz die Grundlagen der PIV Messtechnik beschrieben.

Der Versuchsaufbau besteht generell aus mehreren Untereinheiten: 1) Die Messeinheit (geschlossenes System), 2) Ein Laser, 3) Kamera, 4) Auswertungseinheit (Software). Die Funktionsweise und das Zusammenspiel dieser vier Untereinheiten wird am Beispiel eines Windkanals (Abb.: 8) weiter erläutert.

Der Windkanal ist hierbei die geschlossene Messeinheit, in der die zu messende Strömung angelegt wird. Das Fluid, in diesem Fall Luft, beinhaltet Partikel (Seeding), die mit der Strömung fließen (x-Richtung). Die gepulste Lichtebene des Lasers ist ebenfalls in x-Richtung mit der Strömung ausgerichtet. Diese Ebene definiert den Messbereich. Beim Durchfließen müssen die Partikel mindestens zwei Mal das Licht des Lasers reflektieren. Die Kamera fängt diese Reflektionen ein und generiert entweder ein Negativ von zwei aufeinanderfolgenden Lichtpulsen oder nimmt einzelne Bilder mittels eines speziellen CCD Sensors (Cross Correlation Sensor) auf. Für die weitere Auswertung müssen die Negative zunächst durch einen Scanner digitalisiert werden, währendem die Daten auf dem CCD Sensor in Echtzeit direkt auf den Computer abgespeichert werden. Die so entstandenen Bildsequenzen werden mit statistischen Methoden (auto- und cross correlation) ausgewertet. Hierbei legt die verwendete Software zunächst ein Raster über das Bild und unterteilt es somit in mehrere Untereinheiten (Interrogation Areas). Für jede Interrogation Area werden zum einen die räumlichen Unterschiede der Partikel von Bild1 (Zeitpunkt: t_1) zu Bild2 (Zeitpunkt: t_2) usw. ermittelt und somit die Strömungsrichtung. Zum anderen kann zusätzlich die Partikelgeschwindigkeit durch die zeitlichen Abstände der Bilder und dem zurückgelegten Weg rekonstruiert werden. Die gemittelten Werte aller Strömungsrichtungen sowie Geschwindigkeiten der Partikel ergeben einen Strömungsvektor pro Rastereinheit. Das Resultat ist eine vektorielle Abbildung (Abb.: 9) der Strömung (Raffel, 1998).

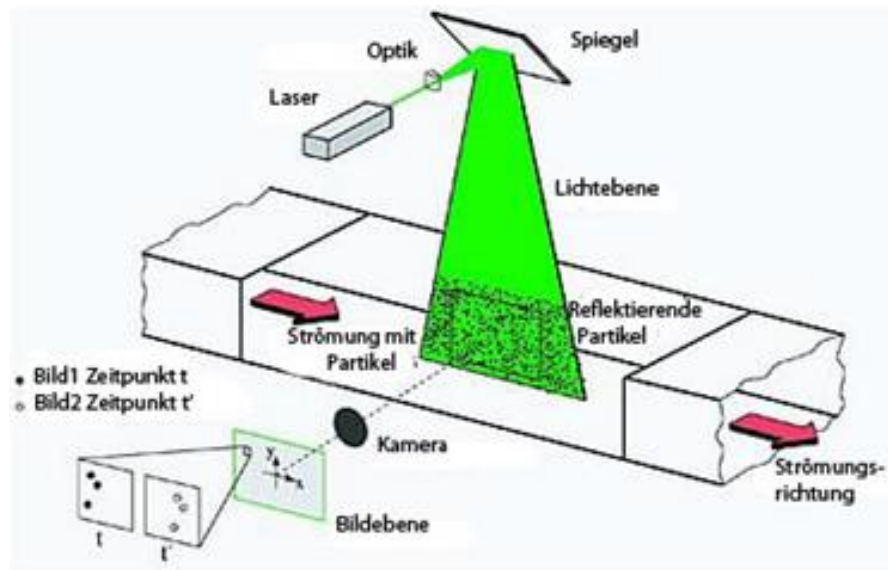


Abbildung 8: Versuchsaufbau eines PIV (Particle Image Velocimetry) mit einem Windtunnel (Raffel, 1998; modifiziert).

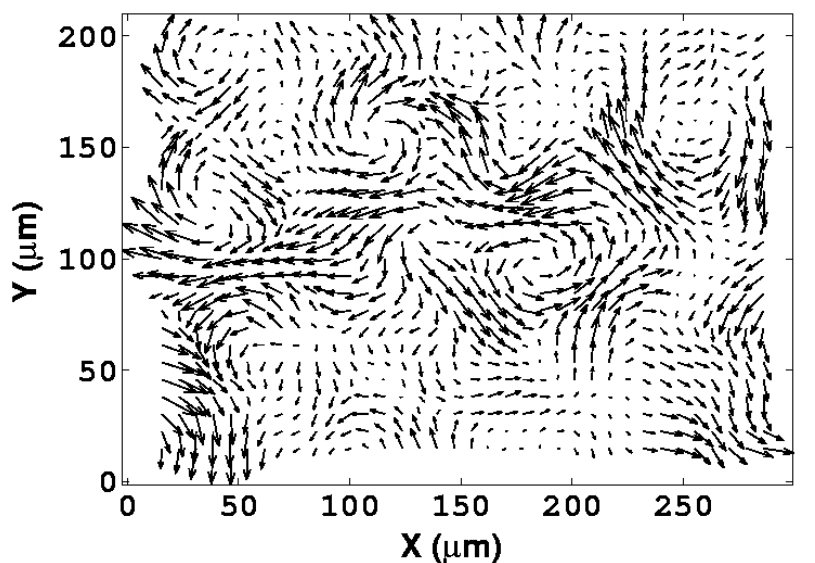


Abbildung 9: Vektorielle Abbildung der Strömung von *Bacillus subtilis* (Luis Cisneros et. al, 2008).

Anforderungen an das PIV für Messungen am Spinnenbein

Der Versuchsaufbau muss für Strömungsmessungen am Spinnenbein folgende Anforderungen erfüllen: 1) Flexibilität. Der Anspruch ist es, so viele verschiedene Messungen wie möglich mit unterschiedlichen Parametern durchzuführen ohne dabei die Position der Spinne ändern zu müssen. Hierdurch wird garantiert, dass die Messdaten unter verschiedenen Bedingungen vergleichbar sind. Es werden lediglich die Versuchsparameter um das Messobjekt variiert, nicht aber die Position oder

Einstellungen der Geräte und somit die Adjustierung der Spinne. 2) Aufnahme von verschieden großen Bildausschnitten mit jeweils bestmöglicher Auflösung. Die Ausschnitte sollen das gesamte Spinnenbein (ca. 8 cm), einzelne Beinsegmente (ca. 2-3 cm) und einzelne Trichobothrien (ca. 1 cm) abbilden können. Anhand dieser Daten, können Rückschlüsse auf das Zusammenspiel zwischen der Strömung und der Wirkungsweise der Trichobothrien gezogen werden.

Der in Material und Methode beschriebene Versuchsaufbau ist das Resultat einer Reihe von Messungen, Verbesserungen des Aufbaus, sowie Einstellungen der Geräte und erneuten Messungen. Im Folgenden wird kurz beschrieben, über welche Entwicklungsschritte es zu diesem Aufbau gekommen ist. Die vorgestellte Version ist die erste, die verwertbare Daten hervorgebracht hat.

Entwicklungsschritte des Versuchsaufbaus

Ziel ist es, allen Anforderungen für Messungen am Spinnenbein gerecht zu werden und den Versuchsaufbau in seiner Funktionsweise zu verifizieren. Erst dann kann die Entwicklung erfolgreich abgeschlossen werden. Hierfür werden die experimentell gemessenen Daten mit der Theorie abgeglichen. Stimmen die Daten überein, kann davon ausgegangen werden, dass die noch unbekannten Messergebnisse am Spinnenbein glaubwürdig sind. Für die Verifizierung sollen die Messdaten einer einfachen Couette-Strömung bei verschiedenen Frequenzen und angelegter Spannung mit den strömungstheoretischen Daten verglichen werden.

Die Idee den Versuchsaufbau flexibel zu gestalten, endete in einem Würfel als Grundform für die Messkabine. Der Würfel besteht aus einem metallenen Gerüst, an dem Seitenwände aus Plexiglas leicht abnehmbar befestigt werden können. Die Messplatte ist vom Kubus unabhängig. Dies ermöglicht zum einen ein Austauschen der glatten Messplatte durch verschiedene Habitatsubstrate wie z.B. ein Bananenblatt oder Torf und zum anderen wird das Übertragen von Vibrationen oder anderen Störungen auf die Platte verhindert. Die Seitenwände wurden für die Anforderungen des jeweiligen Experiments spezifisch perforiert. Beispiele sind, das Bekleben mit akustischer Wolle, auslegen mit schwarzem Papier für einen kontrastreiche Aufnahme, offene Wand für die Signalquelle, etc.. Die gleich großen Wände, das unkomplizierte Austauschen der Seitenteile sowie die autarke Messplatte ermöglichen einen flexiblen und schnellen Umbau der Parameter für das Experiment. Das System ermöglicht zudem, dass beliebig viele Wände gebaut und

ausgetauscht werden können. Es ist somit für nachfolgende Projekte beliebig erweiterbar.

Während der Messungen hat es sich bewährt mit einer schwarzen Pappe als Untergrund zu arbeiten. Sie wurde ursprünglich zur Verhinderung von Reflektionen des Lasers aufgebracht. Es konnte allerdings beobachtet werden, dass Aufnahmen bei gleicher Einstellung im plattennahen Bereich nur bei Messungen mit der schwarzen Pappe dargestellt werden konnten und nicht mit der Messplatte allein. Siehe dazu die Diskussion im Teil 4 dieser Arbeit.

Um ein natürliches Signal, wie z.B. das einer fliegenden Fliege, nachzuahmen, wurde ein Lautsprecher als Reizgeber gewählt. Dieser generiert eine oszillatorische Luftbewegung wie sie auch bei einem Flügelschlag auftritt. Frequenzen und Amplituden können dabei genau definiert werden.

Vorversuche

Für erfolgreiche Messungen am Spinnenbein sollten zunächst Größe und Geschwindigkeiten der Grenzschicht auf einer ebenen Platte bei verschiedenen Frequenzen und Spannungen bestimmt werden. Die Messungen sollten dann mit der Spinne auf der ebenen Platte wiederholt und im Anschluss verglichen werden. Für die Kalibrierung des Lautsprechers muss die anliegende Geschwindigkeit des Strömungsfeldes bekannt sein. Für die Bestimmung der Grenzschicht müssen die Geschwindigkeiten im plattennahen Bereich sowie die der Strömung bekannt sein um die Größe der Grenzschicht zu ermitteln. Die Überlegung war eine einzige Messung durchzuführen, die für beide Fälle die Informationen liefert. Hierfür wurde das Messfenster (1 cm^2) genau über der Platte platziert. Der Geschwindigkeitsverlauf von U (Bewegung der Teilchen in x -Richtung) wurde über die gesamte Bildhöhe (y -Richtung) bestimmt. Somit konnten die Geschwindigkeiten nahe der Platte als Charakterisierung der Grenzschicht verwendet werden, höher liegende für eine Geschwindigkeitsbestimmung des Strömungsfeldes. Die Daten außerhalb der Grenzschicht sollten ebenfalls für die Kalibrierung des Lautsprechers herangezogen werden. Gemessen wurden verschiedene Frequenzen bei unterschiedlicher Spannung:

Gemessen: 25Hz (3,4,5,7,9V), 50Hz (2,3,4,5,6V), 75Hz (2,3,4,5,6V), 100Hz (2-6V), 150Hz (2-5,7V), 200Hz (2-5 und 5,5V), 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz

bei 1,3,5,8,10V **Name der Messung:** Kalib_Laut_Grenz_Platte_1 und E2, 250Hz, 350Hz, Gemessen mit der Einstellung 3 (E3), siehe CD.

Bei der Auswertung wurde allerdings festgestellt, dass die Geschwindigkeiten kontinuierlich ansteigen. Es wurde vermutet, dass das Messfenster somit kleiner sein muss als die herrschende Grenzschicht. Eine Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit des Strömungsfeldes war daher nicht möglich (Messung1). Abhilfe sollte eine weitere Messung außerhalb des plattennahen Bereichs in 2 bis 4 cm Höhe schaffen (Messung2). Anhand der Ergebnisse sollte dann die Höhe der Grenzschicht, mittels der 99%-Regelung aus der vorangegangenen Messung rekonstruiert werden (Prandtl & Tietjens, 1934).

Das Ergebnis von Messung 2 ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Kalibrierungskurven der verschiedenen Frequenzen teilen keine gemeinsame Geschwindigkeit. Das bedeutet, dass ein Kalibrieren des Lautsprechers nicht möglich ist und zukünftige Messungen verschiedener Frequenzen schwer vergleichbar sind. Des Weiteren übertrafen die gemessenen Geschwindigkeiten im plattennahen Bereich von Messung 1 die des Strömungsfeldes (Messung 2). Eine Begründung wurde in einer veränderten Amplitude des Lautsprechers in unterschiedlichen Höhen vermutet. Das bedeutete, dass für vergleichbare Messungen grundsätzlich der gleiche Feldausschnitt gewählt werden muss.

Messung1: 25Hz, 50Hz, 75Hz bei 3,4,5,7,9V, 100Hz, 150Hz, 200Hz bei 2-6V 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz bei 1-5V **Name der Messung:** Kalib_Laut_Grenz_Platte_1 vom 16.04.2009

Messung2: 25Hz, 50Hz, 75Hz, 100Hz, 150Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz bei 2-4V

Name der Messung: Kalib_E1, Kalib_E2, Kalib 250-300Hz

Für die Beantwortung der Fragen, warum die Teilchen im plattennahen Bereich schneller waren als die im Strömungsfeld und in wie weit der Lautsprecher seine Amplitude über die Höhe ändert wurde der Versuchsaufbau und die Messeinstellungen nochmals optimiert. Folgende Änderungen wurden vorgenommen: 1) Abstandsverringern von Messpunkt und Lautsprecher (von 43 cm auf 36 cm sowie der Kamerafokus von 12 cm auf 9 cm, 2) Plastikabdeckung zwischen (12 auf 9 cm). Die Plattendicke beträgt 1,6 cm. 3) Kameraobjektiv: 12+20+36 mm Platzringe. Der Bildausschnitt beträgt 5 mm². 4) Verbesserte Anpassungen des Intensifiers und der Auswertungsmethodik.

Mit diesen Optimierungen wurden die Messungen wie folgt in Material und Methode beschrieben, durchgeführt und ausgewertet.

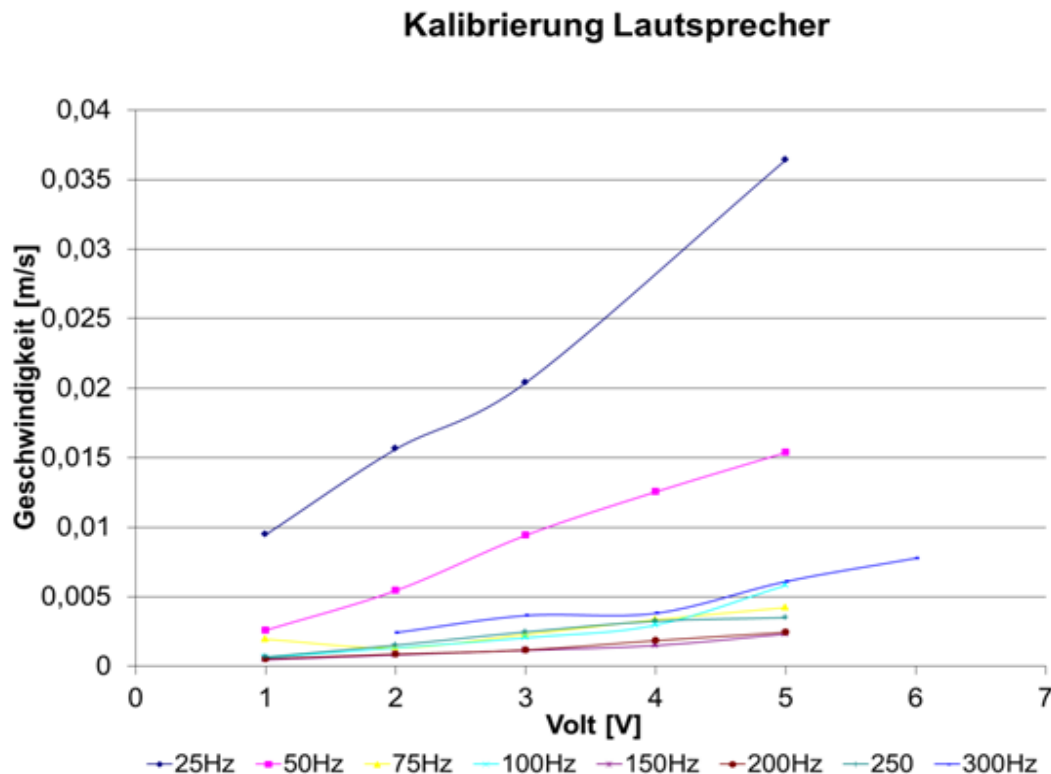


Abbildung 10: Aufgezeigt werden die Geschwindigkeitsveränderungen der verschiedenen Frequenzen bei unterschiedlicher Spannung.

3.1 Material und Methode

Versuchsaufbau – Digital Particle Image Velocimetry (DPIV)

Der Versuchsaufbau des DPIV (Dantec Dynamics A/S, Skovlunde, Denmark) besteht aus einem Nd: YAG Laser (3W/532 nm Wellenlänge, Mercury Serie, New Wave Research Inc., Fremont USA), einer digitalen Hochgeschwindigkeitsvideokamera (iNanoSense MkIII revision 3E, Integrated Design tools Inc., Tallahassee, USA) mit einem integrierten CMOS Chip und einem Lautsprecher (Conrad Electronics, 15“ Poly Coated Woofer, 150W, 4Ohm, Model: DYH-1530) als Reizgeber (Abbildung 3.1.1). Die Optik des Lasers (80x60 Serie, Dantec Dynamics A/S) generiert ein gepulstes Lasersheet von 1 mm. Die Kamera ist orthogonal zum Lasersheet (x-Ebene) ausgerichtet, der Abstand beträgt 9 cm. Die Linse der Kamera ist von Nikon Typ AF Nikkor 85 mmf/1,8D. Für eine hohe räumliche Auflösung wurde die Kamera mit 12, 20 und 36 mm Platzringen (Soligor GmbH, Leinfelden-Echterdingen,

Germany) versehen. Die Mitte des Lautsprechers ist senkrecht zur Lasersheetebene ausgerichtet. Die Sinusschwingung verläuft in x-Richtung und somit parallel zu den dünnen Wänden des Plexiglaskastens ($40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$). Eine handelsübliche, weiß beschichtete Spanplatte ($38 \times 38 \times 2 \text{ cm}$) dient als Messplatte. Reflexionen werden durch akustische Wolle reduziert. Der Kasten ist an der Lautsprecherseite offen. Eine Plastikplane bildet eine luftdichte Verbindung von Reizgeber und Kasten. Die Abdeckung kann für das Einfüllen des Seedings geöffnet werden. Der Signalgeber ist schwingungsfrei und unabhängig vom Versuchsaufbau aufgehängt. Das Signal wird von einem Funktionsgenerator (Conrad Electronics 0799, Typ: FG200, Frequenzbereich: 0,2-220kHz, T40/E IP20) über einen Leistungsverstärker (4A76 DC) 10 fach verstärkt auf den Lautsprecher übertragen. Für eine bessere Übersicht wurde auf die Darstellung der Aufhängung, der Verbindung von Lautsprecher zu Kasten, sowie der Verkleidung verzichtet (Abb.: 11). Ein Bild vom originalen Versuchsaufbau ist im Anhang (A7-A9) und auf der beiliegenden CD zu finden. Die DPIV-Daten wurden mit DynamicStudio Software (Dantec dynamics A/S) Version 2.21 ausgewertet.

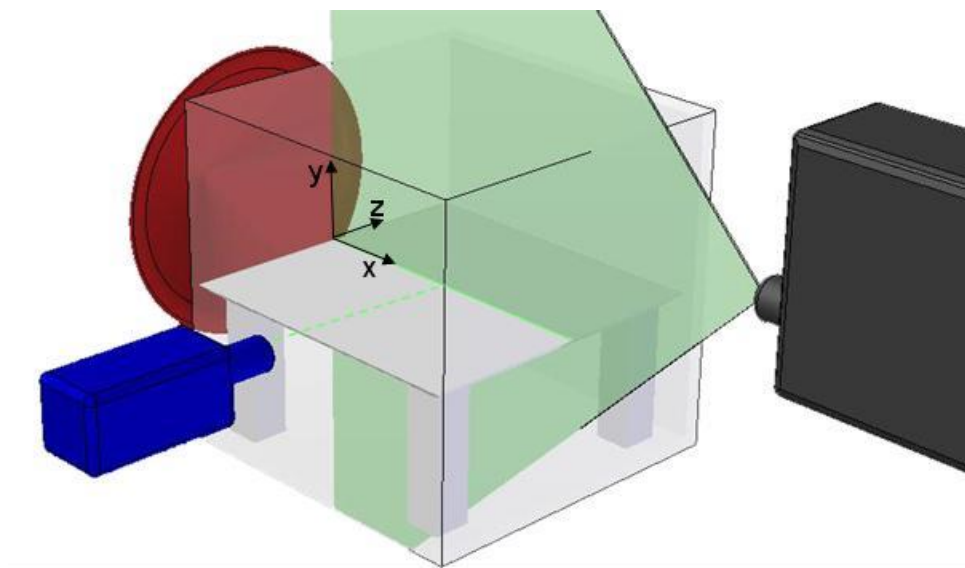


Abbildung 11: Schematische Darstellung der DPIV-Messapparatur. Laser (schwarz), Kamera (blau), Lautsprecher (rot), Lasersheet (grün), Platte (weiß), Plexiglaskasten (klar). Die Seite zum Reizgeber ist offen. Der Abstand von Kamera zum Lasersheet beträgt 9 cm. Nicht dargestellt sind die luftdichte Verbindung von Kasten zu Lautsprecher, sowie die Lautsprecheraufhängung.

Datenaufnahme

Es werden pro Frequenz mindestens 8 Perioden von 25, 50, 75, 100, 150, 200, 150, 300 Hz aufgenommen. Eine Periode wird jeweils mit 10 Bildern dargestellt. Die Einstellungen zu den jeweiligen Messungen können aus Tabelle 2 entnommen werden.

Gemessen: 25Hz (1,2,3,5,7,10V), 50Hz (1,2,3,4,5V), 75Hz (1,2,3,4,5V), 100Hz (1,3,4,5V), 150Hz (1,2,3,4,5V), 200Hz (1,2,3,4,5V), 250Hz (1,2,3,4,5V), 300Hz (2,3,4,5,6V) **Name der Messungen:** Grenz_Platte_(Platzhalter Frequenz)Hz.

Tabelle 2: DPIV Einstellungen für die in den Versuchen verwendeten Frequenzen

	25Hz	50Hz	75Hz	100Hz	150Hz	200Hz	250Hz	300Hz
Bilder pro Periode	10	10	10	10	10	10	10	10
Trigger Rate (Hz)	250	500	750	1000	1500	2000	2500	3000
Bildgröße (Pixel)	1280x1024	1280x1024	1280x1024	1280x1024	420x336	420x336	420x336	420x336
Inter. Area [mm]	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
Temperatur [°C]	28	28	29	29	29	29	29	29

3.2 Ergebnisse

In Abbildung 12 ist der Periodenverlauf einer Sinusschwingung in 10 vektoriellen Bildern (t1-t10) gezeigt. Gemessen wurden 25 Hz bei einer Spannung von 5 V. Der zeitliche Abstand zwischen den Einzelbildern beträgt 0,004 s. Die Messungen fanden unmittelbar über der ebenen Platte ($y = \text{Plattendistanz [mm]}$) statt. Das Messfenster ist ca. 6 mm hoch und 7,5 mm breit. Die 10 Bilder sind in Kategorie positiv (+) und negativ (-) unterteilt. Teilchen, die sich von dem Lautsprecher weg bewegen, strömen in positiver Richtung, Teilchen, die sich zur Signalquelle hin bewegen strömen in negativer Richtung. Die Strömungsrichtung bezieht sich hierbei immer auf das Hauptströmungsfeld.

Die Einzelbilder der verschiedenen Kategorien ähneln einander sehr. Lediglich die Strömungsrichtung ist kontrovers. Auffällig ist das Anwachsen der Grenzschicht im plattennahen Bereich (t1-3 und t5-8). Auf den Abbildungen t4 sowie t9 ist die Grenzschicht schneller als die Höchstgeschwindigkeit des Strömungsfeldes. Zwischen Strömungsfeld und Grenzschicht ist ein geschwindigkeitsreduzierter Bereich erkennbar. Dieses Verlaufsmuster trat ebenfalls bei den Messungen 25 Hz (1, 2, 3, 5, 7, 10V), 50 Hz (2, 3, 4, 5V), 75 Hz und 5 V auf (Siehe CD).

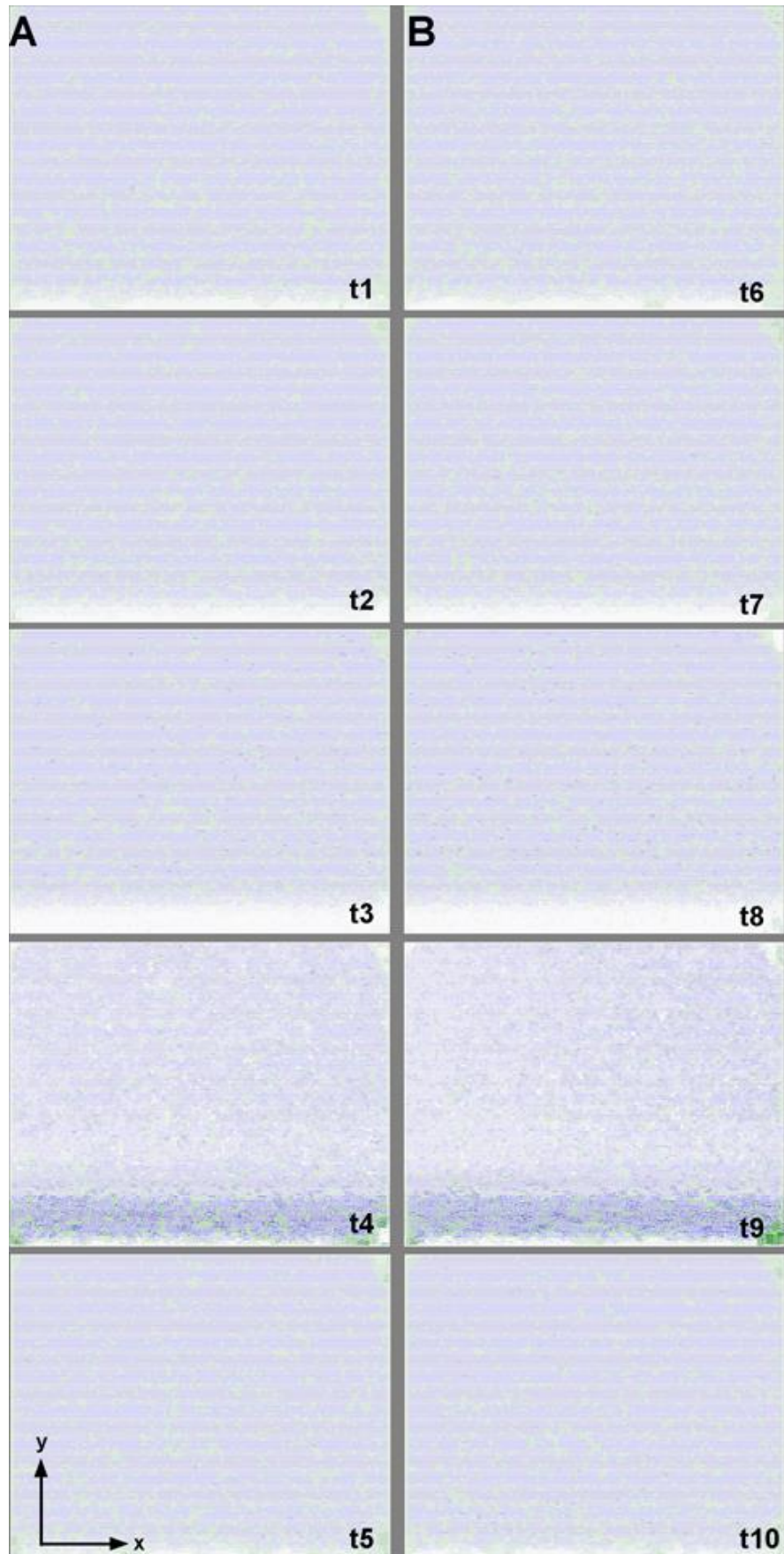


Abbildung 12: Zu sehen ist der Strömungsverlauf einer Periode einer Sinusschwingung in 10 aufeinanderfolgenden vektoriellen Bildern (t1-t10) über einer ebenen Platte. Der Reizgeber ist ein Lautsprecher (A= positive Strömungsrichtung, B= negative Strömungsrichtung). x=Strömungsrichtung, y=Plattendistanz, Frequenz: 25 Hz, Spannung: 5 V.

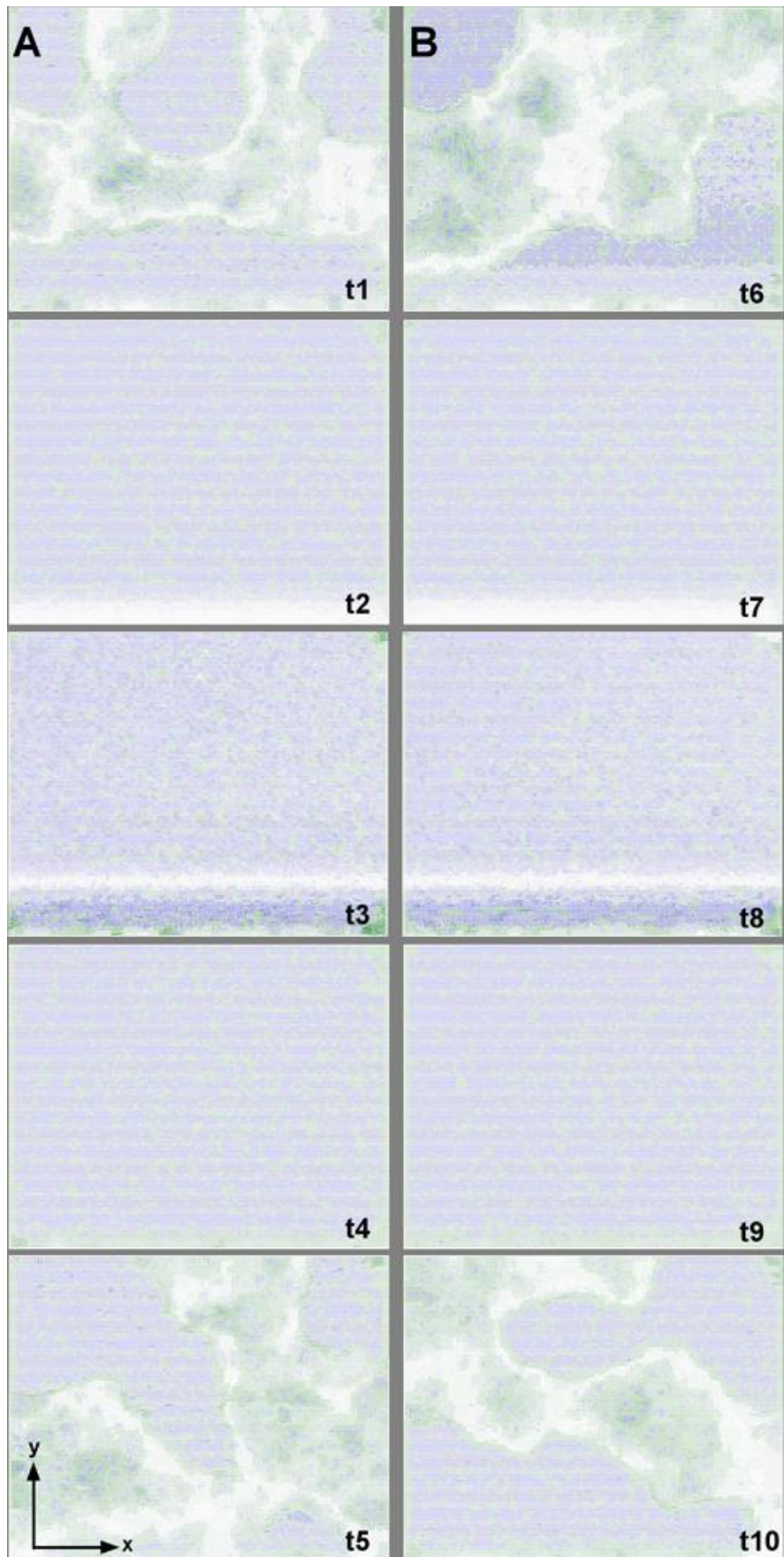


Abbildung 13: Zu sehen ist der Strömungsverlauf einer Periode einer Sinusschwingung in 10 aufeinanderfolgenden vektoriellen Bildern (t1-t10) über einer ebenen Platte. Der Reizgeber ist ein Lautsprecher (A= positive Strömungsrichtung, B= negative Strömungsrichtung). x=Strömungsrichtung, y=Plattendistanz. Frequenz: 25 Hz, Spannung: 10 V.

In Abbildung 13 ist der Periodenverlauf von 25 Hz bei einer Spannung von 10 V gezeigt. Die Bezeichnungen entsprechen den von Abbildung 12. Es ist zu beobachten, dass sich die Höhe der Grenzschicht über die Zeit ändert. In den Abbildungen t3 und t8 ist die Geschwindigkeit der Grenzschicht höher als die Höchstgeschwindigkeit des Strömungsfeldes. Ein geschwindigkeitsreduzierter Bereich ist zwischen Grenzschicht und Strömungsfeld ersichtlich. Auffällig sind die Bilder t1, t5 und t6, t10. Es ist keine einheitliche Strömungsrichtung oder Geschwindigkeit zu erkennen.

In Abbildung 14 ist ein Ablösen der Grenzschicht von der Platte zu sehen. Die Strömungsrichtungen unter- bzw. oberhalb des Geschwindigkeitsreduzierten Bereichs sind entgegengesetzt. Ein Ablösen konnte ebenfalls bei den Messungen 25 Hz bei den Spannungen 2, 7 und 10 V gezeigt werden.

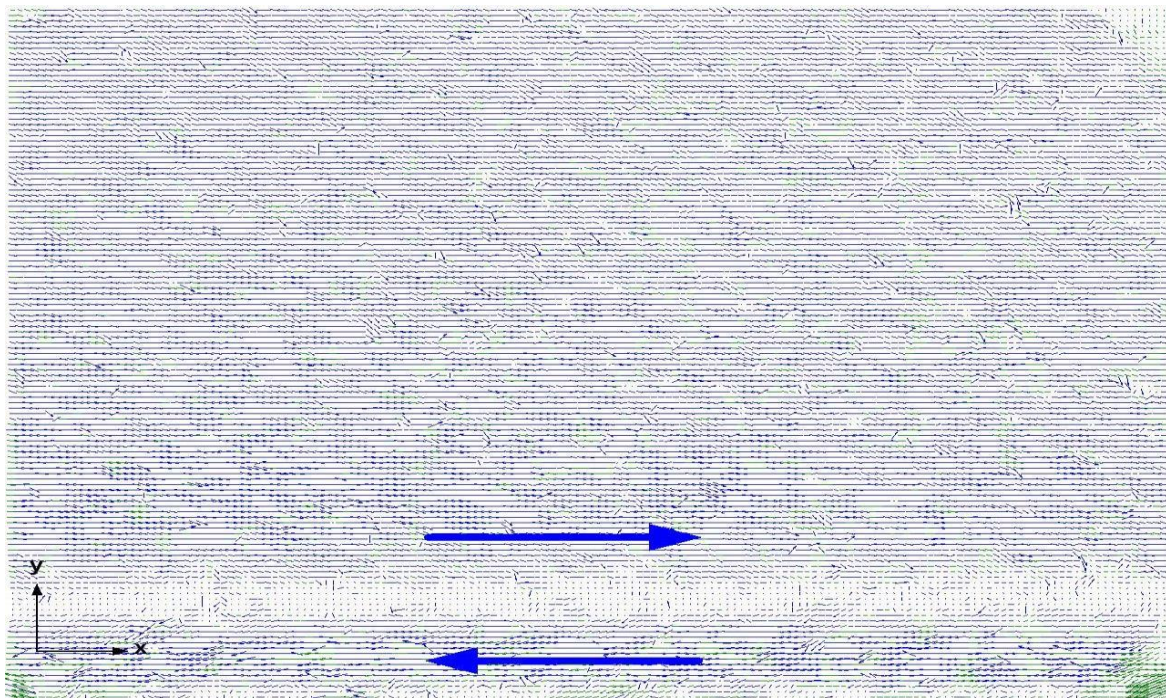


Abbildung 14: Gemessen wurde eine Frequenz von 25Hz bei einer Spannung von 2V. Zu sehen ist ein vektorielles Bild. Der geschwindigkeitsreduzierte Bereich ist nicht unmittelbar über der Platte, sondern in ca. 1mm Höhe. Die Strömungsrichtung (blaue Pfeile) ober- und unterhalb des Bereichs ist entgegengesetzt. Die Strömungsgeschwindigkeit im plattennahen Bereich ist höher als im Strömungsfeld. Das Messfenster ist ca. 6mm hoch und 7,5mm breit.

Bei den Messungen 50 Hz und 75 Hz und einer Spannung von 1 V, sowie 75 Hz und 2 V ist keine Grenzschicht zu erkennen. Erst bei 75 Hz und einer Spannung von 3 V zeichnet sich eine Grenzschicht auf den vektoriellen Darstellungen leicht ab, bei einer Spannung von 4 V ist ein Ansteigen der Grenzschicht zu erkennen.

Ab einer Frequenz von 100 Hz konnte keine Grenzschicht dargestellt werden. Es konnte lediglich der Richtungswechsel der Strömung aufgezeichnet werden.

Sämtliche Einzelbilder der gemessenen Frequenzen befinden sich zur Ansicht auf der CD.

3.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Messungen haben anfänglich mehr Fragen aufgeworfen als Antworten gegeben. Ursprünglich sollten diese Messungen als Vorversuche für die Messungen am Spinnenbein und zur Verifizierung eines funktionierenden Versuchsaufbaues dienen. Sie waren lediglich zum Abgleich von theoretischen und metrischen Daten einer stationären Grenzschicht gedacht und sollten schnell abgehandelt werden. Das Auftreten und die Existenz einer instationären Grenzschicht ist im Nachhinein mehr als logisch, zu diesem Zeitpunkt allerdings im Biologie Department der Universität Wien vollkommen unbekannt.

Entgegen aller anfänglichen Erwartungen zeigt die Grenzschicht ihr Maximum nicht im zentralen Bereich der Strömung (Abb. 5), sondern in einer wandnahen Schicht. Um mögliche Fehlerquellen zu finden, suchte ich das Gespräch mit Professor Stefan Braun und Dr. Stefan Scheichl von der TU Wien. Erst durch diese Zusammenarbeit kam heraus, dass es sich hierbei nicht um, wie ursprünglich angenommenen, einen zeitunabhängigen stationären Fall, sondern um eine instationäre, sich über die Zeit verändernde Grenzschicht handelt. Das hier aufgetretene Phänomen nennt sich Annulareffekt und wird durch die oszillatorische Schwingung des Lautsprechers hervorgerufen. Experimentell wurde es erstmals 1929 von Richardson und Tyler bei Untersuchungen von Luftschwingungen in einem Helmholtzschen Resonator entdeckt (Richardson, 1929). Die dazugehörige Theorie wurde ein Jahr später von Sexl aufgestellt. Er leitete alle auftretenden Gesetzmäßigkeiten qualitativ und quantitativ aus den Navier-Stokesschen Grundgleichungen der Hydrodynamik her, welche eine oszillierende Laminarströmung, eines inkompressiblen newtonschen Fluides, in einem Kreisrohr charakterisieren (Sexl, 1930).

Die ursprüngliche Vermutung, dass die höheren Geschwindigkeiten im wandnahen Bereich auf eine veränderte Amplitude des Lautsprechers zurückzuführen sind, ist hiermit widerlegt. Die Grenzschicht nimmt tatsächlich eine höhere Geschwindigkeit als die des Strömungsfeldes an. Eine Erklärung hierfür bietet die aufgestellte Theorie von Sexl, sowie die aktuelle Literatur nicht. Die Theorie von Sexl beschreibt

mathematisch sehr genau den Strömungshergang. Für meine Kompetenzen allerdings, waren die Gleichungen und ihre Interpretation nur schwer nachvollziehbar. Während in sämtlichen Veröffentlichungen die von Sexl aufgestellten Gleichungen als Erklärungsgrundlage und als Verifizierung der Messergebnisse dienten, konnte mir seine mathematische Theorie allein nicht weiter helfen. Auch bei einer intensiven Literaturrecherche, konnte keine Veröffentlichung gefunden werden, die verbal die Strömungsabfolge einer instationären Grenzschicht erläutert. Somit blieben viele Fragen zum Strömungshergang offen.

Das Verstehen der zeitabhängigen Grenzschicht ist für diese Arbeit allerdings essentiell. Nur wenn verstanden ist, wodurch sich das Maximum bildet, warum die Strömungsrichtung im plattennahen Bereich gegensätzlich zum Strömungsfeld ist, warum die Grenzschicht anwächst und abrupt abfällt etc. können Aussagen über ihre Wirkung auf die Trichobothrien und damit auf das Verhalten der Spinne getätigt werden. Die Ziele und die Fragestellung dieser Arbeit wurden nach diesen Erkenntnissen neu definiert. Trotz dieser Wende bleibt festzuhalten, dass ein funktionsfähiger Versuchsaufbau konstruiert wurde. Damit ist Punkt 2, aufgeführt unter Motivation und Zielsetzung erfolgreich abgeschlossen.

4 Charakterisierung der Grenzschicht

Um die Entstehung des Annulareffektes zu verstehen, ist eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Grenzschicht und der Strömung nötig. Das erste Ziel ist daher die Optimierung des Versuchsaufbaues, womit eine Verfeinerung der Messdaten erreicht werden soll. Das zweite Ziel ist eine detaillierte zeitliche Darstellung des Strömungsverlaufes, und daraus folgend eine mögliche Erklärung des Phänomens. Die Fragestellung inwieweit eine oszillierende Grenzschicht mit dem Trichobothrium agiert und somit das Verhalten von Cupiennius beeinflusst soll im Rahmen dieser Arbeit nurmehr theoretisch abgehandelt werden.

4.1 Material und Methode

Versuchsaufbau – Digital Particle Image Velocimetry (DPIV)

Der Versuchsaufbau entspricht dem unter 3.1 (Abb.: 11) beschriebenen, zuzüglich folgenden Änderungen:

- 1) Reduktion des Abstands von Kamera und Lasersheet von 9 auf 3 cm.
- 2) Bekleben des Kubusgerüsts mit Bitumenplatten.
- 3) Ersetzen der Messplatte: Die beschichtete Spanplatte (Stärke 2 cm) wird durch eine Glasplatte mit abgeschrägten Kanten (Stärke 0,1 cm) ersetzt.
- 4) Bekleben der unteren Seite der gläsernen Messplatte mit Bitumen.
- 5) Messplatte wird mittels Silikon schwingungsgedämpft auf Styroporsockeln aufgelegt.

Datenaufnahme

Die Messungen erfolgten bei einer Raumtemperatur von 28°C. Es gibt zwei Messreihen für den Vergleich einer glatten (Glas) und einer leicht gerauten Oberfläche (Einbanddeckblatt aus Leinen, schwarz, Flächengewicht: 250 g, Firma: Fellowes, Produktnummer: 5381401). Es werden jeweils pro Frequenz zehn Perioden von 25, 50 und 75 Hz aufgenommen bei einer Spannung von 1-5 V. Die Einstellungen für das DPIV (Single Frame) werden pro Messung angepasst, wobei der Fokus auf der Aufnahme einer höchstmöglichen Bilderanzahl pro Periode liegt. Die Einstellungen können aus Tabelle 3 entnommen werden. Im Folgenden wird die Ermittlung der charakteristischen Strömungskurve, der Umhüllend, beschrieben. Anschließend wird am Beispiel 25 Hz und einer Spannung von 5 V bildlich die zeitliche Auflösung stellvertretend für alle anderen Messungen (Pappe: 25 Hz, 1-4 V;

50 Hz, 1-5 V; 75 Hz, 1-5 V) dargestellt und analysiert. Eine Übersichtsabbildung der Zeitpunkte pro Messung ist im Anhang A 11– A 23 zu finden, die dazugehörigen Einzelbilder auf der CD.

Tabelle 3: DPIV Einstellungen für Messungen aufPappe und Glas		
	Pappe	Glas
25Hz (1-5V)		
Bilder pro Periode	40	20
Trigger Rate	1000	500
Bildgröße (Pixel)	1280x1024	1280x1024
50Hz (1-5V)		
Bilder pro Periode	30	20
Trigger Rate	1500	1000
Bildgröße (Pixel)	1208x698	1280x698
75Hz (1-5V)		
Bilder pro Periode	20	20
Trigger Rate	1500	1500
Bildgröße (Pixel)	1280x698	1280x698
Temperatur [°C]	28	28
Interrogation Area		
[mm]	0,045	0,045

Bestimmung der Einhüllenden von U [m/s] (Pappe und Glas)

PIV

Die Software (DynamicStudio Version 2.21) berechnet den Image Mean, den Image Arithmetic und generiert über ein statistisches Verfahren (Adaptive Correlation; 8X8Pix=final Interrogation Area Size; Number of Refinement steps = 2) ein vektorielltes Bild. Der Image Mean ist der farbliche Durchschnitt aller aufgenommenen Bilder. Er dient dazu, Rauschen oder Unstimmigkeiten herauszufiltern und Kontraste zu verstärken. Der beschriebene Effekt wird erreicht, indem der Image Mean errechnet und im Anschluss von jeder Aufnahme abgezogen wird. Das Ergebnis ist ein kontrastreiches Bild, der Image Arithmetic. Dieser ist die Grundlage für die Erstellung der vektoriellen Strömungsbilder. Für die Ermittlung der Einhüllenden werden aus der vektoriellen Darstellung fünf benachbarte Datensätze herangezogen. Ein Datensatz besteht aus den numerisch exportierten Werten der Vektoren mit den Koordinaten der Interrogation Areas x_1/y_{1-90} von jedem einzelnen Bild. Am Beispiel von 25Hz sind das 90x400 Werte, da jede Aufnahmen 90 Interrogation Areas von der Platte bis zum höchsten gemessenen Punkt aufweist und die Messung aus

insgesamt 400 Bildern bestehen. Insgesamt werden fünf Einhüllende mit verschiedenen Ausgangspositionen von x generiert, es entstehen somit fünf unterschiedliche Datensätze von einer Messung.

Die Geschwindigkeiten innerhalb einer Periode variieren stark. Die Wahrscheinlichkeit, mit 40, 30 bzw. 20 Bildern pro Periode die vorhandene Höchstgeschwindigkeit oder den Nulldurchlauf abzubilden, ist gering. Abhilfe bietet der nächste Arbeitsschritt. Es wird pro Vektor ein Geschwindigkeitsprofil von U_x (Geschwindigkeit in x -Ebene) in m/s über die Zeit t in Sekunden angefertigt und in das Programm SigmaPlot (Systat Software, Inc. SigmaPlot for Windows 10.0) eingespeist. Die Software fittet einen Sinus und erstellt einen Bericht mit allen charakteristischen Größen (siehe Anhang Abbildung A10 und auf der CD). Der Fit stellt gleichzeitig eine Qualitätskontrolle der Messung dar, kann der Prozess nicht durchgeführt werden, konnte das Programm keinen Sinus erkennen und die Messung wird verworfen. Jedes Geschwindigkeitsprofil wird in einem gesonderten SigmaPlot Notebook bearbeitet. Es gibt daher pro Frequenz und Spannung fünf Notebooks. Für die Bewältigung dieser Arbeitsschritte müssen Makros eingeführt werden. Der Quelltext befindet sich auf der CD.

Makro 1:

Trägt zu einem Datenpunkt die Geschwindigkeiten U [m/s] über die Zeit t [s] auf, fittet anschließend mit einem Sinus und erstellt einen Graphen. Anhand der gefitteten Kurve schreibt das Programm einen Report mit Angaben, die u.a. Geschwindigkeit, Phasenverschiebung sowie statistische Werte inkludieren. Jeder Report entspricht den Daten eines Vektors!

Makro 2:

Komprimiert alle von Makro 1 ermittelten Geschwindigkeiten in ein Datenblatt „Data 2“. Data 2 beinhaltet von jedem Report, der von Makro 1 erstellt wurde, die maximal Geschwindigkeit und die Phasenverschiebung mit zugehöriger Standardabweichung zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Die zusammengeführten Daten aller Messungen werden zur weiteren Bearbeitung in einer Exceltabelle vereint. Ein Datenblatt entspricht den fünf ausgewerteten Geschwindigkeitsprofilen einer Messung von einer bestimmten Frequenz und einer Spannung. Diese Werte werden gemittelt und in das Datenblatt „Final“ kopiert. Das

Datenblatt „Final“ beinhaltet demnach die Mittelwerte von den Geschwindigkeit U [m/s], sowie der Phasenverschiebung c [rad] von sämtlichen Maximalwerten einer Messung. Aus diesen Werten wird das Geschwindigkeitsprofil der Einhüllenden generiert.

Der Bezugspunkt, an dem die Phasenverschiebung c gemessen wurde, wurde von SigmaPlot für jede Messung neu gewählt. Für einen Vergleich der Daten ist ein gemeinsamer Startpunkt nötig, der mir Hilfe eines Offsets erreicht wird.

Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Auflösung wird am Beispiel von 25 Hz bei einer Spannung von 5 V erläutert. Bei dieser Messung wurden 40 Einzelbilder pro Periode zehn Mal aufgenommen. Demnach gab es zu jedem zeitlichen Zustand zehn charakteristische Bilder. Diese vektoriellen Einzelbilder wurden direkt aus der Bildersammlung der Messung in DynamicStudios manuell ausgelesen. Das Programm erstellte im Anschluss eine Vektorstatistik und exportiert die numerischen Daten von sämtlichen Vektoren.

Diese Rohdaten werden in die zugehörigen Masken von Excel eingefügt. Excel errechnet in mehreren Schritten die Daten für das Geschwindigkeitsprofil für diesen Zeitpunkt aus (Masken sind auf der CD zu finden). Da das Programm nicht für diese Menge an Daten konzipiert wurde, konnten immer nur zehn Zeitpunkte in einer Excel-Tabelle behandelt werden. Die finalen Graphiken wurden wie zuvor mit SigmaPlot erstellt und anschließend mit dem WindowsMovieMaker Version 14 zu einem Film zusammengefügt (siehe CD).

Um die Höhe der Grenzschicht von Zeitpunkt zu Zeitpunkt zu charakterisieren wurden die Daten der Einzelbilder separat mit Matlab (Version 7.9.0.529 (R2009b), TheMathWorksTM) bearbeitet. Hierbei wurden die Messpunkte mit Splines gefittet, die Maxima manuell erfasst und im Anschluss in einem weiteren Graphen dargestellt (siehe Anhang und CD).

4.2 Ergebnisse

Bestimmung der Einhüllenden von U [m/s]

Pappe

In Abbildung 15 sind die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile der Einhüllenden von U [m/s] bei 25, 50 und 75 Hz (oben) mit zugehöriger Phasenverschiebung c [rad] (unten) bei Spannungen von 1-5 V wiedergegeben. Die Geschwindigkeitsprofile sowie die Graphen der Phasenverschiebung weisen jeweils einen charakteristischen Verlauf auf. Die Geschwindigkeiten erhöhen sich zunächst mit wachsender Plattendistanz, erreichen ein Maximum und pendeln sich anschließend auf eine geringere Geschwindigkeit wieder ein. Die Phasenverschiebungsprofile bilden ein spiegelbildliches Pendant. In Plattennähe besteht ein Bereich, in dem sich die Phasenverschiebung stetig verkleinert, ein Minimum erreicht wird und sich die Messpunkte im Anschluss auf einen etwas größeren konstanten Wert einstellen.

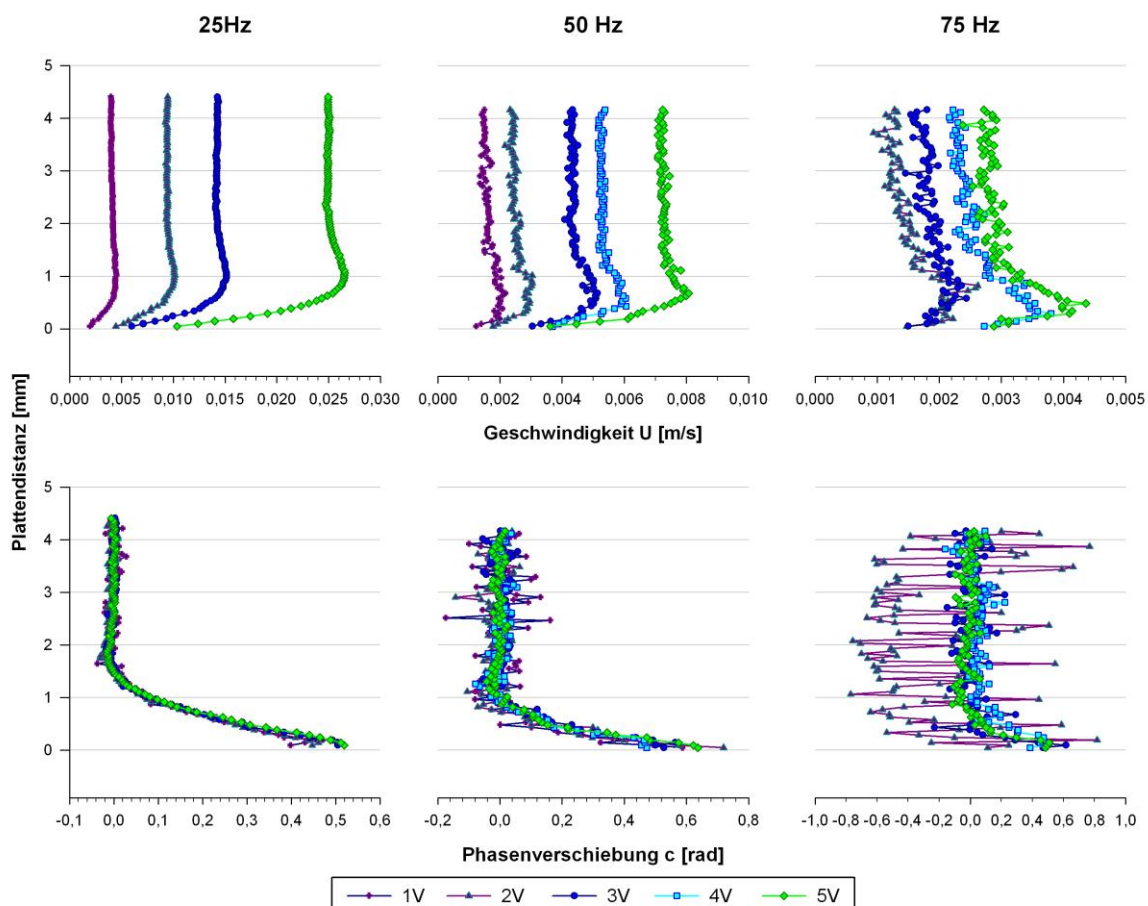


Abbildung 15: Die verschiedene Geschwindigkeitsprofile der Einhüllenden von U [m/s] bei 25, 50 und 75Hz (oben) mit zugehöriger Phasenverschiebung c [rad] (unten) bei Spannungen von 1-5 V. Das Substrat ist Pappe.

Dieser typische Verlauf ist bei allen Frequenzen gegeben. Die maximalen Geschwindigkeiten erhöhen sich innerhalb einer Frequenz mit der Spannung und werden mit steigender Frequenz verringert. Die Lage des Maximums ist innerhalb einer Frequenz nahezu konstant und nimmt von 25 zu 50 zu 75 Hz mit ca. 0,9 zu 0,6 zu 0,4 mm Plattendistanz stetig ab. Die aufgenommenen Datenpunkte geben mit ansteigender Frequenz ein zunehmend unruhigeres Bild ab.

Glas

In Abbildung 16 sind die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile der Einhüllenden von U [m/s] bei 25, 50 und 75 Hz (oben) mit zugehöriger Phasenverschiebung c [rad] (unten) bei Spannungen von 1-5 V wiedergegeben. Die Geschwindigkeiten werden mit Ansteigen der Amplitude stetig erhöht und reduzieren sich bei ansteigender Frequenz. Das charakteristische Profil besteht aus einer senkrechten Geraden und weist durchweg keine Geschwindigkeitsgradienten auf. Die Werte der Phasenverschiebung sind über die gesamte Messstrecke konstant.

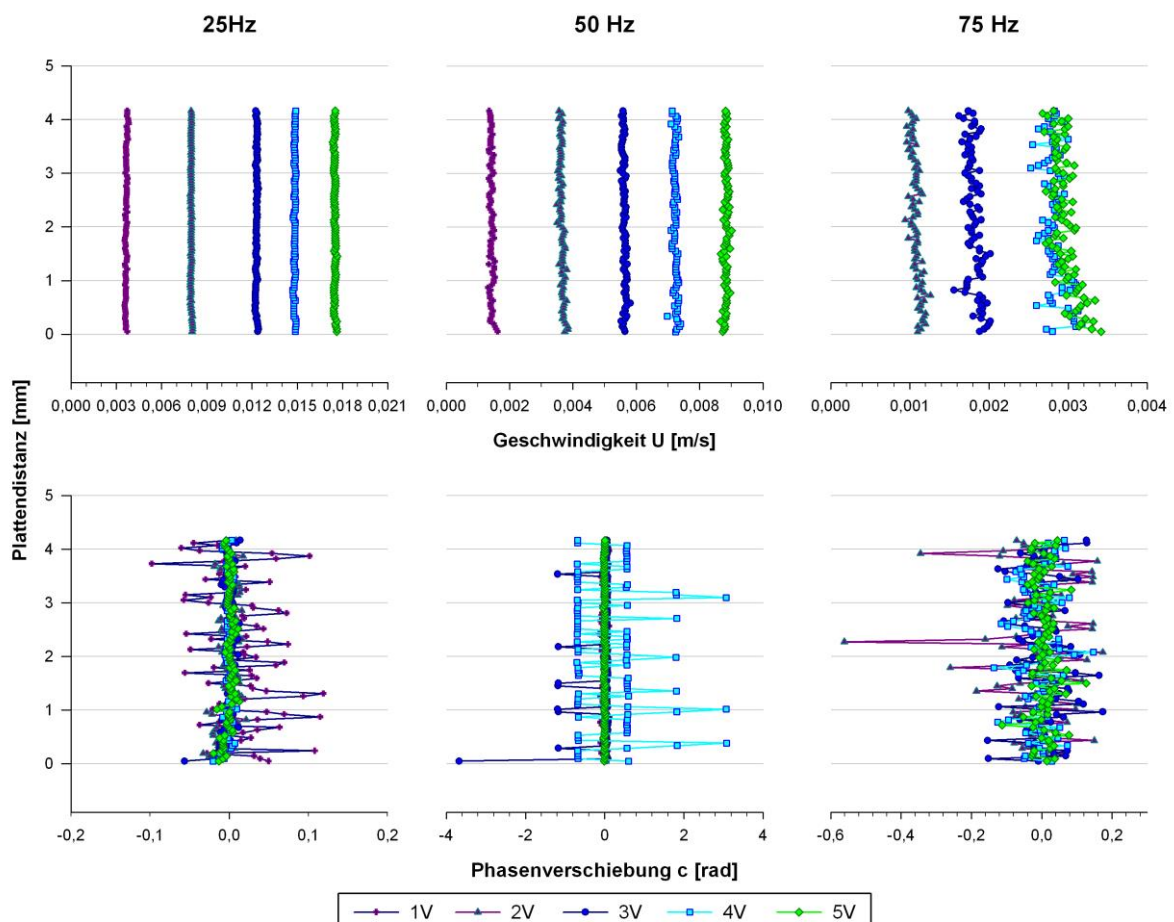


Abbildung 16: Die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile der Einhüllenden von U [m/s] bei 25, 50 und 75 Hz (oben) mit zugehöriger Phasenverschiebung c [rad] (unten) bei Spannungen von 1-5 V. Das Substrat ist Glas.

Zeitliche Auflösung

Auf den Abbildungen 17.1 bis 17.7 sind insgesamt 40 zeitlich aufeinanderfolgende Einzelbilder von Geschwindigkeitsprofilen der Messung 25 Hz und 5 V zu sehen. Der zeitliche Abstand von Bild zu Bild beträgt $6,25 \times 10^{-4}$ Sekunden. Der rote Balken markiert den Nullpunkt, die unterschiedlichen Vorzeichen stehen für verschiedene Bewegungsrichtungen der Teilchen. Positiv kennzeichnet die Strömung vom Lautsprecher weg, negativ zum Reizgeber hin. Der erste abgebildete Zeitpunkt Bild 1 zeigt die Zughöchstgeschwindigkeit der Strömung von ca. 0,024 m/s und damit den Wendepunkt des Sinus. Das Maximum liegt bei ca. 0,026 m/s. Die Geschwindigkeit reduziert sich in den darauffolgenden Abbildungen stetig. Abbildung 17.2 Bild 7 leitet eine Veränderung des Profils ein. Der erste, direkt auf der Platte aufliegende Messpunkt kommt vor allen anderen zum Stillstand und ändert in den darauffolgenden Abbildungen seine Richtung. Erst 0,1 Sekunden später, zu sehen auf Bild 11, erreicht das Flowfield den Stillstand. Zu diesem Zeitpunkt hat sich bereits ein Maximum nahe der Platte mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,009 m/s gebildet, welches von da an bis Bild 18 gut zu erkennen ist. In den darauffolgenden Abbildungen verringert sich der Geschwindigkeitsgradient zunehmend, bis die Druckhöchstgeschwindigkeit von ca 0,026 m/s erreicht ist. Bild 20 zeigt den 2. Wendepunkt des Sinussignals. Eine halbe Periode ist durchlaufen, die zuvor beschriebenen Abläufe wiederholen sich mit umgekehrtem Vorzeichen.

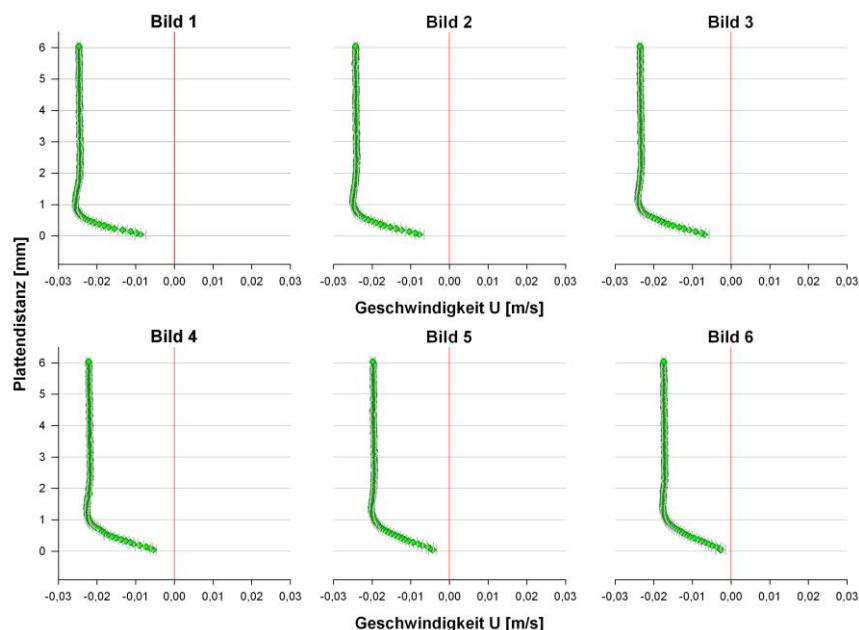


Abbildung 17.1: Sechs aufeinanderfolgende Geschwindigkeitsprofile der Messung 25 Hz 5 V mit zugehöriger Standardabweichung (grau). Bild 1 ist das Abbild des 1. Wendepunktes bei Zug.

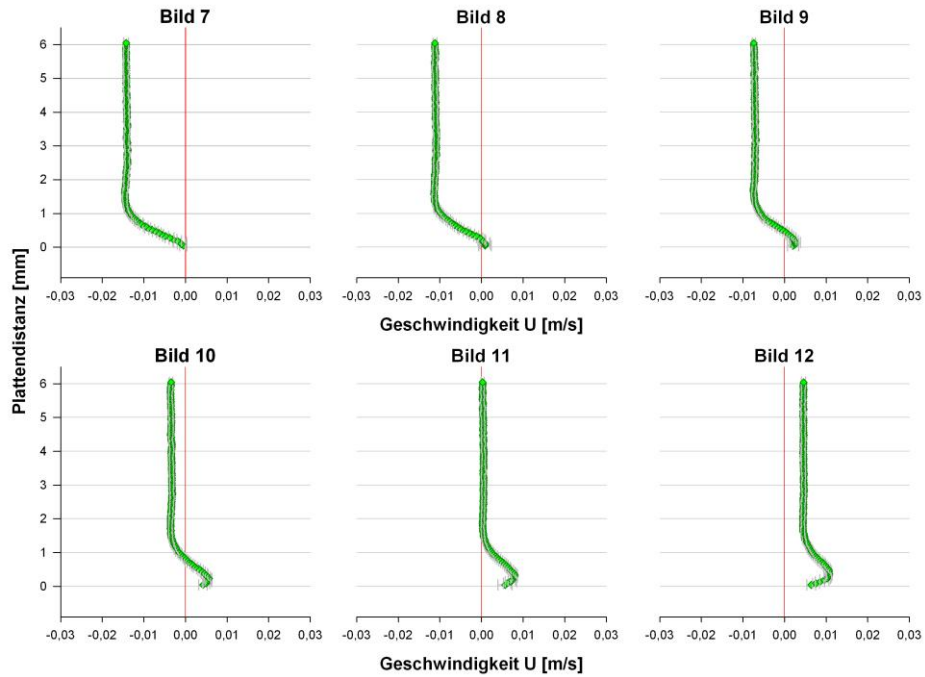


Abbildung 17.2: Messung 25 Hz 5 V. Momentaufnahme 7-12 mit zugehöriger Standardabweichung (grau). Ab Bild 11 wechseln die Teilchen des Flowfields die Richtung.

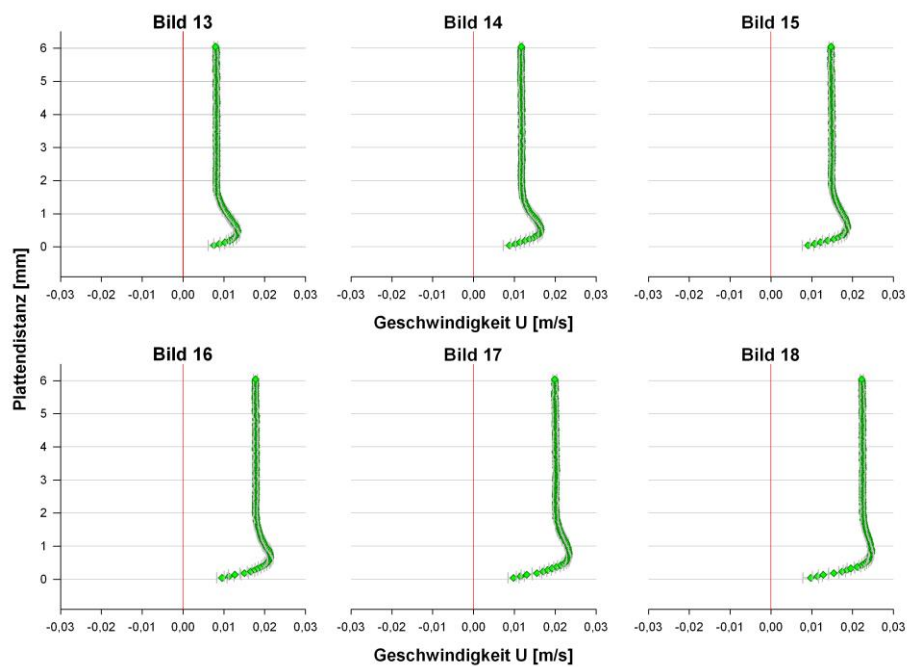


Abbildung 17.3: Messung 25 Hz 5 V. Momentaufnahme 13-18 mit zugehöriger Standardabweichung (grau).

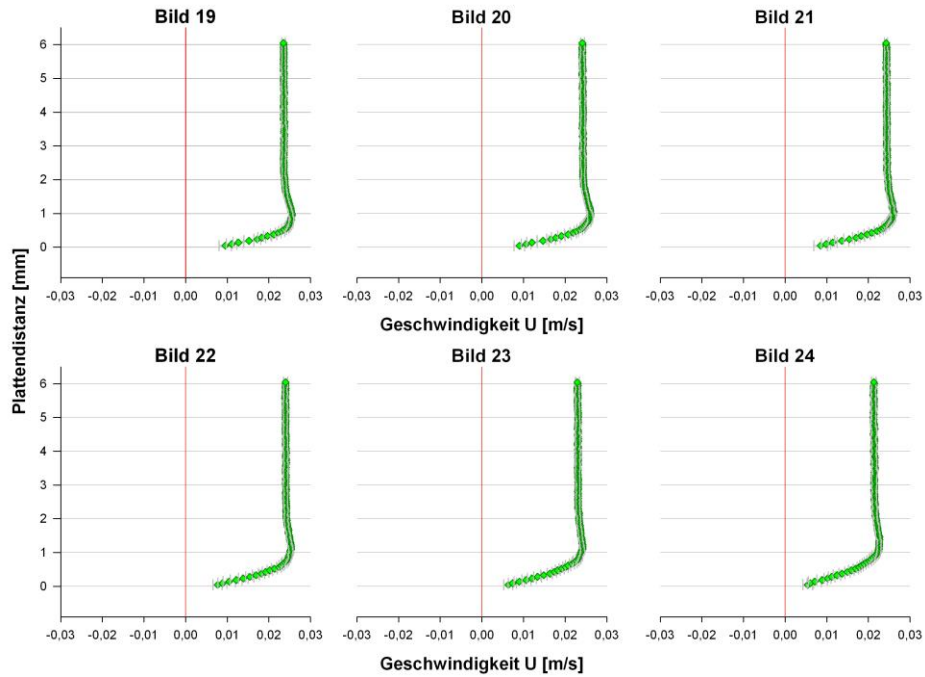


Abbildung 17.4: Messung 25 Hz 5 V. Momentaufnahme 19-24 mit zugehöriger Standardabweichung (grau).

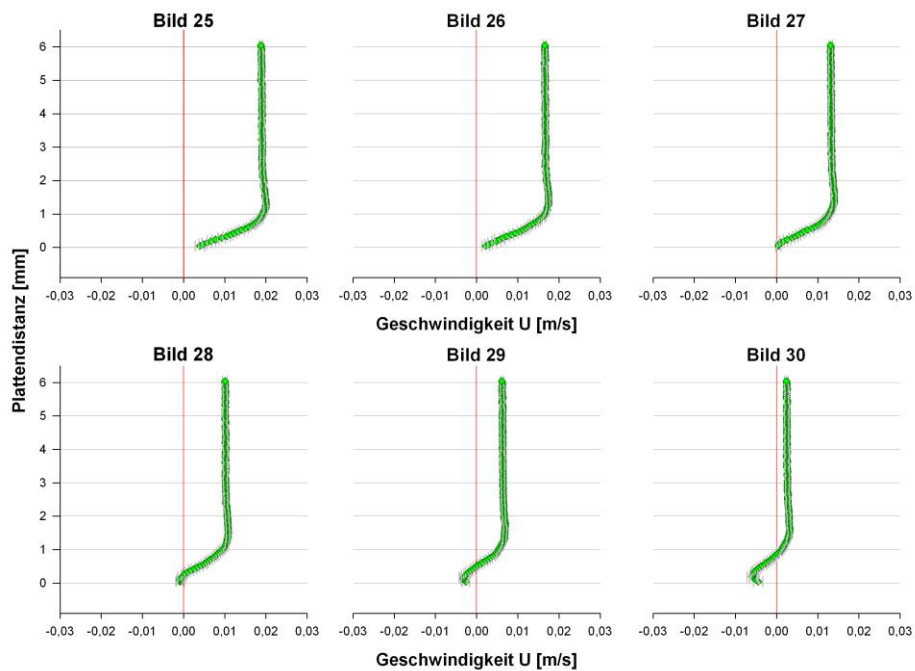


Abbildung 17.5: Messung 25 Hz 5 V. Momentaufnahme 25-30 mit zugehöriger Standardabweichung.

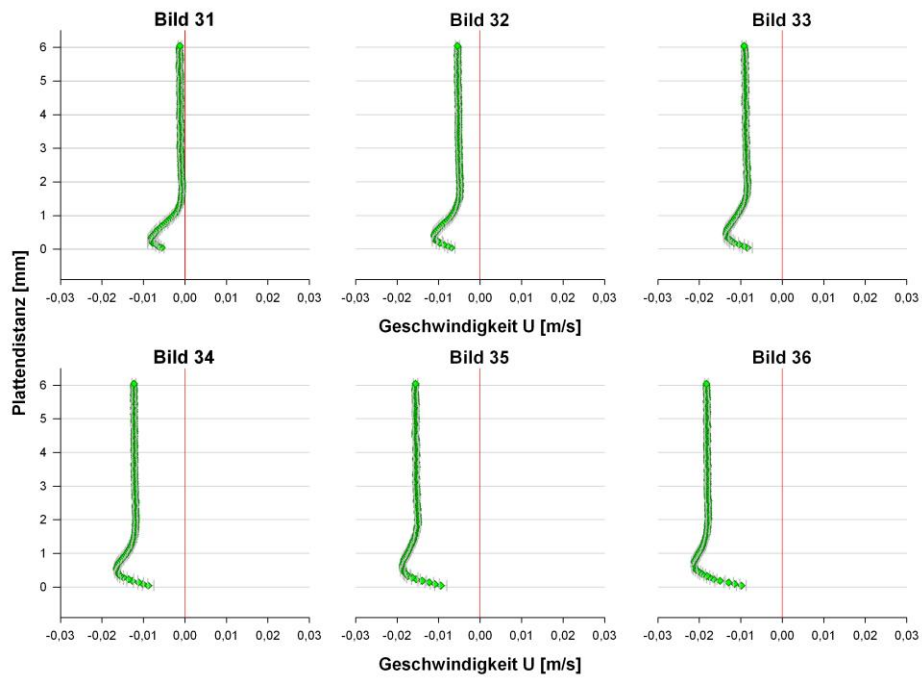


Abbildung 17.6: Messung 25 Hz 5 V. Momentaufnahme 31-36 mit zugehöriger Standardabweichung (grau).

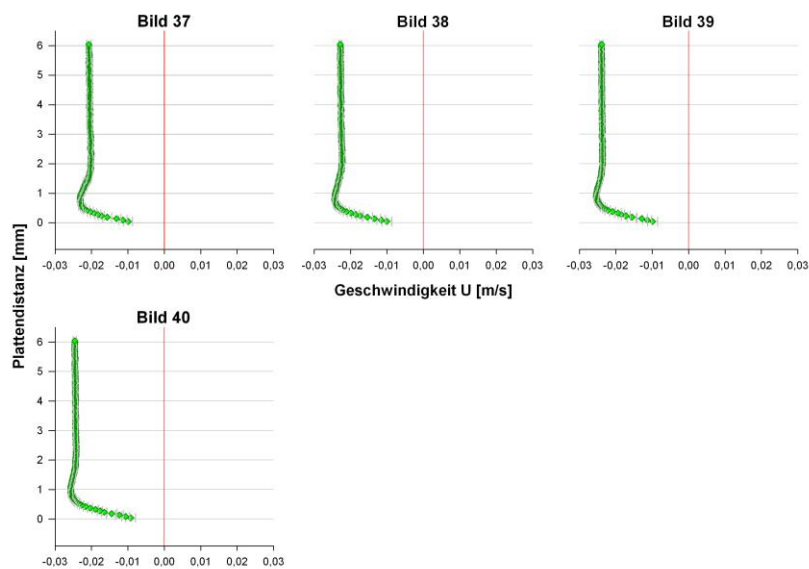


Abbildung 17.7: Messung 25 Hz 5 V. Momentaufnahme 7-12 mit zugehöriger Standardabweichung (grau).

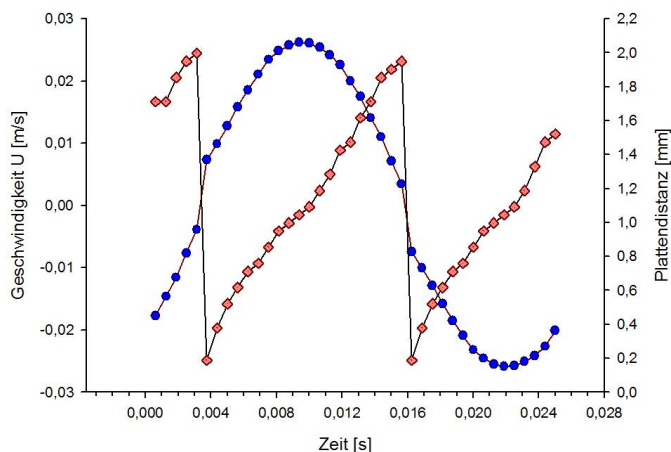


Abbildung 18: Die Geschwindigkeit (blau) und die Plattendistanz (rot) des Maximums sind gegen den Zeitraum von einer Periode aufgetragen. Die Messwerte entstammen von 25 Hz bei 5 V.

Auffällig ist, dass es sich über eine halbe Periode stetig aufbaut und dann abrupt vom erreichten Höhepunkt auf annähernd 0 mm abfällt. Die Abbildungen aller anderen Messungen sind auf der CD zu finden.

4.3 Diskussion

Bestimmung der Einhüllenden von U [m/s]

Pappe

Laut Theorie ist die Grenzschicht rein von der Frequenz abhängig und dürfte sich bei gleicher Frequenz und verschiedenen Amplituden nicht ändern (Sexl, 1930). In Abbildung 15 kann diese These anhand der Phasenverschiebung c bestätigt werden. Bei einer Frequenz besitzen alle Spannungen von 1-5 V den gleichen Verlauf, trotz der Geschwindigkeitsunterschiede. Die Begründung liegt in der Phasenverschiebung, welche durch Reibungseffekte zwischen den Luftmolekülen von Schicht zu Schicht verursacht wird. Da es sich grundsätzlich um Reibung von Luft zu Luft handelt ist das Verhältnis, mit der die Phase verschoben wird konstant und somit von der herrschenden Geschwindigkeit unabhängig.

Für die Bestimmung des Wandabstandes des Geschwindigkeitsmaximums einer laminar oszillierender Rohrströmungen gibt Sexl folgende Beziehung an:

$$y = 1,3 \left(\frac{v}{f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

In Abbildung 18 sind der Höhenunterschied und die Geschwindigkeitsschwankung des Maximums gegen die Zeit aufgetragen. Innerhalb von 0,0125 s werden die Teilchen von Null auf ca. 0,0075 m/s beschleunigt und wieder zum Stillstand gebracht, bevor sie die Richtung wechseln und erneut beschleunigt werden. Während dieser Zeit schwankt das Maximum um ca. 2 mm.

Hierbei steht y für die Plattendistanz, ν für die kinematische Viskosität und f für die Frequenz. Daraus folgt, dass sich das Maximum mit höher werdender Frequenz der Platten annähert (Harris, 1969). Auch das kann aus Abbildung 15 entnommen werden. Die Lage des überschwelligen Maximums nimmt von 25 zu 50 zu 75 Hz mit ca. 0,9 zu 0,6 zu 0,4 mm stetig ab.

Auffällig ist, dass das Rauschen der Messwerte mit zunehmender Frequenz größer wird. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt durch die begrenzten technischen Möglichkeiten zu begründen ist und nicht dadurch, dass die Grenzschicht unbeständiger wird. Bei einer Frequenz von 25 Hz liegt die Wellenlänge bei 13,7 m, bei 50 Hz beträgt sie nur noch 6,9 m und schrumpft bei 75 Hz auf 4,6 m. Diese Reduktion führt dazu, dass auf kleinerem Raum höhere Geschwindigkeitsgradienten auftreten. Die Software des DPIV errechnet aber immer über eine Interrogation Area von $0,045 \text{ mm}^2$. Zudem legen die Teilchen, mit zunehmender Frequenz und konstantem Schalldruck, geringere Wege zurück. Das DPIV ist für die Geschwindigkeitsbestimmung allerdings darauf angewiesen, dass die Distanz der Teilchen von Bild zu Bild groß genug ist. Die Folge ist eine geringere Bilderanzahl pro Periode mit ansteigender Frequenz. Das heißt, dass die Messungen bei gleicher Auflösung von Frequenz zu Frequenz ungenauer werden. Bei Versuchen mit 100 Hz konnte die Grenzschicht schon nicht mehr aufgelöst werden. Auch bei den Messungen von 75 Hz von 1-2 V waren die zurückgelegten Wege der Teilchen zu gering. Die Messung bei einer Spannung von 1 V wurde gänzlich verworfen, bei 2 V sind die Unstimmigkeiten bei der Phasenverschiebung ganz stark gegeben (Abbildung 15).

Hinweis

Nicht dargestellt ist der Graph für 25 Hz 4 Volt. Bedauerlicherweise sind die Daten bei einem unangemeldeten Stromausfall irreversibel verloren gegangen. Der Leser möge mir soweit vertrauen, dass die Messung denselben charakteristischen Verlauf zeigte und zwischen den Verläufen von 3 und 5 Volt zu finden war.

Glas

Die Messungen auf einer Glasplatte zeigen keine Grenzschicht auf, obwohl die Versuche unter identischen Rahmenbedingungen wie bei Pappe durchgeführt wurden. Erstaunlicherweise konnten die Versuche auch nicht mit den gleichen Einstellungen wie zuvor vermessen werden. Die Bilderanzahl pro Periode musste

reduziert werden. Die erste Vermutung lag darin, dass die Grenzschicht durch die geringere Reibung so klein geworden ist, dass sie mit der Messapparatur nicht aufgelöst werden konnte. Allerdings sollte laut Theorie der Untergrund auf die Grenzschicht keinen Einfluss haben, da die erste Molekülschicht auf eine Geschwindigkeit von Null m/s abgebremst wird und danach das Reibungsverhältnis zwischen den Schichten, wie zuvor bei Pappe beschrieben, konstant bleibt. Überlegungen, ob diese Entwicklung auf einen veränderten Temperaturfluss zwischen den Messungen von Pappe und von Glas zurückzuführen ist, wurde aufgrund vorheriger Versuche verworfen! Bei einem vorläufigen Versuchsaufbau wurden die Messungen auf einer beschichteten Spanplatte vollführt, welche ebenfalls Schwierigkeiten bereitete. Die Vermutung liegt demnach nahe, dass die Oberflächenrauheit entgegen der Theorie sehr wohl einen Einfluss hat. Für eine valide Aussage müssten weitere Testläufe angesetzt werden, bei denen die Rauheit systematisch bestimmt und verglichen wird.

Ebenfalls zu vermerken sind die gemessenen geringeren Geschwindigkeiten des Flowfields bei Glas im Vergleich zu Pappe. Auch das ist eine Folge der geringeren Auflösung. Bei Glas musste die Anzahl der Bilder auf 20 pro Periode reduziert werden, um den wandnahen Bereich darstellen zu können. Somit wird über einen zu großen Zeitraum gemittelt, wodurch die Maximalgeschwindigkeiten verfälscht werden. Bei Messungen mit einer höheren Bilderanzahl konnte der wandnahe Bereich nicht dargestellt werden. Vermutlich ist dies wieder auf die Größe der Interrogation Area von $0,045 \text{ mm}^2$ zurückzuführen. Denn, wird die Grenzschicht von Glas im Vergleich zu Pappe kleiner, variieren die Geschwindigkeiten in y-Richtung innerhalb von $0,045 \text{ mm}^2$ stärker. Das DPIV mittelt für diese Höhe der Grenzschicht über einen zu großen Bereich. Durch die Reduktion der Bilder (Tab.: 3), kann der wandnahe Bereich zwar dargestellt werden, jedoch ist die Auflösung, für eine Darstellung der Grenzschicht zu grob. Die Grenzen unseres DPIVs sind erreicht.

Aufgrund des konstanten Verlaufs, wurde bei Glas keine Entwicklung von Zeitpunkt zu Zeitpunkt ausgewertet. Die Grenzschicht ist für Glas nicht auswertbar.

Zeitliche Auflösung

Viele Problemstellungen der Aerodynamik erfordern ein tieferes Verständnis für solche instationären Bereiche und die damit zusammenhängenden Effekte auf die Strömung oder auf das zu untersuchende Objekt (Rott, 1964). Umso erstaunlicher, dass es unter den Strömungsmechanikern nicht üblich ist, mit den einzelnen

Momenten zu arbeiten, sondern vielmehr mit den Werten der Einhüllenden bzw. der mittleren Geschwindigkeiten. Ebenso werden die Richtungswechsel der Moleküle während der oszillatorischen Bewegung oft vernachlässigt. Eine Begründung hierfür könnte in der Messmethodik liegen. Messungen mit einem PIV sind erst seit den frühen 80ern modern geworden. Richardson und alle unmittelbaren Nachfolger ermittelten die Geschwindigkeiten durch ein Hitzdrahtanemometer, welches die Richtung der Partikel nicht wiedergeben kann.

Die gemessenen zeitlichen Verläufe entsprechen der Theorie vollkommen (CD: Theoretischer Verlauf und Animation, hier: x-Achse: Plattendistanz, y-Achse: Geschwindigkeit). Die Messungen sind mit 40, 30 bzw. 20 Bildern pro Periode bei 25, 50 und 75 Hz (Tab.: 3) die genauesten experimentell ermittelten Daten.

Auffällig ist, dass die Lage des Maximums zunächst stetig ansteigt, um dann bei maximaler Höhe von einem Moment auf den anderen auf $<0,2$ mm abfällt (Abbildung 18). Es scheint, dass am Punkt des Strömungsstillstandes, also der Moment bei dem sich die Richtung der Partikel ändert und sie für einen kurzen Moment nicht in Bewegung sind, Reibungseffekte ausschließlich über dem direkten Wandbereich existieren. Die Grenzschicht ist im Verhältnis klein. Gewinnen die Teilchen wieder an Geschwindigkeit, baut sich die Grenzschicht kontinuierlich bis zur maximalen Höhe auf, um erneut abrupt von maximale auf minimale Höhe zu fallen.

Wie entsteht der Annulareffekt?

Die angelegte Strömung wird in diesem Beispiel von einem Lautsprecher generiert, bei Richardson war es ein Helmholtzschen Resonator. In beiden Fällen entsteht die laminare Strömung zu gleichen Teilen aus Druck- und Zugkräften. Die Symmetrie dieser Kräfte kann sowohl aus den Abbildungen 12 und 13, sowie 17.1-17.7 nachvollzogen werden. Das heißt, dass die Luftmoleküle in regelmäßig aufeinanderfolgenden Teilabschnitten von der Reizquelle weggedrückt und wieder angezogen werden. Abbildung 19 verdeutlicht den Zusammenhang von der Geschwindigkeit der Partikel und den Druck- bzw. Zugkräften des Lautsprechers über die Zeit. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass die Strömungsrichtung nur zur Hälfte mit den Kräften des Reizgebers im Einklang ist. Es ist nicht der Fall, dass bei Druck- bzw. Zugkräften des Lautsprechers, die Partikel zeitnah zu bzw. entgegen der Reizquelle strömen. Die Luftpartikel werden von den Druckkräften so lange beschleunigt, bis der Lautsprecher sein Krafteinwirkung umdreht. Die jetzt wirkenden Zugkräfte bremsen die Geschwindigkeit der Partikel bis zum Stillstand ab. Erst jetzt

erfolgt der Richtungswechsel der Teilchen, die bis zum erneuten Wirken der Druckkraft beschleunigt werden. Das Strömungsfeld bewegt sich einheitlich und

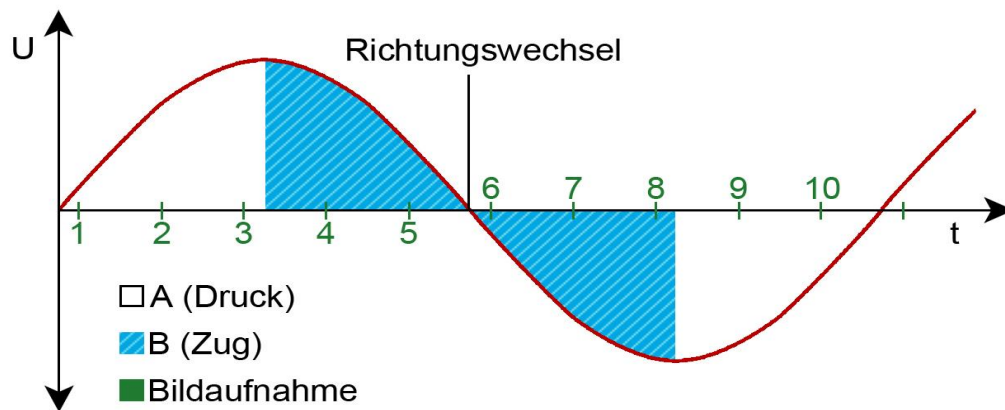


Abbildung 19: Schematische Darstellung von dem Verlauf der Geschwindigkeit (U) von Partikeln innerhalb einer oszillatorischen Strömung über die Zeit (t). Das Sinussignal (rot) wird durch einen Lautsprecher als Reizgeber generiert. Die weißen bzw. blauen Abschnitte markieren die Druck bzw. Zugphase des Lautsprechers. Die Zahlen (grün) stellen die Zeitpunkte der Bildaufnahme dar. Der zeitliche Abstand von Bild zu Bild ist hierbei konstant, nicht aber der Anfangspunkt der Bildaufnahme!

gleichmäßig. Zur Erinnerung: Eine Grenzschicht ist eine Schicht, die an der Grenze zwischen zwei Fluiden oder einem Fluid und einem Festkörper aufgrund von Reibungseffekten auftritt. Die Schichten im wandnahen Bereich sind demnach geschwindigkeitsreduziert.

Beim Einsetzen des Kraftrichtungswechsels des Lautsprechers besitzt das Strömungsfeld eine höhere Geschwindigkeit als die Schichten im wandnahen Bereich. Hauptströmung und Grenzschichtströmung gehen mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten in den Kräftewechsel. Daraus folgt, dass der wandnahe Bereich früher als das Flowfield zum Stillstand und somit früher die Richtung wechselt. Dadurch werden die Teilchen der Grenzschicht über einen längeren Zeitraum beschleunigt als die Teilchen der Hauptströmung. Dadurch erreichen sie eine höhere Maximalgeschwindigkeit als das Strömungsfeld. Die charakteristischen Eigenschaften des Annulareffektes setzen sich zusammen aus: 1) Anwachsen und abrupten Abfallen der Grenzschicht, 2) Zeitweise unterschiedliche Strömungsrichtung von Grenzschicht und Strömungsfeld, 3) Grenzschicht übertrifft Höchstgeschwindigkeiten des Strömungsfeldes.

Die Darstellung sowie die Charakterisierung einer oszillierenden Grenzschicht auf einer ebenen Platte für biologisch relevanten Messungen ist somit erfolgreich abgeschlossen. Der finale und noch ausstehende Sachverhalt, nämlich inwieweit die Grenzschicht mit dem Trichobothrium agiert und die Verhaltensweise der Spinne beeinflusst, wird im nächsten Abschnitt theoretisch abgehandelt.

5 Wie sieht die Grenzschicht auf dem Spinnenbein aus?

Trichobothrien sind die Luftbewegungsempfänger der Spinne. Bei der Beantwortung der Fragen, wie eine Luftbewegung zu einer Haarbewegung führt und was das Haar tatsächlich bei kontrollierter Reizung im Experiment macht, stieß die Forschungsgruppe um Professor Barth (Fachbereich Neurobiologie der Universität Wien) und JAC Humphrey (Department of Mechanical Engineering der University of California at Berkeley) auf die mögliche Rolle einer Grenzschicht.

Ihre Theorie hierbei ist, dass die verschiedenen Längen der Trichobothrien innerhalb einer Gruppe auf die Größe der auftretenden Grenzschicht auf dem Spinnenbein optimiert sind. Erst durch diesen funktionalen Zusammenhang zwischen Grenzschichthöhe und Trichobothrienlänge, wird es der Spinne ermöglicht eine adäquate Reizaufnahme durchzuführen. Damit wird gesagt, dass die Höhe der Grenzschicht auf dem Spinnenbein die Funktionsweise des Trichobothrieums beeinflusst und damit das Verhalten der Spinne signifikant prägt. Oder noch deutlicher: Die Konstruktion des sensorischen Systems „Trichobothrium“ ist auf die Größe der Grenzschicht ausgelegt und optimiert.

Im Folgenden möchte ich diese Theorie mit den aktuellen Forschungsergebnissen abgleichen und kritisch hinterfragen.

5.1 Das Mathematische Modell von Humphrey *et al.*

Die Grundlage für das von Humphrey aufgestellte Modell ist, wie bei den praktischen Messungen auch, ein alleinstehendes Trichobothrium auf dem Spinnenbein. Er vereinfacht Bein und Trichobothrium durch Zylinder mit einer glatten Oberfläche. Ihm ist dabei bewusst, dass zumindest das Trichobothrium durch eine Kegelform vereinfacht werden müsste. Humphrey rechtfertigt sich dadurch, dass die Strömungsverhältnisse um einen Zylinder im Gegensatz zu einem Kegel weitaus besser verstanden sind. Für das Modell wird der reale Durchmesser des Spinnenbeines mit der Höhe der Beinbehaarung ergänzt. Senkrecht auf dem Zylinder steht das Modell des Trichobothrieums. Dieses besteht aus 2 glatten, unflexiblen und zueinander rechtwinklig ausgerichteten Zylindern (Abbildung 20). Der rechte Winkel an der Spitze soll hierbei die Krümmung simulieren. Zusammen ergeben sie die Gesamthaarlänge (Humphrey *et al.*, 1993).

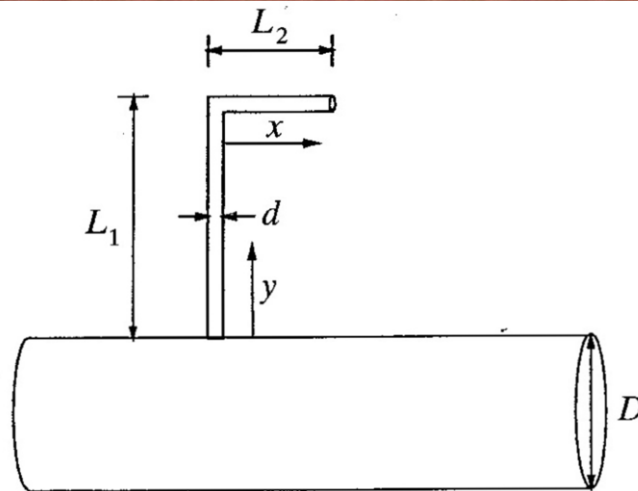


Abbildung 20: Oben: Zu sehen ist ein Hinterbein von *Cupiennius salei*. Die Begrenzungen (weiß) verdeutlichen den Beinumriss. Die Verbindungslinie (weiß) kennzeichnet den Beindurchmesser, die Ergänzungen (grün) kennzeichnen den Durchmesser D mit dem Humphrey *et al.* rechnet. **Unten:** Zu sehen ist eine Schemazeichnung von dem Modell nach Humphrey *et al.* D : Durchmesser Bein, d : Durchmesser Trichobothrium, L_1 : Trichobothrienlänge bis zur Krümmung, L_2 : Länge der Krümmung, x und y beschreiben die Ausrichtungsebenen (Humphrey *et al.*, 1993).

Die Oberflächenrauigkeit des Trichobothriums wird mit dem Argument vernachlässigt, dass die Verteilung der Protuberanzen sehr dicht und homogen ist. Die Abstände sind so klein, dass Luftmoleküle zwar eindringen, sich aber nicht innerhalb der Struktur bewegen können. Für die Berechnung des Flächenträgheitsmoments des Trichobothriums spielen sie daher keine Rolle (Humphrey *et al.*, 1993). Die Rauigkeit durch die Oberflächenbehaarung auf dem

Spinnenbein wird nicht nur kommentarlos ignoriert, sondern wird als glatte Erweiterung der Beinoberfläche angesehen (Humphrey *et al.*, 1993).

Diese Ausführung verwundert sehr! Denn die Verteilung der Tasthaare ist zwar homogen, aber ihr Abstand zueinander ist im Vergleich zu den Abständen der Protuberanzen sehr groß. Das heißt, Luftmoleküle können nicht nur eindringen, sondern sich auch in den Zwischenräumen bewegen und besitzen damit einen signifikanten Einfluss auf die Luftströmung und damit auch auf die Bildung einer Grenzschicht. Des Weiteren ist die massive Vergrößerung des Durchmessers D von ca. 0,2 cm auf ca. 0,4 cm in diesem Beispiel (Abb.: 20) ebenfalls in Frage zu stellen. Eine Mögliche Erklärung für diese Maßnahme ist, dass die Behaarung als Oberflächenrauigkeit interpretiert wird und diese kann für die Bildung einer Grenzschicht vernachlässigt werden (Schlichting, 2006). Allerdings sind die Tasthaare in einer Größenordnung anzutreffen, bei der es fraglich ist, ob es sich hierbei nicht um eine Oberflächenstruktur handelt. Eine Oberflächenstruktur hingegen hätte einen sehr starken Einfluss auf die Luftströmung (Schlichting, 2006)! Diese Maßnahme allein lässt zweifeln, ob mit diesem Modell, unter diesen Voraussetzungen überhaupt valide Aussagen getroffen werden können. Hinzu kommt die starke Simplifizierung der Strömungsrichtung. Im Modell werden eine einzige Frequenz und eine bestimmte Strömungsrichtung angenommen, die es so als natürlichen Reiz nicht geben kann. Welche Folgen bzw. Einflüsse diese Reduktion hat, möchte ich zu einem späteren Zeitpunkt diskutieren. Hier soll lediglich hervorgehoben werden, dass die Summe der Vereinfachungen, wie sie hier vorgenommen wurden, ganz klar mit Vorsicht zu genießen sind. Dies ist auch dem Autor selbst bewusst, denn er äußert sich folgendermaßen zu seinem Modell: „*The sensitivity of the boundary layer thickness to substrate-air flow relative orientation raises a serious question concerning the validity of oversimplified analyses based on the flat substrate assumption*“ (Humphrey *et al.*, 1993).

5.2 Die Messungen am Spinnenbein von Barth *et al.*

Das Bein der Spinne wurde fixiert und die Tasthaare entfernt. Die Tasthaare bilden die Oberflächenstruktur, zusehen in Abbildung 20, welche Humphrey *et al.* in seinem Modell integriert. Das zu vermessende Trichobothrium steht frei. Reizgeber für den oszillierenden Grundstrom bilden 2 gegenüberliegende und synchronisierte Lautsprecher. Die Geschwindigkeiten der Grenzschicht selbst werden mit einem

Laser Doppler Anemometer bestimmt (Barth *et al.*, 1993). Die Dicke der Grenzschicht bei einer oszillierenden Strömung variiert zwischen 2600 μm bei 10 Hz und 600 μm bei 950 Hz (Barth *et al.*, 1993). Die Forscher geben dabei zu bedenken, dass das Messvolumen, aus dem die Daten hervorgehen nicht kleiner sein konnte als $6 \times 0,6 \times 0,6 \text{ mm}^3$ und sich der Messpunkt daher 0,3 mm über der Cuticular befindet (Barth *et al.*, 1993).

Hierzu kommentieren die Autoren folgendermaßen: „*Although details of the velocity profile very close to the surface could not be determined we are confident about the boundary layer thickness measurements*“ (Barth *et al.*, 1993).

Die Geschwindigkeiten, die bei dieser Messreihe entstanden sind, sind im Vergleich zu den Messdaten dieser Arbeit sehr ungenau. Das LDA mittelt die Geschwindigkeiten über ein Messfenster von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$. Die einzelnen Interrogation Areas des DPIVs mitteln über lediglich $0,045 \times 0,045 \text{ mm}^2$ (Tabelle 2). Zudem berücksichtigt das DPIV die unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu verschiedenen Zeitpunkten, und die Strömungsrichtungen! Auch das kann das LDA nicht leisten. Das heißt, die Ungenauigkeiten für die Geschwindigkeitsprofilmessung bei einem PIV kommen durch die Mittelung über zu große Zeitabstände. Die Grenzen unseres PIVs wurden hier in dieser Arbeit ebenfalls aufgezeigt (siehe 4.3.). Das LDA mittelt sowohl über die gesamte Messfläche als auch über alle Zeitpunkte. Das heißt, dass die gemessenen Daten von Barth *et al.* signifikant langsamer sind als bei identischer Messung mit einem PIV. Hinzu kommt, dass hier die 99%-Regelung zur Berechnung der Grenzschichtdicke benutzt wurde. Es sei darauf hingewiesen, dass Schlichting (2006) ausdrücklich vor der Problematik von zu ungenauen Messdaten, wie sie hier vorliegen, und der Abhängigkeit der Querkoordinate y^* warnt. Im Folgenden sei dieser Sachverhalt kurz erklärt.

Barth *et al.* 1993 berechnet die Dicke der Grenzschicht auf einer ebenen Platte für eine oszillierende Strömung. Allgemein gilt: Je größer die Viskosität des Fluids, desto größer die auftretende Grenzschicht. Die Grenzschicht wird ebenfalls größer, wenn die Frequenz erniedrigt wird. Die hierbei verwendete Formeln zur Berechnung der Grenzschichtdicke beruht auf der 99% Annahme. Diese legt fest, dass die Grenzschicht dann aufhört, wenn das wandnahe Fluid 99% der Strömungsfeldgeschwindigkeit erreicht hat (Prandtl & Tietjens, 1934). Bei der Auswahl der Methodik zitieren Barth *et al.* die grundlegende Veröffentlichung von Prandtl und Tietjens.

Prandtl & Tietjens (1934) listen insgesamt vier verschiedenen Möglichkeiten die Grenzschichtdicke zu bestimmen auf: 1) Grenzschichtdicke durch 99% Regelung; 2) Verdrängungsdicke; 3) Impulsverlustdicke; 4) Energieverlustdicke. Dabei werden weder die Vor-, oder Nachteile der einzelnen Methoden aufgezeigt, noch beschrieben welche Berechnungsmethode für welche Strömung sinnvoll ist. Dies lässt den Leser annehmen, dass alle vier Möglichkeiten gleichermaßen angesehen und ihre Berechtigung haben. Es ist daher leicht verständlich, warum Barth und Humphrey sich für die 99% Regelung entschieden haben. Bei allen anderen Methoden, muss nämlich weitaus mehr gerechnet werden. Schlichting zählt ebenfalls die vier Möglichkeiten auf, kommentiert allerdings, dass die Grenzschichtdicke, berechnet durch die 99% Regelung (δ_{99}) nicht eindeutig bestimmt werden kann, da die Reibungswirkung in der Grenzschicht asymptotisch nach außen hin abnimmt. Das heißt, der Übergang in die Außenströmung erfolgt fließend, ohne klare Grenze. Eine Voraussetzung ist daher eine sehr hohe Messgenauigkeit. Genau die ist aber mit einem Messfenster von $0,6 \times 0,6 \text{ mm}^2$ und einem Wandabstand von $0,3 \text{ mm}$ (Barth *et al.*, 1993) nicht gegeben. Prinzipielle Schwierigkeiten treten bei der Anwendung des 99% Kriteriums auch dann auf, wenn die Außenströmung (an einer festen Stelle x^* entlang der Wand) noch eine Abhängigkeit von der Querkoordinate y^* aufweist. Dies ist immer dann der Fall, wenn keine sog. Plattenströmung vorliegt. Die Plattenströmung ($U^* = u_\infty^*$ im gesamten Außenbereich des Strömungsfeldes) stellt somit eine Sondersituation dar, an der allerdings häufig die Grenzschichtdicken-Definition erläutert werden (Schlichting, 2006).

Die unmittelbar darauf folgende Methoden der Verdrängungsdicke wird mit dem Satz eröffnet: „Ein physikalisch sinnvolles Maß für die Dicke der Grenzschicht ist die Verdrängungsdicke. [...]. Die Verdrängungsdicke ist etwa ein Drittel der [...] angegebenen Grenzschichtdicke δ_{99} “.

Durch die Ausführungen von Schlichting wird ganz klar deutlich, dass die Anwendung der 99% Regelung für die Berechnung der Grenzschichtdicke einer oszillierenden Grenzschicht ein fundamentaler Fehler ist. Denn die Messgenauigkeit ist nicht gegeben und bei einer oszillierende Strömung ist immer eine Abhängigkeit von der Querkoordinate y^* vorhanden. Denn ohne diese Reibungseffekte würde die Phasenverschiebung nicht stattfinden und somit würden weder der Annulareffekt noch zwei entgegengesetzte Strömungsrichtungen (Abb.: 14) entstehen können!

Wie oben bereits erwähnt ergeben sich im Vergleich Größendiskrepanzen von ca. einem Drittel! Berücksichtigt man diese Differenz hat Barth *et al.* Grenzschichtmessungen am obersten Ende der Grenzschicht durchgeführt. Hier ein Beispiel aus den von Barth *et al.* (1993) veröffentlichten Daten: Bei 10 Hz bzw. 950 Hz wurde eine Grenzschichthöhe anhand der 99% Annahme von 2600 μm bzw. 600 μm mit dem LDA ermittelt. Reduziert man diese durch ein Drittel ergeben sich 1733 μm bei 10 Hz und 400 μm bei 950Hz. Gemessen wurde ab einer Höhe von 300 μm mit einem Messfenster von 600x600 μm ! Das heißt, dass nicht nur am obersten Bereich der Grenzschicht gemessen wurde, sondern zusätzlich mit Daten aus dem Strömungsfeld gemittelt wurde. Was eine massive Verfälschung der Daten bedeutet.

Da Barth *et al.* in ihren sämtlichen Veröffentlichungen diese Methode zur Berechnung der Grenzschichtdicke gewählt haben, sind sämtliche Aussagen in diesem Zusammenhang nicht valide und müssen neu überprüft werden. Das beinhaltet ebenfalls die Aussage, dass die Länge der Trichobothrien auf die Grenzschichthöhe abgestimmt ist (Barth *et al.*, 1993).

Das ist insofern fatal, da sehr viele nachfolgende Studien das Model von Barth und Humphrey als Grundlage für ihre Studien verwenden und somit fast alle Veröffentlichung in diesem Bereich mit einer Grenzschichtgröße rechnen, die so nicht existiert. Beispiele hierfür sind Veröffentlichungen von Bathellier (2005), Gregory (2010), McConney (2008), Steinmann (2006) u.v.m..

5.3 Das natürliche Signal: Wie würde die Grenzschicht bei einem Fliegensignal aussehen?

Für die Beantwortung dieser Frage möchte ich die Promotion von Christian Klopsch am Neurobiologischen Department der Universität Wien hervorheben. In seiner Arbeit unterteilt Klopsch das natürliche Fliegensignal in 3 Phasen:

Phase I: Anfangsphase. Das Signal einer fliegenden Schmeißfliege (*Calliphora erythrocephala*) besteht aus einem um die Fliege zirkulierenden Strömungsfeld. Schlägt das Tier im fixierten Zustand die Flügel, entspricht das einem stationären zufliegen. Hierbei verläuft die Strömung überwiegend horizontal und die Geschwindigkeitsvektoren zeigen in Flugrichtung. Wird der Reizgeber (Fliege/ Ventilator) bewegt, erhöhen sich die horizontalen Geschwindigkeiten exponentiell.

Zusätzlich wird der Strömungswinkel von 90° auf 45° gesenkt. Anhand dieser Phase soll laut Klopsch die Spinne das Beutetier detektieren, erkennen und lokalisieren können (Abb.: 21).

Phase II: Fluktuierende Phase. Sie tritt auf, sobald die Position des Beutetiers unmittelbar vor dem 1. Beinglied der Spinne ist. Die starke Fluktuation wird durch die nach hinten und nach vorne ausgerichtete Wirbelströmung, ausgehend von der Fliege, hervorgerufen. Es entstehen signifikant höhere Frequenzen als in Phase I. Diese Phase triggert das Sprungverhalten der Spinne um das Beutetier zu fangen (Abb.: 21).

Phase III: Abklingende Phase. Ungefähr 3 cm nach dem 1. Beinglied der Spinne fängt das Signal an abzuklingen. Dieser Phase wird keine Bedeutung gegeben. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass die auftretenden Geschwindigkeiten von der Spinne wahrgenommen werden können.

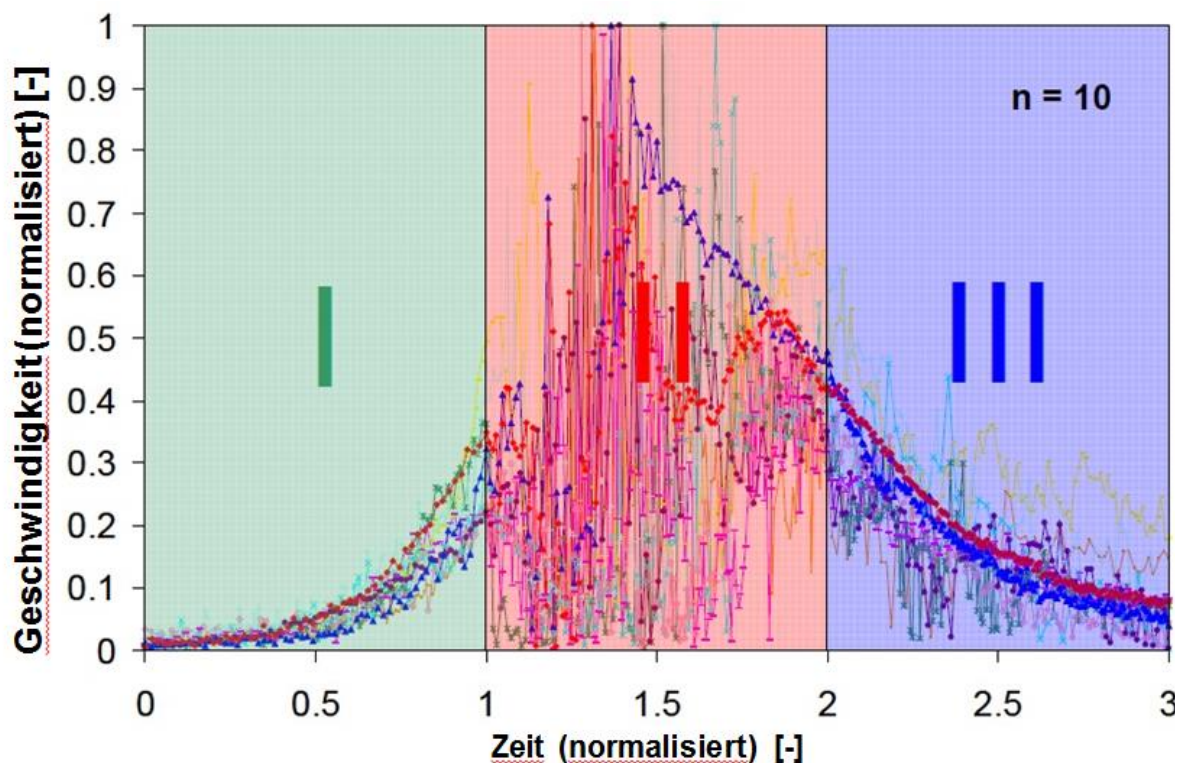


Abbildung 21: Zu sehen sind die normalisierten Geschwindigkeiten, die bei dem Signal einer frei fliegenden Fliege an Stelle des Trichobothriums Trichobothrium auftreten. Die Zeiten der verschiedenen Phasen sind ebenfalls normalisiert (Klopsch, 2010 modifiziert).

In dieser Arbeit, konnte bereits gezeigt werden, dass innerhalb einer oszillierenden Grenzschicht die Geschwindigkeiten und somit die Grenzschichtdicke innerhalb eines Zyklus stark variieren (Abb.: 18). Dabei beziehen sich die Daten lediglich auf eine einzige Frequenz und eine einzige Anströmrichtung. Bei einem natürlichen Signal treten nicht nur viele verschiedene Frequenzen gleichzeitig auf, sondern die Signalquelle an sich ändert die Geschwindigkeit, die Flugrichtung und den Flugwinkel. Das heißt hier sind sehr viele unregelmäßige Faktoren, die miteinander in Wechselwirkung stehen und die die Bildung einer Grenzschicht maßgeblich beeinträchtigen (Schlichting, 2006; Steinmann *et al.*, 2006). Dabei ist jedes Signal jedes Mal aufs Neue individuell, das heißt alle Variablen werden nie 2 Mal dieselbe Abfolge bzw. Konstellation aufweisen. Keine Fliege ist identisch, das Signal ändert sich aufgrund ihrer Größe, Körperform und Flügelausbildung von Fliege zu Fliege. Und, keine Fliege fliegt zweimal eine identische Flugbahn. Demnach entsteht nie ein und derselbe Reiz. Die Signale sind also immer grundlegend verschiedenen und führen zu unterschiedlichen Reibungsverhältnissen. Mit anderen Worten heißt das, dass es kein festes oder gar charakteristisches Signal gibt unter dem sich eine charakteristische Grenzschicht ausbilden kann. Die Phasen von Klopsch beschreiben lediglich einen Turbulenzzustand, nie aber eine charakteristische, sich immer wieder wiederholende Strömung! Feste Außenbedingungen sind aber Grundvoraussetzungen für die Ausbildung einer charakteristischen Grenzschicht (Schlichting, 2006)! Allgemein gilt: Charakteristische Grenzschichten bilden sich ausschließlich bei sogenannten Plattenströmungen aus. Diese bilden eine Sondersituation in der Strömungsmechanik und sind so bei einem natürlichen Reiz nicht anzutreffen (Schlichting, 2006)!

Die Vorgehensweise von Barth *et al.* und Humphrey *et al.* ein stark vereinfachtes Modell zu entwickeln ist vollkommen valide. Denn nur so können verschiedene Parameter getrennt voneinander getestet und beurteilt werden. Der Fehler der hier allerdings aufgetreten ist, ist dass Barth und Humphrey *et al.* nicht mehr den Schritt von ihrem theoretischen Gebilde zurück zum natürlichen Signal gefunden haben. Dass dieses Model maßgeblich von einem natürlichen Reiz bzw. einer natürlichen Situation abweicht scheint von den Autoren nicht mehr gesehen zu werden. Hinzu kommt die fehlende Kompetenz in Bezug auf die Strömungsmechanik. Es ist sehr auffällig, dass Barth in vielen seiner Veröffentlichungen zwar meist von einer

oszillierenden Grenzschicht spricht, aber immer eine stationäre beschreibt bzw. abbildet (Barth, 1993, 2001)!

Humphrey hingegen benutzt zwar die richtigen Formeln für eine oszillierende Grenzschicht, vernachlässigt aber bei seinen Interpretationen die zeitliche Abhängigkeit. Unter Strömungsmechanikern ist es üblich nur mit den Werten der Einhüllenden zu arbeiten, da diese die Maximalkräfte widerspiegelt (Schlichting, 2006). Denn die Maximalkräfte sind nun mal die Kräfte, die z.B. für eine Belastungsrechnung interessant sind. Bei der Frage wie sich ein Trichobothrium innerhalb einer oszillierenden Grenzschicht verhält, kann der zeitliche Aspekt nicht vernachlässigt werden. Wechselnde Strömungsgeschwindigkeiten und Größen der Grenzschicht wirken zu jedem Zeitpunkt auf das Trichobothrium ein und beeinflussen es. Zu der Frage, warum Humphrey den zeitlichen Aspekt vernachlässigt, stelle ich folgende Vermutung auf: JAC Humphrey ist zwar Professor am Department of Mechanical Engineering der University of California at Berkeley, ist aber selbst kein Strömungsmechaniker, sondern Chemiker! In einem privaten Gespräch erklärte er mir, dass er sich damals als er das Modell aufstellte, komplett neu in die Materie eingelezen hätte.

Für jene, die an der Grenzschichttheorie von Humphrey und Barth trotz meiner bisherigen Erläuterungen weiter festhalten wollen, möchte ich einen weiteren Gedankengang ausführen. Angenommen es gibt die Grenzschicht auf dem Spinnenbein. Die erste zu behandelnde Frage ist: Welche Informationen beinhaltet die Grenzschicht für die Spinne, damit sie es Wert ist wahrgenommen zu werden? Leider bietet die Literatur auf diese Frage keinerlei Antwort. In keinen von mir gelesenen Veröffentlichungen wird auf den Nutzen, den die Wahrnehmung einer Grenzschicht mit sich bringen soll, eingegangen.

Für die Spinne relevante Informationen sind z.B. Flugrichtung, Geschwindigkeit, Flughöhe und Distanz. All diese Informationen stecken auch bzw. vor allem im Hauptströmungsfeld. Während bei einer oszillierenden Grenzschicht die Strömungsrichtung teilweise gegengleich verlaufen kann, verläuft das Strömungsfeld homogen. Während bei einer oszillierenden Grenzschicht die Geschwindigkeiten stark variieren und sogar über die angelegte Höchstgeschwindigkeit hinausgehen, ist das Strömungsfeld konstant. Worin liegt also der Nutzen, der den Aufwand rechtfertigt die Grenzschicht wahrzunehmen, wenn alle benötigten Informationen auch im Strömungsfeld an sich vorhanden sind?

Ich persönlich glaube daher daran, dass die Trichobothrien eher als Antennen dienen, die für die Aufnahmen der Luftströmung optimiert sind. Denn, nach meiner Theorie gibt es zwar keine charakteristische Grenzschicht, jedoch sehr viele überlappende Fluktuationen und Verwirbelungen, ausgelöst durch die Vielzahl an unterschiedlichen Parametern. Diese Schicht muss nach meinem Verständnis eher ruhig gehalten werden. Also nicht wahrgenommen werden! Es könnte sein, dass die Oberflächenbehaarung des Spinnenbeins eine solche Aufgabe übernimmt. Die Verteilung der Haare ist homogen und geschlossen, das heißt die Strömung könnte in gleichmäßigen Bahnen gelenkt werden. Ein weiterer Punkt, der eher dafür spricht, dass der Grenzschichtbereich nicht wahrgenommen werden soll, ist die Bauweise des Trichobothriums. Das Becherhaar hat eine konische Form und verdickt sich nach unten hin. Das ist ein Hinweis darauf, dass die Kraftaufnahme vor allem am oberen Ende des Sensors erfolgt. Hier wird nur eine kleine Luftbewegung benötigt um das Haar mittels der Hebelkraft aus zu lenken (Barth, 1993). Am Schaft ist eine weitaus größere Kraft nötig. Bathelier beschreibt sogar, dass sich das Trichobothrium nur durch mechanischen Einfluss unmittelbar über dem Spinnenbein auslenken ließe und ein Luftstrom nicht mehr ausreichend sei (Bathelier, 2005). Daraus erschließt sich, dass die Haargrößen darauf ausgerichtet sind, verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten und somit Frequenzen aufzunehmen. So können auch die Messungen von Barth interpretiert werden (Barth, 1993). Nicht die Grenzschichtgröße ist ausschlaggebend für die Auslenkung des Haares, sondern die ausgeübte Kraft durch die Luftströmung an sich und damit die angelegte Frequenz. Das würde heißen, dass die Trichobothriengruppen einen Bereich hoher Sensitivität darstellen, da die einzelnen Sensoren auf verschiedene Frequenzen ausgelegt sind. So wie es Barth *et al.* (1993) auch beschreibt, nur eben nicht aufgrund der Grenzschichtdicke sondern aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit der angelegten Frequenz.

Aus meiner Sicht, besteht kein Zusammenhang zwischen Grenzschichthöhe und Trichobothrienlänge. Ich zweifle ebenfalls die Existenz einer instationären Grenzschicht an sich auf dem Spinnenbein an. Das theoretische Modell von Humphrey ist zu vereinfacht um wirklich valide Aussagen treffen zu können und die Messungen Barths sind zu ungenau. Hinzu kommt die fehlende Begründung aus der Literatur warum die Grenzschicht für die Spinne so wichtig sein muss. Stehen tut das Trichobothrium auch so auf dem Spinnenbein und alle wichtigen Informationen

(Geschwindigkeit, Richtung etc.) sind aus dem Strömungsfeld an sich auch auszulesen. Wozu dann Grenzschicht messen? Mein Eindruck ist, dass die Entdeckung der Grenzschicht für Biologen so faszinierend war, dass sie nicht nicht wichtig sein durfte! Zumindest im Fall *Cupiennius salei* Keyserling, Arachnida Ctenidae.

Abschließend bleibt zu sagen, dass alle 4 Punkte der ursprünglichen Zielsetzung erfolgreich abgehandelt werden konnten. Wenn auch ganz anders als erwartet! Die genaue Jagdposition von *Cupiennius* konnte anhand von Fotoanalysen bestimmt werden. Eine Präparationstechnik für Messungen am Spinnenbein sowie ein funktionsfähiger Versuchsaufbau wurden entwickelt. Die Grenzschicht wurde erfolgreich charakterisiert. Anhand aller gesammelten Daten bin ich von der gängigen Theorie, die Trichobothrienlänge ist auf die Größe der Grenzschicht abgestimmt, abgekommen. Der finale Punkt, die Messungen am Spinnenbein, sind zwar ausgeblieben, allerdings ergibt sich die Notwendigkeit dieser Messungen aus der obigen theoretischen Abhandlung.

Zusammengefasst sind alle Zielsetzungen erfüllt worden. Forschung besteht aus dem Aufstellen von neuen und dem Verwerfen von überholten Theorien. Es liegt nun in der Hand der zukünftigen Generation, die hier ausgeführten Sachverhalte aufzugreifen oder an den alten festzuhalten. Egal für welchen Weg ihr euch entscheidet, ihr solltet ihn verifizieren können.

6 Literaturverzeichnis

- Barth FG** **Wastl U, Humphrey JAC, Devarakonda R** (1993). Dynamics of arthropod filiform hairs. II Mechanical properties of spider trichobothria (*Cupiennius salei* Keys.). Phil. Trans. R. Soc. London B **340**: 445-461
- Barth FG** (2001). Sinne und Verhalten aus dem Leben einer Spinne. Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- Bathellier B,** **Barth F** (2005). Viscosity-mediated motion coupling between pairs of trichobothria on the leg of the spider *Cupiennius salei*. **191**: 733-746
- Cisneros L,** **Kessler J** (2008). Unexpected Bipolar Flagellar Arrangements and Long-Range Flows Driven by Bacteria near Solid Baoundaries. **101**: 168102
- Gregory C,** **Hallam J** (2010). A computational fluid dynamics model of viscous coupling of hairs. J. Comp. Physiol. A. **196**: 385-395
- Harris J** **Peev G, Wilkinson WL** (1969). Velocity profiles in laminar oscillating flow tubes. J. of Physics E **2-2**: 913-916
- Hergenröder R** **Barth FG** (1983b). Vibratory signals and spider behavior: how do the sensory input from the eight legs interact in orientation? J Comp Physiol A **152**: 361-371
- Humphrey JAC** **Devarakonda R** (1993). Dynamics of arthropod filiform hairs. I. Mathematical modelling of the hair and air motions. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B **340**: 423-444
- Karner** (1999). Volumenverschiebung beim Sprung der Jagdspinne *Cupinnius salei* (Keyserling). Dissertation, Fachbereich Biologie der Johann Wolfgang von Goethe-Universität in Frankfurt am Main, unveröffentlicht
- Klopsch C** (2010). The flowfield around a flying blowfly: Characteristics and guidance of spider prey capture behavior. Dissertaion, Fachbereich Neurobiologie der Universität Wien, unpubliziert
- McConney M,** **Schaber C** (2008). Surface force spectroscopic point load measurements and viscoelastic modelling of micromechanical properties of air flow sensitive hairs of a spider (*Cupiennius salei*). J. R. Soc. Interface. **In press**
- Oertel H jr** **Böhle M, Dohrmann U** (2006). Strömungsmechanik. 4. Auflage. Vieweg, Germany
- Prandtl L,** **Tietjens H** (1934). Applied hydro- & aeromechanics. New York: Dover Publ. Inc.
- Raffel M,** **Willert E** (1998). Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

- Richardson EG,** **Tyler E** (1929). The Transverse velocity gradient near the mouth of pipes in which an alternating or continuous flow of air is established. Proc. Phys. Soc. London **42-1**: 231
- Rott M** (1964). Theory of Laminar Flows. Section D. Volume IV: High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion. Princeton University Press, Princeton, New Jersey
- Schlichting H,** **Gersten K** (2006). Grenzschicht-Theorie. 10. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Sexl T** (1930). Über den von Richardson entdeckten „Annulareffekt“. Z. Phys. **61**: 349-362
- Steinmann T,** **Casas J, Krijnen G, Dangles O** (2006). Air-flow sensitive hairs: boundary layers in oscillatory flows around arthropod appendages. The J. of Exp. Bio. **209**: 4398-4408

Anhang

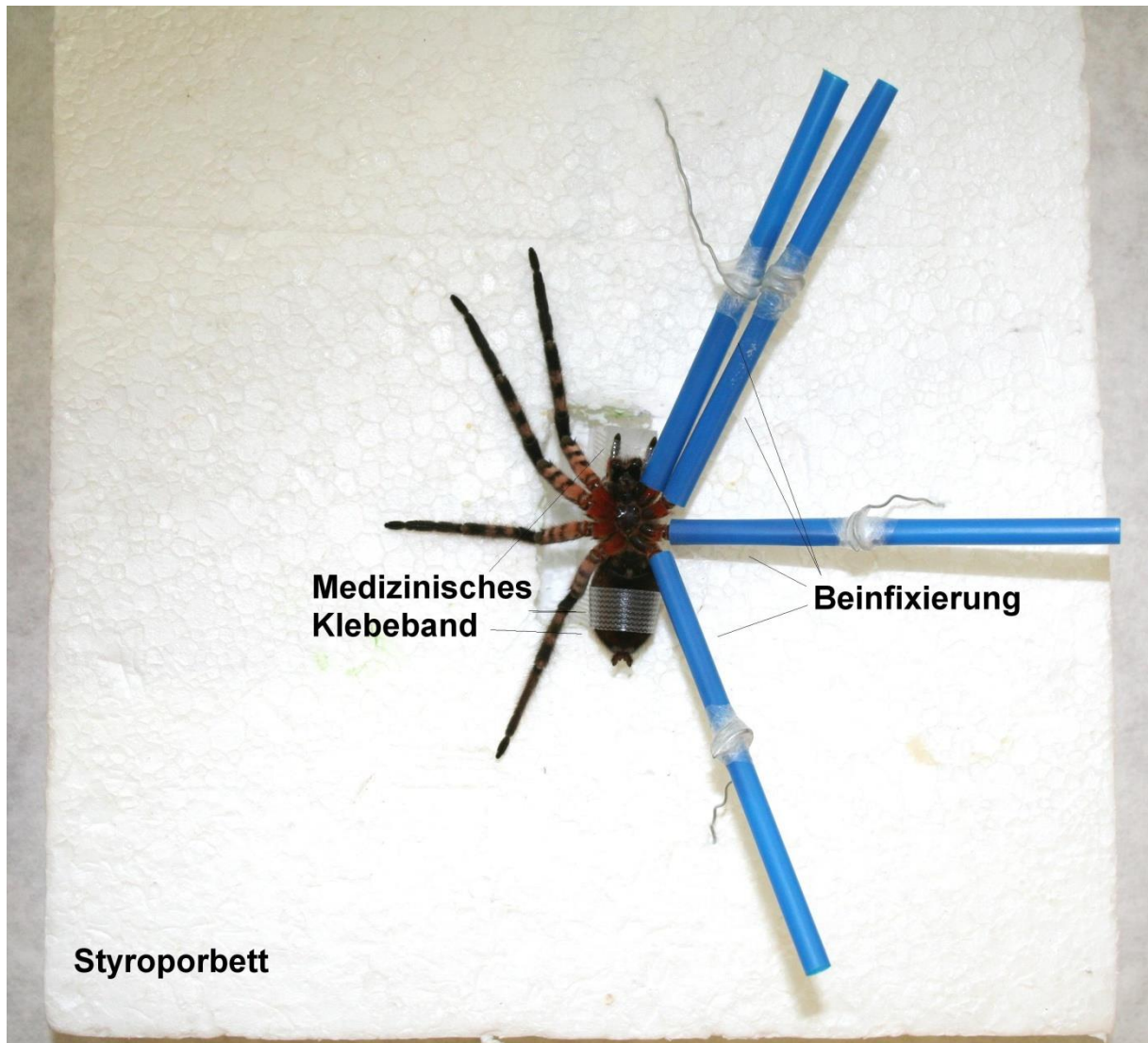


Abbildung A1: Überblick der Präparationsschritte von 1-4.



Abbildung A2: Nahaufnahme der Präparationsschritte von 1-4



Abbildung A3: Präparationsschritte 5 und 6. Die roten Pfeile markieren die Wachs-Kolophoniumportionen bei ventraler Ansicht.

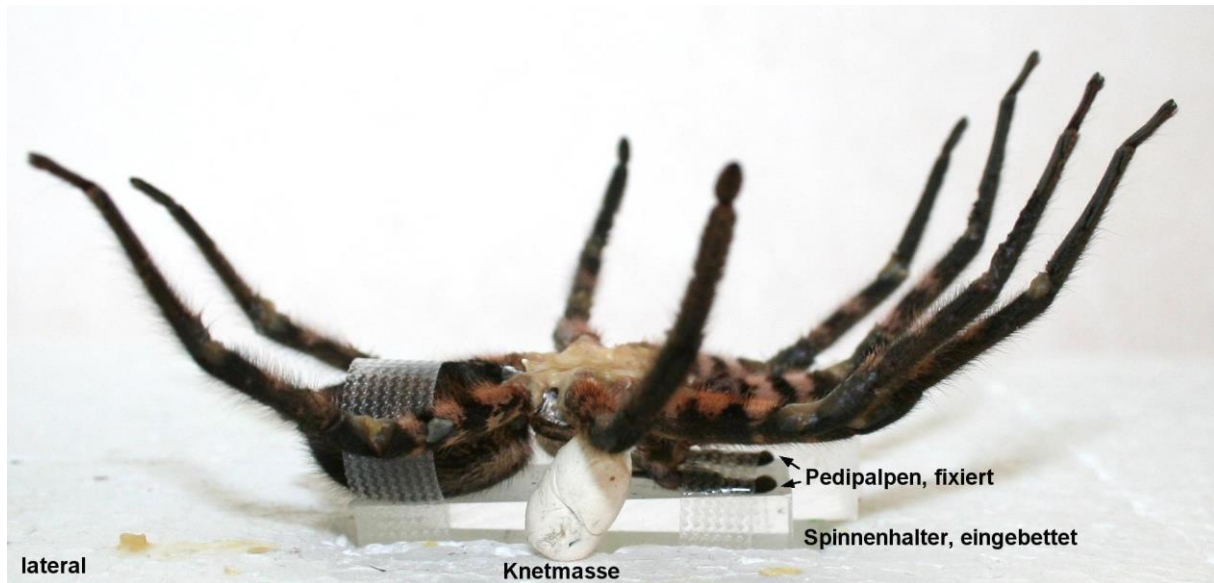


Abbildung A4: Präparationsschritte 5 und 6 von lateraler Ansicht.



Abbildung A5: Die Spinne ist vollständig präpariert. Dorsale Ansicht.



Abbildung A6: Die Spinne ist vollständig präpariert. Laterale Ansicht.

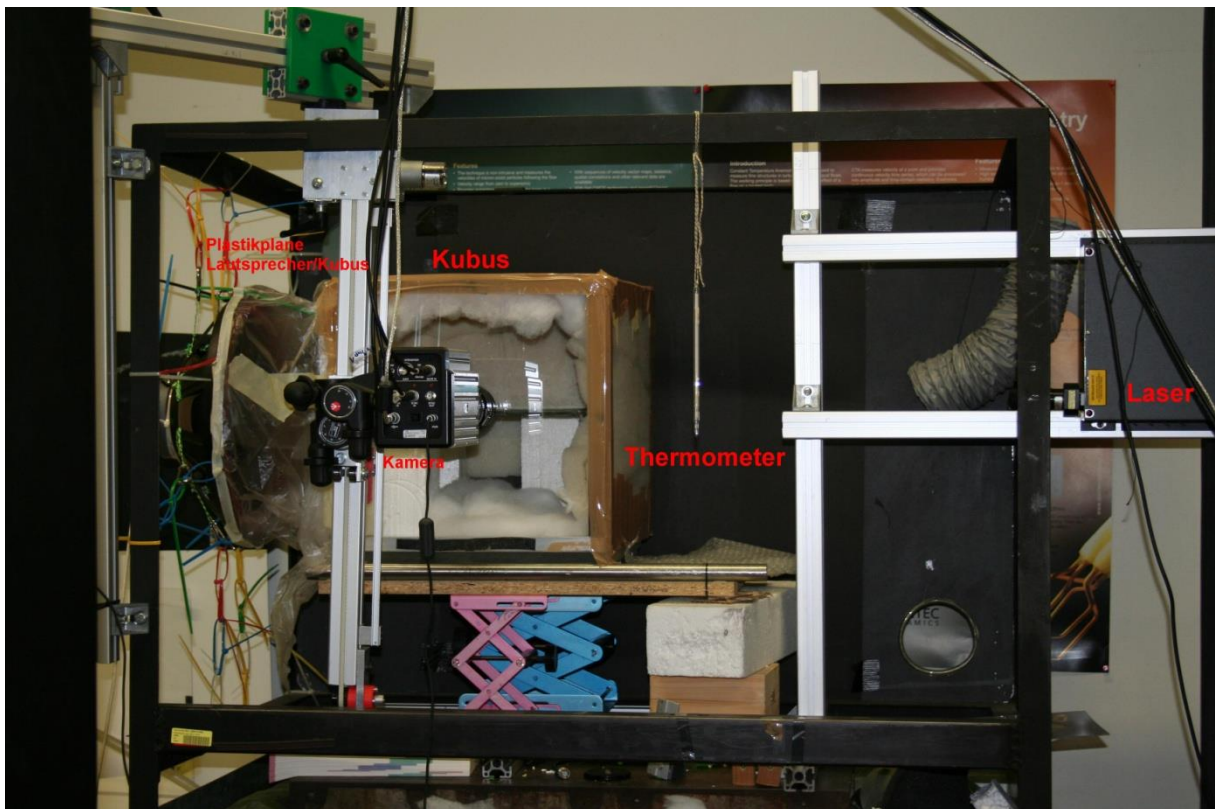


Abbildung A7: Übersicht des Versuchsaufbaus.

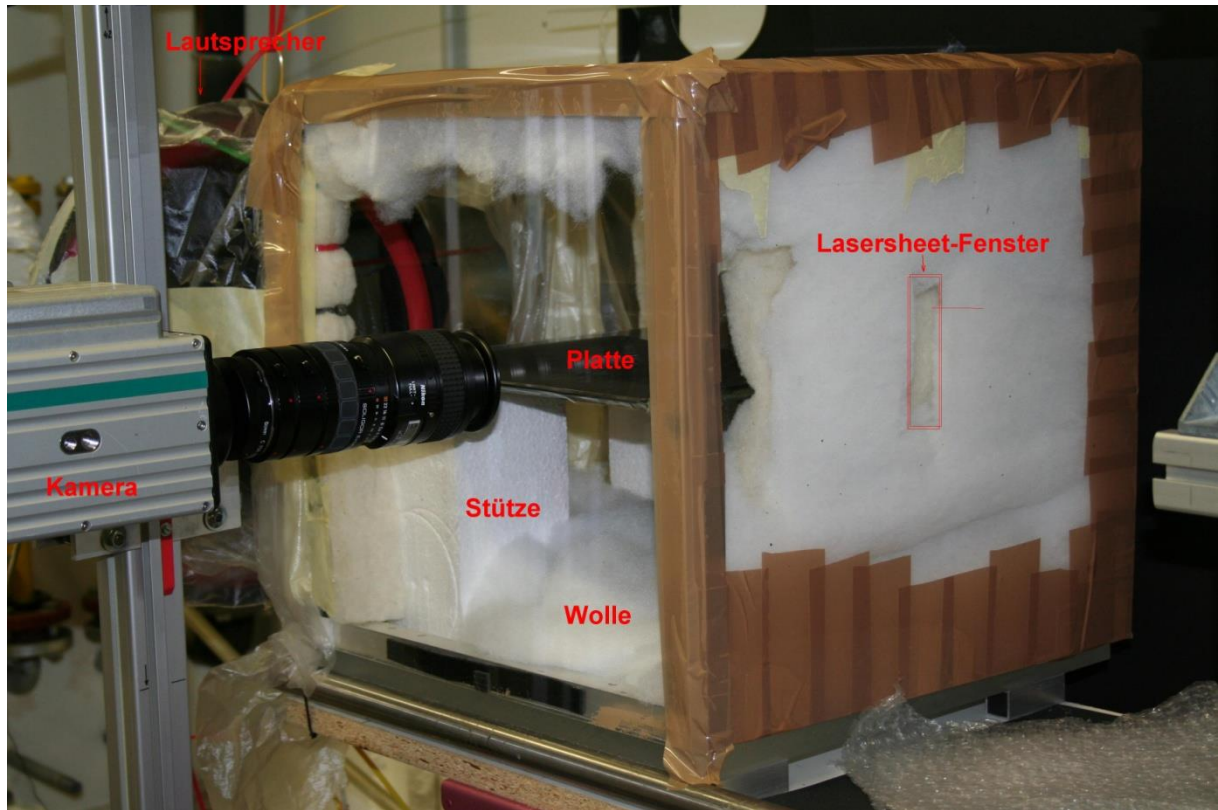


Abbildung A8: Detailaufnahme des Versuchsaufbaus ohne Laser.



Abbildung A9: Aufhängung des Lautsprechers.

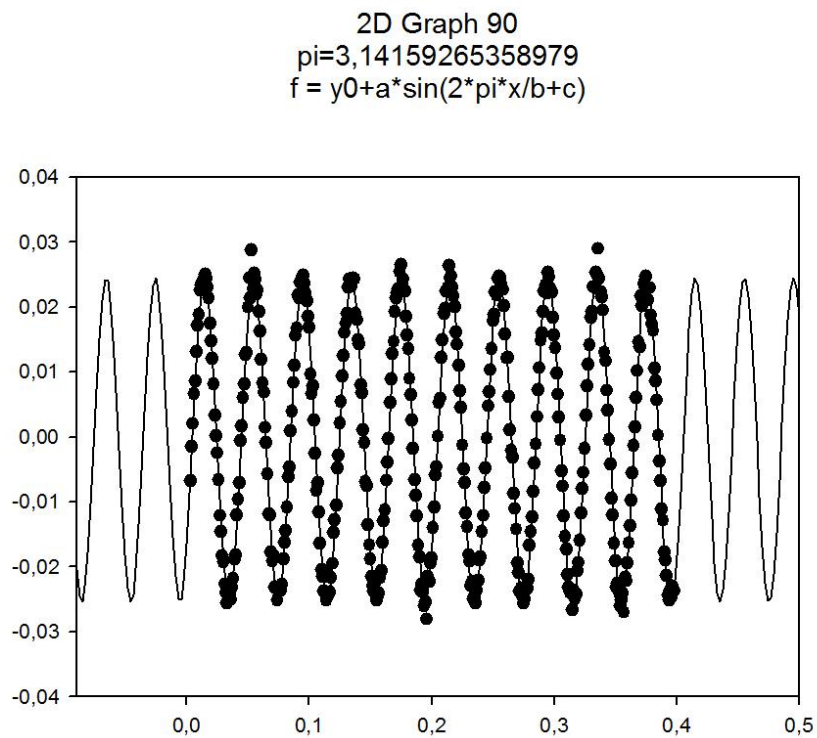


Abbildung A10: x-Achse: Zeit t [s], y-Achse: Geschwindigkeit U [m/s]. Geschwindigkeitsverlauf eines Vektors über 10 gemessene Perioden. SigmaPlot fittet einen Sinus (Formel siehe Überschrift) und erstellt einen Bericht (siehe CD).

Pappe 25Hz 1V

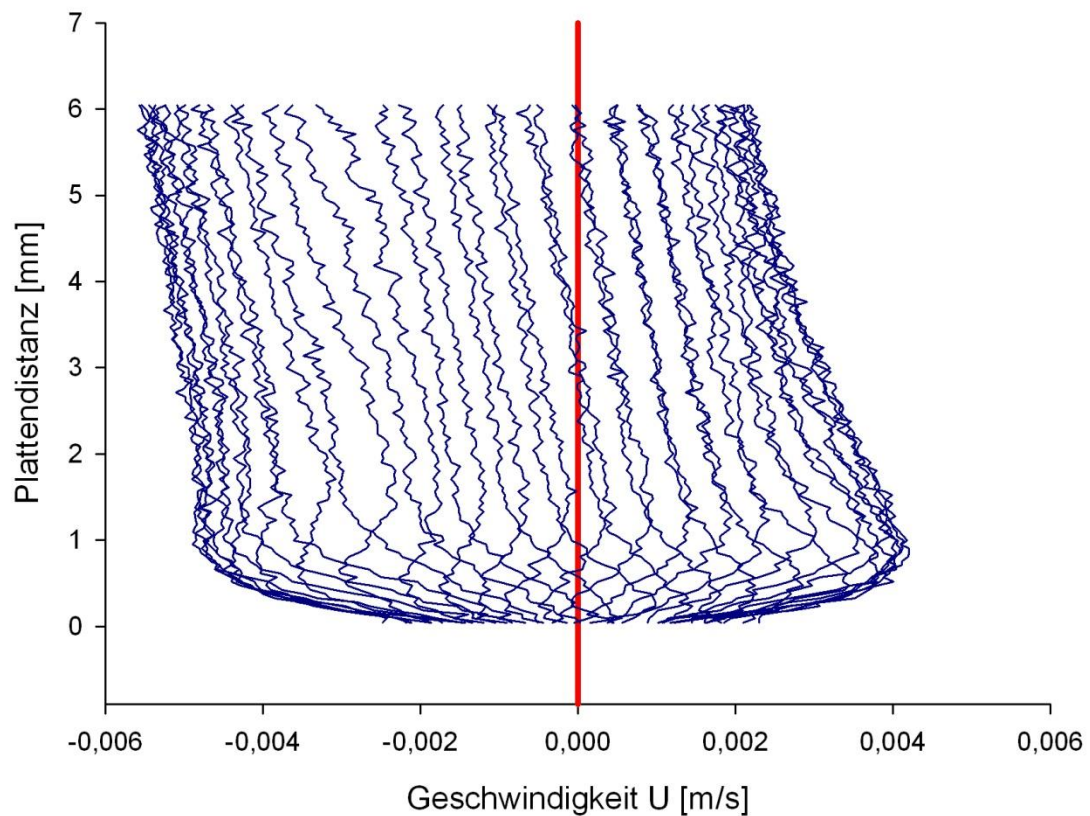


Abbildung A11: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 25Hz 1V.

Pappe 25Hz 2V

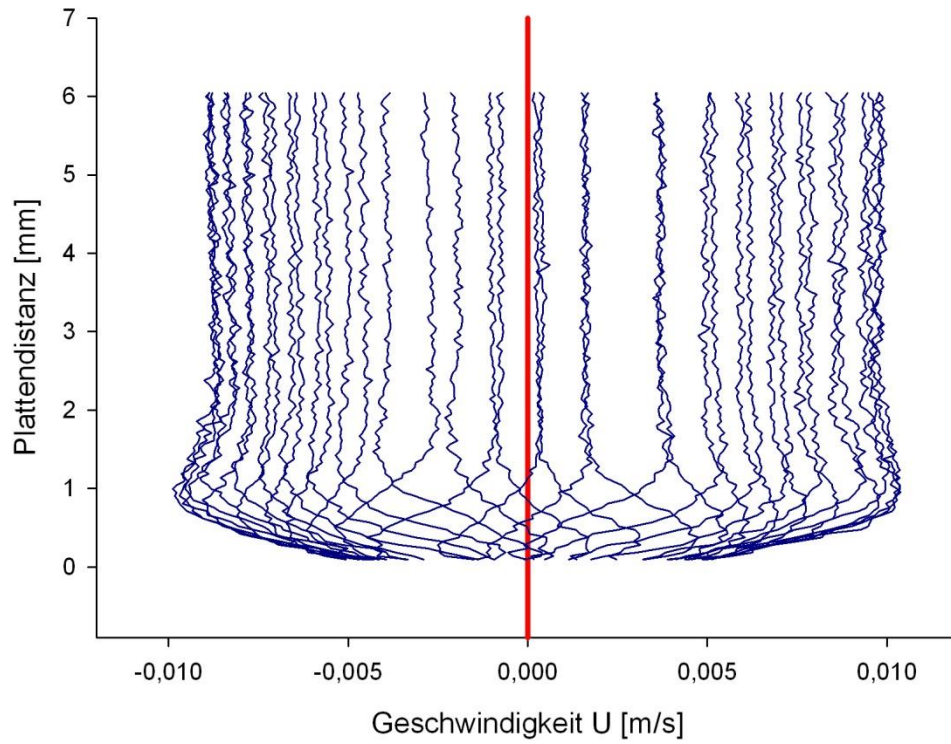


Abbildung A12: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 25Hz 2V.

Pappe 25Hz 3V

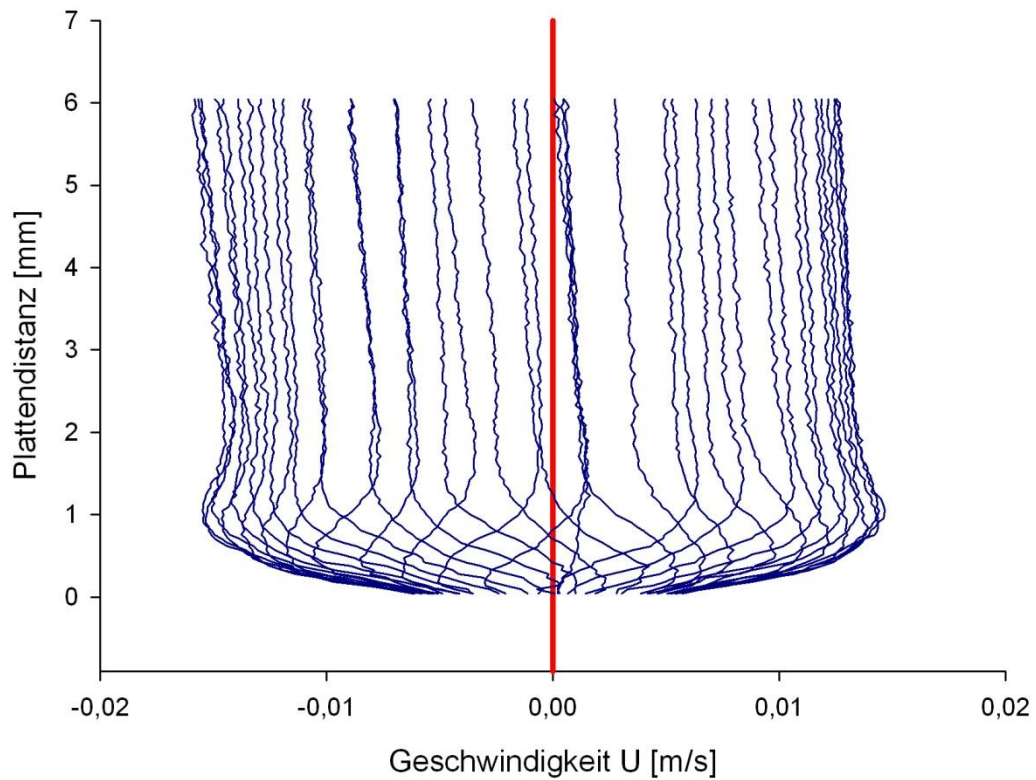


Abbildung A13: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 25Hz 3V.

Pappe 25Hz 5V

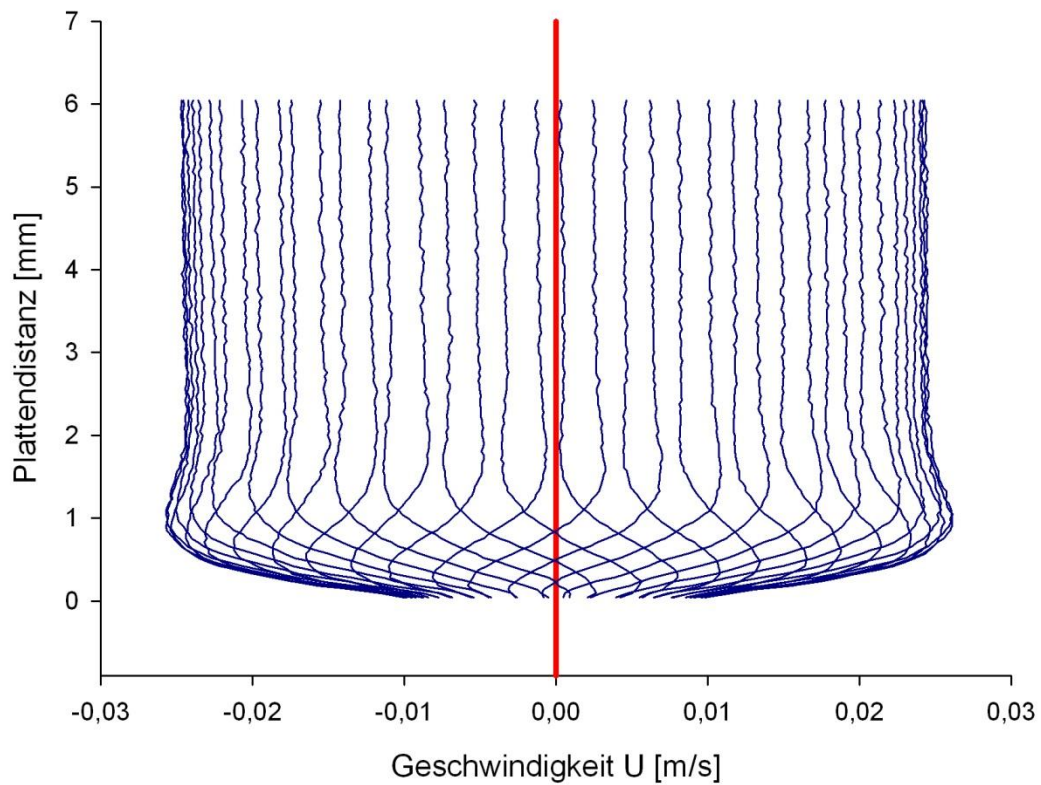


Abbildung A14: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 25Hz 5V.

Pappe 50Hz 1V

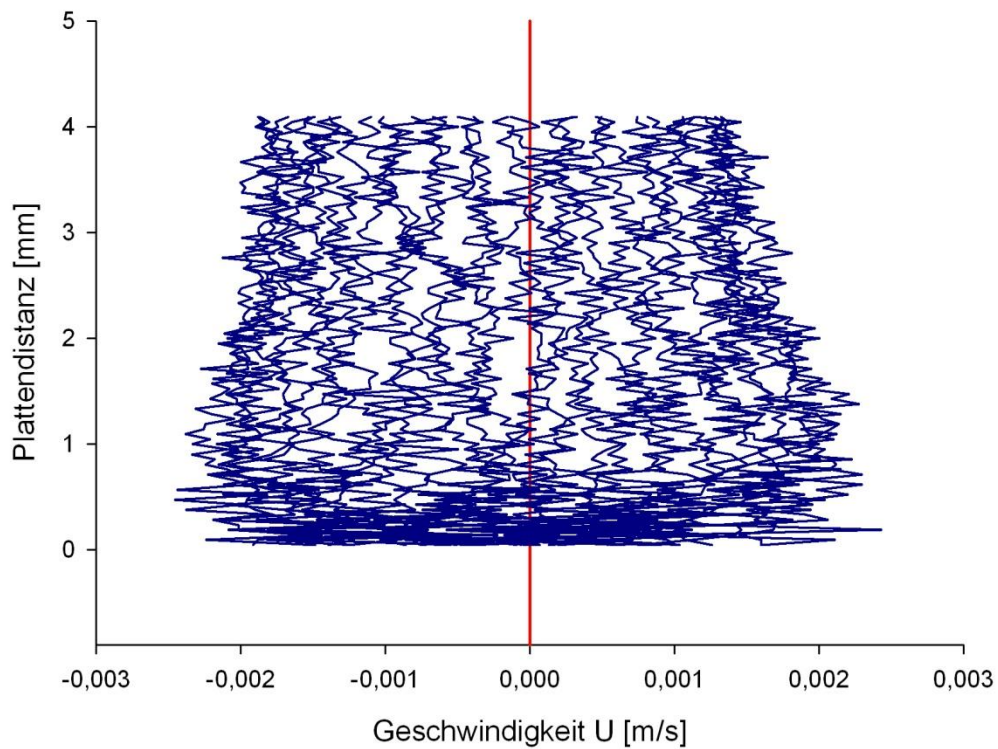


Abbildung A15: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 50Hz 1V.

Pappe 50Hz 2V

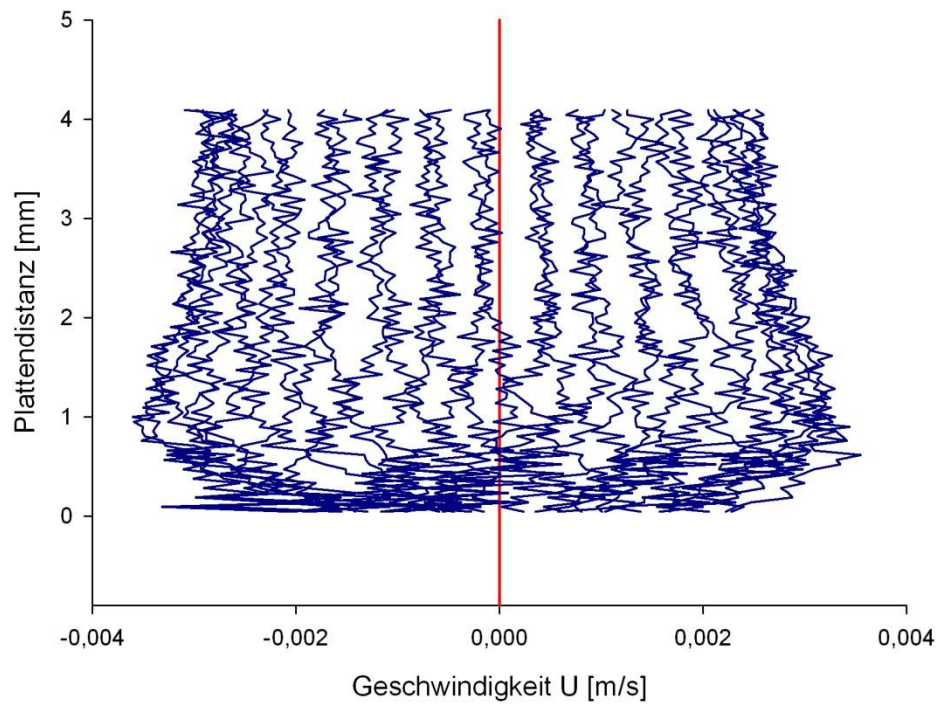


Abbildung A16: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 50Hz 2V.

Pappe 50Hz 3V

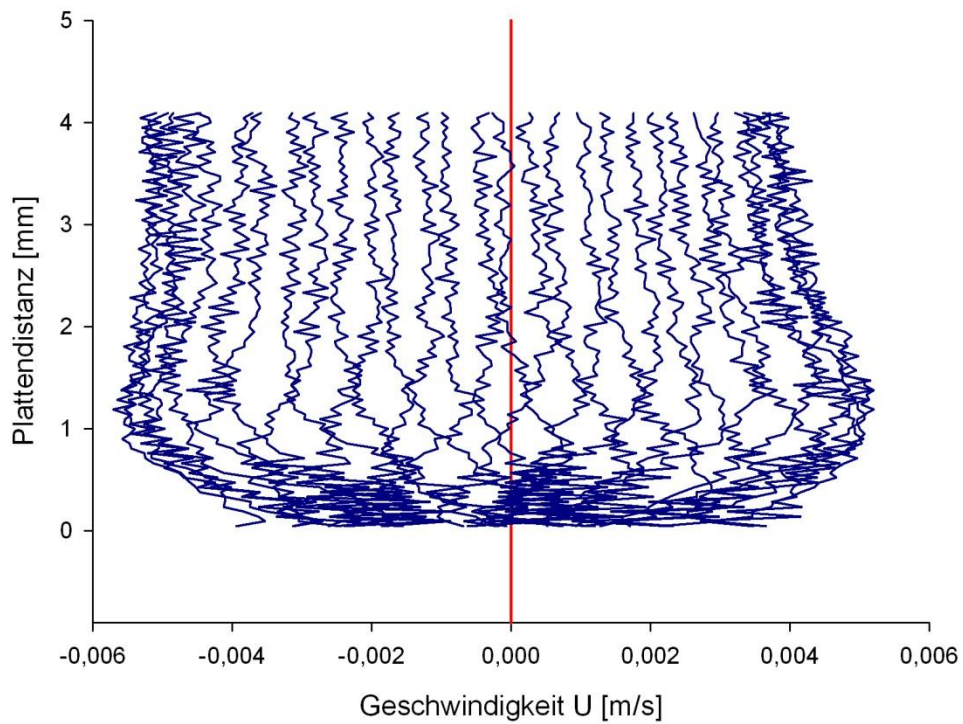


Abbildung A17: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 50Hz 3V.

Pappe 50Hz 4V

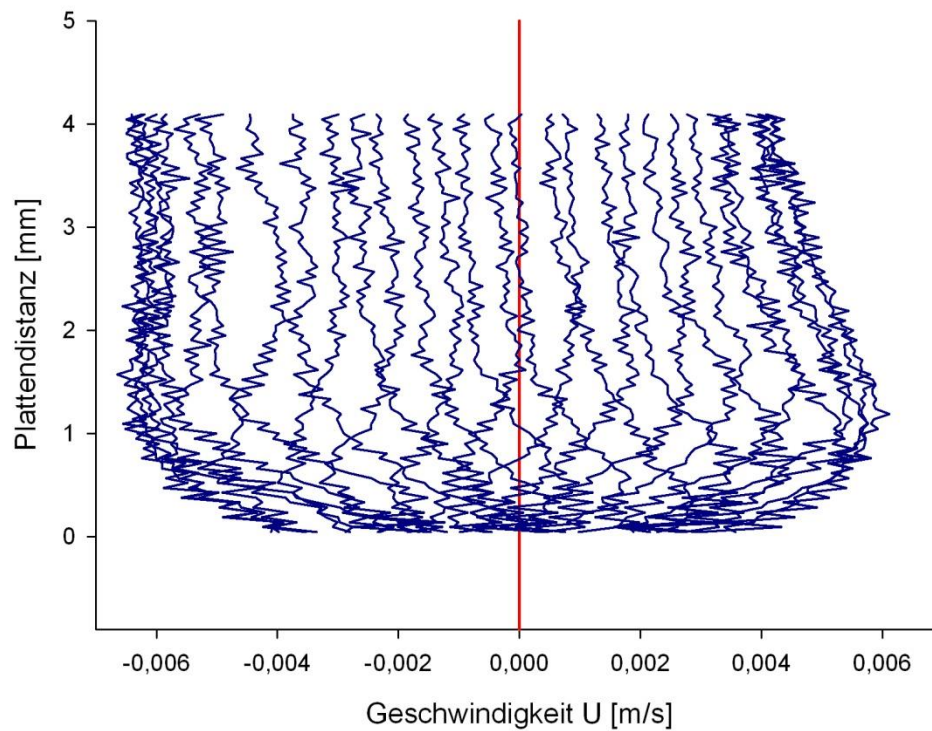


Abbildung A18: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 50Hz 4V.

Pappe 50Hz 5V

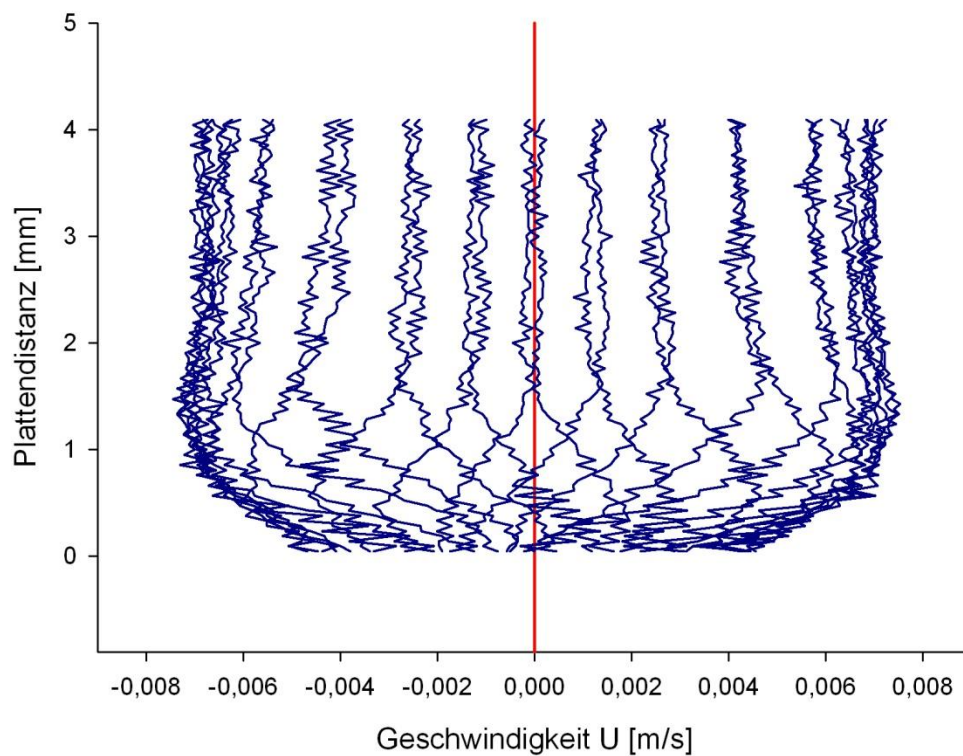


Abbildung A19: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 50Hz 5V.

Pappe 75Hz 2V

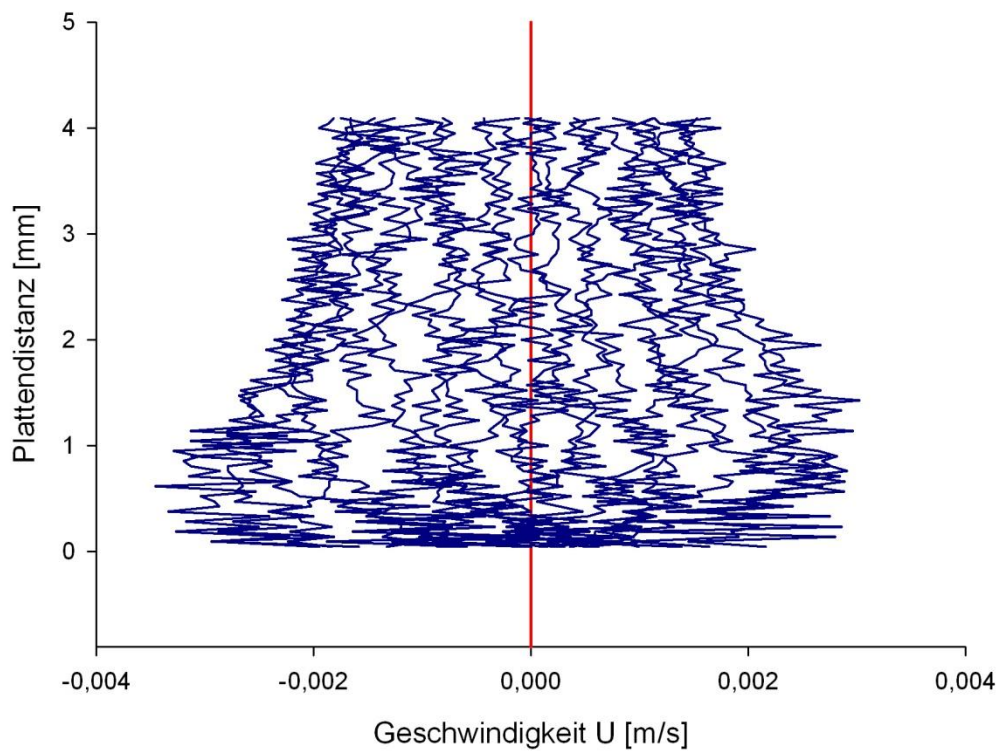


Abbildung A20: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 75Hz 2V.

Pappe 75Hz 3V

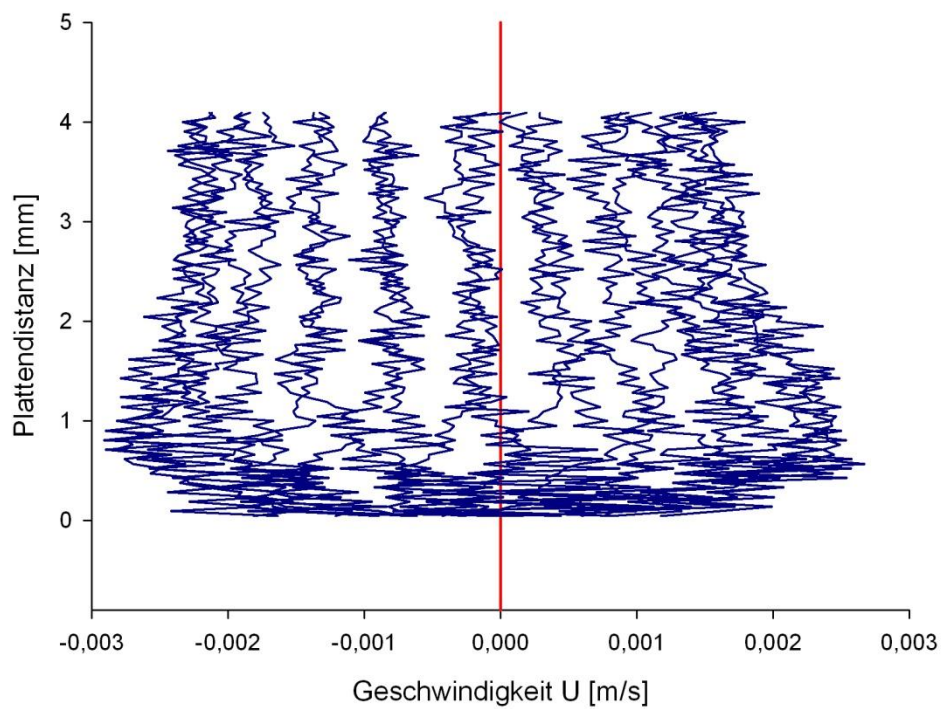


Abbildung A21: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 75Hz 3V.

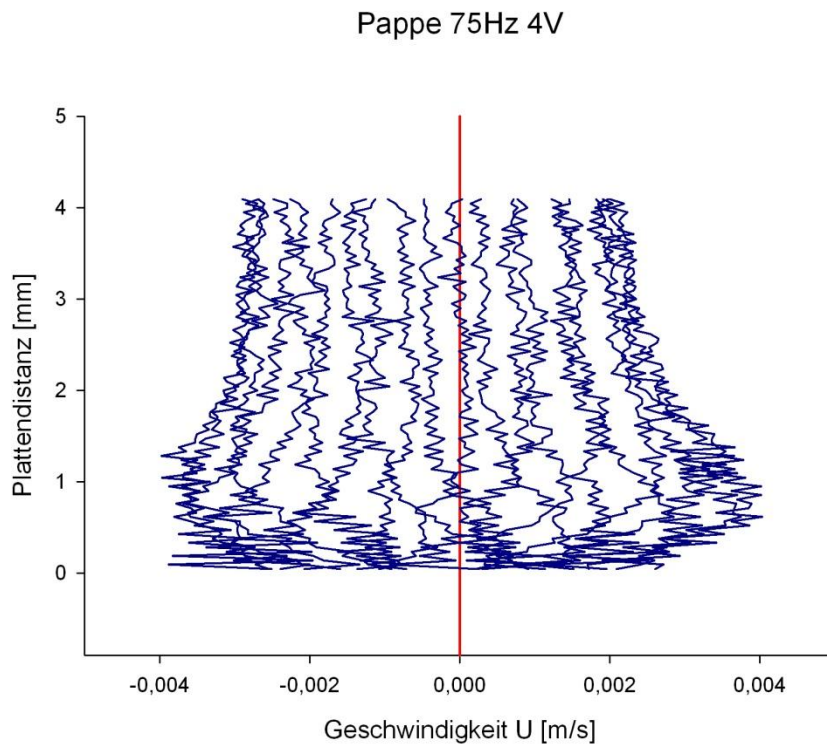


Abbildung A22: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 75Hz 4V.

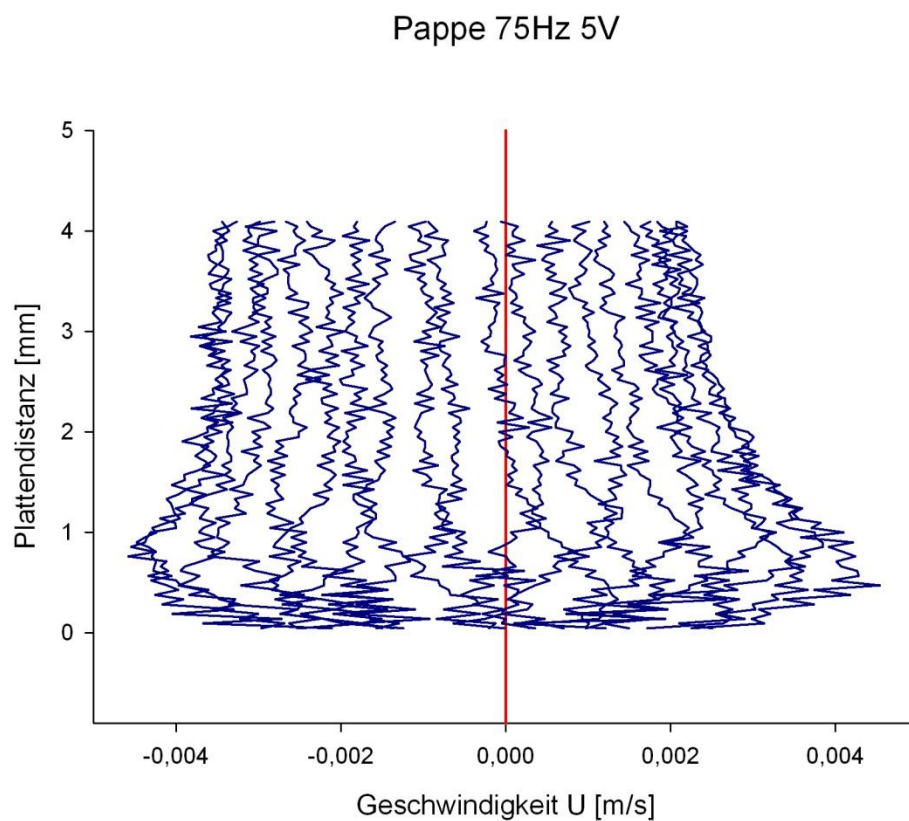
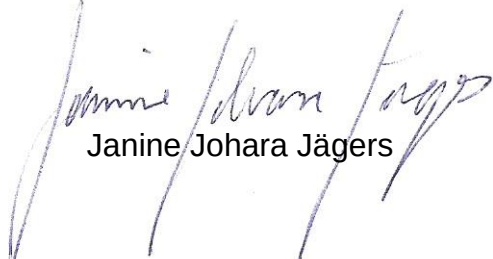


Abbildung A23: Übersicht aller Zeitpunkte der Messung 75Hz 5V.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich Eides Statt, dass ich die Masterarbeit selbständig angefertigt und keine Hilfsmittel, außer den in der Arbeit angegebenen, benutzt habe.

Wien den 08.04.2014



Janine Johara Jägers

Curriculum Vitae

Janine Johara Jägers, BSc.

21.08.1993, Heidelberg (Deutschland)

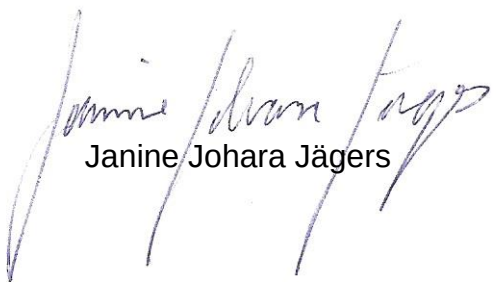
johara.jaegers@gmx.at

Akademische Ausbildung

03/2003	Abitur, Karolinengymnasium in Frankenthal/Pfalz
04-08/2003	Werksstudent Abbott GmbH & Co. KG, Ludwigshafen
09/2003-03/2007	Studium der Bionik (B.Sc.), Hochschule Bremen
03-05/2007	Werksstudent Abbott GmbH & Co. KG, Ludwigshafen
06-08/2007	Aufenthalt in Neuseeland
09/2007-05/2014	Studium der Verhaltens-, Neuro- und Kognitionsbiologie (M.Sc.), Universität Wien

Weltreise

06/2010-12/2011	Indonesien, Brunei Darussalam, Australien, Costa Rica, Canada
-----------------	---



Janine Johara Jägers