



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Verteilung paarungsbereiter Weibchen und wartender
Männchen des Kleinen Frostspanners (*Operophtera bru-
mata* L.) (Lepidoptera, Geometridae) an Baumstämmen in
einem submontanen Mischwald

Verfasser

Johannes Grill

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 439

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Diplomstudium Zoologie (Stzw)

Betreuer:

Ao. Univ.-Prof. i.R. Dr. Gerhard Spitzer

„Ein Naturwissenschaftler kann sich und seinen Beruf nicht schneller unglaubwürdig machen als vollmundig zu verkünden, die Naturwissenschaft kenne (oder kenne demnächst) die Antworten auf sämtliche Fragen, die es sich zu stellen lohne, und zu behaupten, Fragen, die keine naturwissenschaftliche Antwort zulassen, seien eigentlich Nicht-Fragen oder Pseudo-Fragen, die nur von Einfaltspinseln gestellt würden und für deren Beantwortung man naiv sein müsse.“

Sir Peter Medawar

Advice to a Young Scientist, 1979

„[...] und dann bin ich sehr erstaunt, dass mein Bild der realen Außenwelt sehr mangelhaft ist. Es liefert eine Menge faktischer Information, bringt all unsere Erfahrung in eine wundervoll systematische Ordnung, aber es hüllt sich in tödliches Schweigen über alles und jedes, was unserem Herzen wirklich nahesteht, was uns wirklich etwas bedeutet. Es sagt uns kein Wort über rot und blau, bitter und süß, körperlichen Schmerz oder körperliche Lust; es weiß nichts von schön und hässlich, gut oder schlecht, nichts von Gott und der Ewigkeit. Die Naturwissenschaft gibt gelegentlich vor, auf Fragen aus diesen Bereichen zu antworten, aber die Antworten sind oft so albern, dass wir sie nicht ernst nehmen mögen.“

Erwin Schrödinger

Die Natur und die Griechen, 1956

*Für meinen Vater,
ohne dessen Unterstützung
diese Arbeit nicht entstanden wäre*

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Zeichen	11
Zusammenfassung	13
Key words	13
1 Einleitung	15
1.1 Pheromonsysteme und -verteilung	16
1.1.1 Sexualpheromone bei Lepidopteren	16
1.1.2 Pheromonverteilung und ökologische Parameter	17
1.2 Vorhandene Literatur	17
1.3 Fragestellung	18
2 Anatomie und Ökologie des Kleinen Frostspanners	21
2.1 Systematik	21
2.2 Verbreitung, Vorkommen und Ernährung	21
2.3 Anatomie und Sexualdimorphismus	22
2.4 Lebenszyklus und Paarung	23
2.5 Populationsdynamik und Umwelteinflüsse	24
2.6 Schadwirkung und Bekämpfung	25
3 Fluidodynamik und Strömungsmechanik	27
3.1 Begriffe, Definitionen und Formeln	27
3.1.1 Dynamische Viskosität	27
3.1.2 Kinematische Viskosität	28
3.1.3 Reynolds-Zahl	28
3.1.4 Widerstandsbeiwert	28
3.1.5 Strouhal-Zahl	29
3.2 Strömungscharakteristik und -verlauf	30
3.2.1 Strömungsablösung	31
3.2.2 Grenzschichtdicke	33
3.2.3 Kritische Reynolds-Zahl	34
3.2.4 Rauigkeitseinfluss	35
3.2.5 Strömungsformen	37

4	Material und Methode	39
4.1	Erhebungsgebiet	39
4.2	Erhebungszeitraum und -methode	40
4.2.1	Baumart und Rindentypus	41
4.2.2	Windgeschwindigkeit und -richtung	41
4.2.3	Exposition und Höhenverteilung	42
4.2.4	Temperaturen	42
4.2.5	Zusätzliches Datenmaterial	43
4.3	Datenanalyse	43
4.3.1	Ableitungen und Berechnungen	43
4.3.2	Statistik	44
5	Ergebnisse	45
5.1	Analyse allgemeiner Parameter	45
5.1.1	Verteilung auf Baumarten	45
5.1.2	Verteilung auf Rindentypen im Bezug zum Stammdurchmesser	46
5.1.3	Expositionsverteilung an Baumstämmen	49
5.1.4	Höhenverteilung an Baumstämmen	52
5.1.5	Temperaturen	53
5.1.6	Antennen- und Abdomenstellung	53
5.2	Analyse der Strömungssituation	54
5.2.1	Verteilung im <i>Re</i> -Bereich	54
5.2.2	Anpassung an <i>Re</i> -Bereich	56
5.2.3	Wirkung der Rauigkeit auf Grenzschichtdicke und -ablösung	57
5.2.4	Einfluss der Grenzschichtdicke beim Besetzen von Baumstämmen	58
5.2.5	Expositionsverteilung im Strömungsfeld	61
5.2.6	Wirkung der Windgeschwindigkeit auf die Exposition	66
6	Diskussion	71
6.1	Allgemeine Parameter	71
6.1.1	Verteilung auf Baumarten und Rindentypen	71
6.1.2	Expositionsverteilung an Baumstämmen	72
6.1.3	Höhenverteilung an Baumstämmen	72
6.1.4	Temperaturen	73
6.2	Strömungssituation	73
6.2.1	<i>Re</i> -Bereich und Windsituation	73
6.2.2	Einfluss der Grenzschichtdicke beim Besetzen von Baumstämmen	75
6.2.3	Expositionsverteilung im Strömungsfeld	77
6.3	Beantwortung der Fragestellung	79
6.4	Mögliche Fehlerquellen und weiterführende Analysen	80

Danksagung	81
Literaturverzeichnis	83
Abbildungsverzeichnis	89
Tabellenverzeichnis	93
Anhang	97
A. Abbildungen und Tabellen	97
B. Abstract	98
C. Lebenslauf	99

Verwendete Zeichen

Fluiddynamische Größen

- η dynamische Viskosität
 ν kinematische Viskosität
 ρ Dichte der Luft
 \bar{c} mittlere thermische Geschwindigkeit der Moleküle
 \bar{t} mittlere freie Weglänge der Moleküle

Strömungsmechanische Größen

- δ Grenzschichtdicke
 δ_l Dicke der laminaren Grenzschicht
 δ_t Dicke der turbulenten Grenzschicht
 φ_A Ablöswinkel
 ω_Z Wirbeldichte
 A_B angeströmte Fläche
 c Strömungsgeschwindigkeit / Windgeschwindigkeit
 c_W Widerstandsbeiwert
 f Wirbelablösungsfrequenz
 h Höhe der Oberflächenstruktur
 k Oberflächenrauigkeitsparameter
 L Körperlänge / Durchmesser
 Re Reynolds-Zahl
 Re_{kr} kritische Reynolds-Zahl
 s Strömungsweglänge
 s_l Weglänge der laminaren Strömung
 s_t Weglänge der turbulenten Strömung
 Sr Strouhal-Zahl
 W Strömungswiderstand

ZUSAMMENFASSUNG

Wie bei allen Lepidopteren, ist beim Kleinen Frostspanner (*Operophtera brumata*) chemische Kommunikation über Pheromone von größter Wichtigkeit für das gezielte Auffinden eines Geschlechtspartners. Ab einsetzender Dämmerung emittieren die an Baumstämmen sitzenden brachypteren Weibchen ihr Pheromon, welches das empfangende flugfähige Männchen dazu veranlasst, gegen den Wind in Richtung emittierende Quelle zu fliegen, um sich mit dem Weibchen zu paaren. Hierbei haben visuelle Stimuli keine Bedeutung. Das Männchen erkennt das Weibchen nur anhand dessen Lockstoffe. Aufgrund zurückgebildeter Mundwerkzeuge bei beiden Geschlechtern, können Frostspanner keine Nahrung aufnehmen und sind somit auf die Energiereserven aus dem Larvenstadium angewiesen. Deshalb wird Optimierung des energetischen Investments von beiden Geschlechtern angestrebt, was durch Ausnützen der Wind- und der um den Baumstamm herrschenden Strömungssituationen erreicht wird. Männchen sammeln sich bevorzugt an der Leeseite der Baumstämme, an welcher aufgrund einer rückläufigen Luftströmung die im Raum höchst mögliche Pheromonkonzentration gegeben ist. Weibchen hingegen besetzen bevorzugt die Luvseite der Baumstämme, an welcher ihre Pheromone mit einer beschleunigten Strömung großflächig im Raum verteilt werden. Dabei sind Stammdurchmesser, Rindentypus und Windgeschwindigkeit, sowie strömungsmechanische Parameter wie Reynolds-Zahl und Grenzschichtablösung von Bedeutung. Desweiteren wird der Pheromonempfang für Männchen, durch gezieltes Besetzen gleicher Höhen an Baumstämmen durch beide Geschlechter, in der vertikalen Ebene optimiert. Somit können vorhandene Energiereserven bei Männchen für nötige Flugaktivität und mitunter sukzessive Kopulation mit mehreren Weibchen und bei Weibchen für die nötige Wegstrecke vom Boden bis in die Baumkrone und für die dort stattfindende Eiablage gespart werden.

KEY WORDS

Operophtera brumata, Kleiner Frostspanner, Geometridae, Baumstamm, Windsituation, Luvseite, Leeseite, Umströmung, Exposition, Höhenverteilung

1 Einleitung

Beim Kleinen Frostspanner (*Operophtera brumata* L. 1758) ist, wie bei allen Lepidopteren, chemische Kommunikation über Pheromone von größter Wichtigkeit für das gezielte Auffinden eines Geschlechtspartners. Die an Baumstämmen sitzenden brachypteren Weibchen emittieren ein artspezifisches Pheromon, welches das empfangende Männchen dazu veranlasst, gegen den Wind in Richtung emittierende Quelle zu fliegen (*Van Dongen et al. 1998*), um sich mit dem Weibchen zu paaren. Das Auffinden eines Weibchens ohne dessen Lockstoffe wäre für das Männchen nicht möglich, da es einen potentiellen Geschlechtspartner nur aufgrund der von ihm emittierten Pheromone erkennt (*Van Dongen et al. 1998*). *Van Dongen et al. (1998)* stellen fest, dass visuelle Stimuli im Paarungsverhalten keine Bedeutung haben, da Frostspanner Männchen versuchten mit Käfern, Rinde und menschlichen Fingern zu kopulieren. Bei Präsentation eines weiblichen Individuums, zeigten einige Männchen sogar Fluchtreaktionen.

Aufgrund zurückgebildeter Mundwerkzeuge bei beiden Geschlechtern (*Dierl & Reichholf 1977; Aistleitner 2008*), können Frostspanner keine Nahrung aufnehmen und sind somit auf Energiereserven aus dem Larvenstadium angewiesen. Männchen setzten vorhandene Energiereserven nicht nur für Flugaktivität ein, sondern auch für den Temperatúrausgleich mit der Umgebung, was bei niedrigen Außentemperaturen zu höherem Energieaufwand führt (*Dierl & Reichholf 1977*). Weibchen verbrauchen gespeicherte Energie für das Aufsuchen eines Baumstammes nach dem Schlupf, sowie für das Erklimmen desselben bis in die Baumkrone (*Varley et al. 1973; Van Dongen et al. 1998*), um dort ihre Eier abzulegen.

Eine gezielte Suche nach einem Partner wäre somit für beide Geschlechter mit hohem zusätzlichem Energieaufwand, bis hin zur letalen Erschöpfung verbunden. Deshalb ist bei *Operophtera brumata* ein gezieltes und schnelles Auffinden eines Geschlechtspartners zu erwarten, was durch Ausnützen der Wind- und Umströmungssituationen an Baumstämmen erreicht werden könnte.

1.1 Pheromonsysteme und -verteilung

Pheromone sind Semiochemikalien (Boppré 1991), welche die Grundlage der intraspezifischen chemischen Kommunikation bilden (Habermehl et al. 2008). Nach ihrer Wirkung werden sie in *Sexualpheromone*, *Aggregationspheromone*, *Erkennungspheromone*, *Alarmstoffe* oder *Repellenzien* eingeteilt (Habermehl et al. 2008).

Sexualpheromone sind im Tierreich eine weit verbreitete Methode, um einen Geschlechtspartner anzulocken, zu finden oder ihn in Paarungsbereitschaft zu versetzen. So locken z.B. Lepidoptera Weibchen durch Pheromonemittierung paarungswillige Männchen über oft große Distanzen an (Boppré 1991), um sich mit ihnen zu paaren.

1.1.1 Sexualpheromone bei Lepidopteren

Bei Motten und Schmetterlingen dienen vor allem ungesättigte-geradkettige aliphatische Alkohole, Acetate und Aldehyde als Sexualpheromone, welche häufig als Isomerengemische vorliegen (Habermehl et al. 2008). Sexualpheromone emittierende Weibchen, versenden Informationen der Artzugehörigkeit und der Paarungsbereitschaft. Männchen besitzen extrem sensible Antennen (Millar 2010), die ein Erkennen arteigener weiblicher Pheromone ermöglichen (Boppré 1991).

Bei zahlreichen Nachtfalterarten besitzen auch Männchen Duftorgane, sogenannte Androconien, die nur während des Balzverhaltens eine Rolle spielen (Boppré 1991). Die Androconien-Sekrete des Männchens vermitteln dem Weibchen Artzugehörigkeit und Qualität des Männchens, lösen schließlich die Paarungsstellung des Weibchens aus und verhindern dessen Flucht. „Desweiteren gibt es Hinweise, dass Männchen-Pheromone als Induktoren für Oogenese bzw. Eiablage, als Terminatoren für weibliches Lockverhalten und als Repellenzien gegenüber anderen Männchen wirken können“ (Boppré 1991).

Beim Kleinen Frostspanner produzieren nur Weibchen Sexualpheromone. Das Lockverhalten der Weibchen endet mit Einleitung der Kopulation (Van Dongen et al. 1998). Van Dongen et al. (1998) erklären, dass es keine Beobachtungen der Unterbrechung einer initiierten Paarung durch ein anderes Männchen gibt.

Das Sexualpheromon des adulten weiblichen Frostspanners wurde als (Z,Z,Z)-1,3,6,9-Nonadecatetraen identifiziert (Jain et al. 1983). Seine beste Wirkung auf Männchen wurde im Temperaturbereich von 7 °C bis 15 °C festgestellt¹ (Blomquist & Bagnères 2010).

1 Roelofs et al. (1982) geben die beste Wirkung des Pheromons im Temperaturbereich von 4 °C bis 15 °C an.

1.1.2 Pheromonverteilung und ökologische Parameter

Wie zu Beginn erwähnt, sitzen brachyptere Frostspanner Weibchen an Baumstämmen und emittieren Sexualpheromone, um die flugfähigen Männchen zwecks Kopulation anzulocken (Varley et al. 1973; Van Dongen et al. 1998). Männchen, die diese Lockstoffe wahrnehmen, fliegen entlang der „Pheromonspur“ in Richtung der emittierenden Quelle und krabbeln am Baumstamm Richtung Weibchen (Van Dongen et al. 1998). Für den Transport der weiblichen Pheromone im Raum, ist zumindest ein schwacher Wind notwendig. Singer & Parmesan (2010) erwähnen, dass Männchen des Kleinen Frostspanners nur bei Windstille schwach fliegen. Weibchen hingegen krabbeln unabhängig von der Windstärke Baumstämme hinauf. Wind ist somit ein wichtiger ökologischer Parameter für die Verteilung der Sexualpheromone im Raum und folgend für ein erfolgreiches Zusammentreffen von Männchen und Weibchen zur Paarung.

Da sich Männchen zur Lockstoffwahrnehmung und Weibchen zur Lockstoffemittierung an Baumstämmen anordnen, spielen diese offensichtlich eine wichtige Rolle für den optimalen Empfang, sowie die optimale Verbreitung der Sexualpheromone im Raum. Mit Sicherheit ist dabei eine gewisse Höhenverteilung der Individuen an Baumstämmen notwendig, da ein Ausbreiten als auch Empfangen von Pheromonen am Erdboden durch abgefallenes Laub und Bodenunebenheiten verhindert werden würde.

1.2 Vorhandene Literatur

Boppré (1991) zeigt auf, dass sich die meiste über Signalstoffe weiblicher Nachtfalter vorhandene Literatur im wesentlichen auf „chemische Strukturen, biosynthetische und (sinnes-)physiologische Aspekte, sowie die Lockwirkung synthetischer Substanzen in Fallen- oder Windkanalexperimenten“ konzentriert. Das *Operophtera brumata* auf diesen Gebieten gut untersucht ist, liegt nicht nur an seiner weiten Verbreitung, sondern hängt auch mit seiner Schadwirkung an Obst- und Waldkulturen zusammen² (Platz 1999). Boppré (1991) fährt fort, dass über „sehr basale ökologische Parameter (z.B. Einfluss von Wind, Feuchtigkeit, Licht, aber auch Alter, Wirtspflanzen u.ä.)“ weitgehend Unklarheit herrscht. Untersuchungen zum Einfluss abiotischer Faktoren liegen zu diesem Zeitpunkt hauptsächlich über die Larven des Kleinen Frostspanners vor. So untersuch-

2 Neben Fallenexperimenten und Untersuchungen zu Sexualpheromonen des Kleinen Frostspanners, z.B. Roelofs et al. (1982), Albert et al. (1984), Knauf et al. (1984) und Hand et al. (1987), liegen zu diesem Zeitpunkt zahlreiche Analysen über seine Populationsökologie, vor allem in Obstgärten, den Einfluss der Wirtspflanzen auf das larvale Wachstum, sowie über den Einfluss biotischer und abiotischer Faktoren auf die Entwicklung im Puppenstadium vor. Unter anderen publizierten folgende Autoren zu diesen Themen: Frank (1967), Feeny (1968), Alma (1970), Holliday (1977, 1983), Wint (1983), Kimberling et al. (1986), MacPhee et al. (1988).

te etwa *Edland* (1971) die Windverdriftung der Larven und *Kimberling & Miller* (1988) die Auswirkungen der Temperatur auf abgelegte Eier im Zusammenhang mit dem Schlupf der Larven im Frühling.

Mittlerweile ist das Spektrum der Literatur über *Operophtera brumata* stark erweitert, konzentriert sich allerdings mehr auf Populationsdynamik und Predation, regionale Ausbreitung, Synchronizität des Larvenschlupfes mit austreibenden Blattknospen im Frühling, Larvalentwicklung, Besiedlung und Bedeutung von Wirtspflanzen, sowie den temperaturabhängigen Schlupf der Larven und Imagines³. *Graf et al.* (1995) untersuchten das Verhalten des adulten Kleinen Frostspanners während der Rekolonialisierung in Obstgärten im Spätherbst im Zusammenhang mit den vorherrschenden Lichtverhältnissen. *Van Dongen et al.* (1998, 1999) machten Untersuchungen zur Partnerwahl, sowie zu Fitnesskomponenten des adulten Kleinen Frostspanners im Bezug zur Körpergröße. Es liegen jedoch keine Untersuchungen zum Einfluss abiotischer Faktoren, vor allem der Windsituation, auf den Paarungserfolg der Imagines vor. Desweiteren liegen bis jetzt keine Analysen zur Expositionsverteilung der Frostspanner Männchen und Weibchen an Baumstämmen vor, sowie den Einfluss einer am Baumstamm gewählten Position auf den Paarungserfolg.

1.3 Fragestellung

Aufgrund der Notwendigkeit das Investment vorhandener Energiereserven zu optimieren, ist bei *Operophtera brumata* ein gezieltes und schnelles Auffinden eines Geschlechtspartners zu erwarten. Das sollte dadurch erreicht werden, dass sich sowohl Männchen als auch Weibchen in für sie jeweils begünstigten Umströmungspositionen an Baumstämmen anordnen. Ein optimales Zusammentreffen zwischen Männchen und Weibchen zur Paarung, sollte durch Ausnutzen der Wind- und Umströmungssituationen optimiert werden.

Männchen sollten Positionen an Baumstämmen einnehmen, in denen sie von einer optimalen Pheromonkonzentration angeströmt sind. Unnützes Umherfliegen kann so vermieden und der erforderliche Energieaufwand minimiert werden. Weibchen sollten dagegen Positionen beziehen, aus denen ihre Pheromone optimal in den Raum verströmt werden. Dabei ist eine möglichst schnelle großflächige Verbreitung der Pheromone in einem bestimmten Horizont anzustreben.

3 Folgende Autoren veröffentlichten Arbeiten zu diesen Themen: *Topp & Kirsten* (1991), *Watt et al.* (1992), *Buse & Good* (1996), *Kerslake et al.* (1996), *Van Dongen et al.* (1997), *Buse et al.* (1998), *Peterson & Nilssen* (1998), *Tikkanen et al.* (1998, 1999, 2000), *Tikkanen & Roininen* (2001), *Raymond et al.* (2002), *Tikkanen & Lyytikäinen-Saarenmaa* (2002), *Watt & McFarlane* (2002), *Tikkanen & Julkunen-Tiitto* (2003), *Vanbergen et al.* (2003), *Hagen et al.* (2007), *Raymond & Hails* (2007), *Tenow* (2007), *Jepsen et al.* (2008), *Heisswolf et al.* (2010), *Singer & Parmesan* (2010), *Rubtsov & Utkina* (2011).

Notwendige Wegstrecken sollten minimiert werden, um vorhandene Energiereserven für den Aufstieg zur Baumkrone und die Eiablage zu sparen. Da das Weibchen nur einmal den Aufstieg in die Baumkrone schaffen sollte, muss es eine Paarung während des Aufstiegs sicherstellen.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob zwischen der Expositionsverteilung der Männchen und Weibchen des Kleinen Frostspanners an Baumstämmen und der Windsituation (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Strömungssituation) Zusammenhänge bestehen. Die Verteilung wird nach strömungsmechanischen Gesichtspunkten analysiert und ausgewertet.

2 Anatomie und Ökologie des Kleinen Frostspanners

2.1 Systematik

Tab. 2.1 gibt einen Überblick der systematischen Einordnung des Kleinen Frostspanners.

TABELLE 2.1 Systematik des Kleinen Frostspanners.
[nach <http://www.hortipendium.de>; <http://www.faunaeur.org>]

	dt. Name	lat. Name
Klasse	Insekten	Insecta
Unterklasse	höhere Insekten	Pterygota
Ordnung	Schmetterlinge	Lepidoptera
Unterordnung		Glossata
Überfamilie		Geometroidea
Familie	Spanner	Geometridae
Unterfamilie		Larentiinae
Gattung		Operophtera
Art	Kleiner Frostspanner	Operophtera brumata

2.2 Verbreitung, Vorkommen und Ernährung

Der Kleine Frostspanner ist in ganz Europa verbreitet, besonders in Mittel- und Nordeuropa, bis über den Polarkreis hinaus. In den Norden der USA und in Kanada wurde er eingeschleppt (Alford 2007; Hohmann & Kluge 2010).

In Österreich ist der Kleine Frostspanner weit verbreitet, vor allem im Osten und Süden kam es in den letzten Jahren zu einem Populationszuwachs der laubfressenden Larven (Connell & Steyrer 2007). Connell & Steyrer (2007) führten im Jahre 2006 eine Raupenfallen-Untersuchung in Wien auf dem Gelände des BFW (Institut für Waldschutz des Bundesforschungs- und Ausbildungszen-

trums für Wald, Naturgefahren und Landschaft) durch. Von den gefangenen Spannerarten, war der Kleine Frostspanner mit 87% am häufigsten vertreten.

Operophtera brumata kommt als Larve und als Imago vor allem in Laubmischwäldern, aber auch in Parks und Obstgärten vor. Es werden vor allem Buchen, Eschen, Ahorn und Birken, aber auch Sträucher, wie Haselnuss und Beerensträucher besetzt (Alford 2007; Connell & Steyrer 2007). Bei Nahrungsmangel treten die Larven von *Operophtera brumata* auch an Nadelbäumen auf (Krehan et al. 2011). In Obstgärten sind sie besonders auf Apfel-, Birnen-, Kirsch- und Zwetschgenbäumen zu finden (Alford 2007; Connell & Steyrer 2007). „In der Literatur werden über 100 Baum- und Straucharten als Nahrungspflanzen genannt“ (Hohmann & Kluge 2010).

2.3 Anatomie und Sexualdimorphismus

Der Kleine Frostspanner zeigt als adultes Tier einen ausgeprägten Sexualdimorphismus. Beiden Geschlechtern ist jedoch eigen, dass sie als Imago aufgrund zurückgebildeter Mundwerkzeuge keine Nahrung aufnehmen (Dierl & Reichholf 1977; Aistleitner 2008).

Adulte Männchen sind flugfähig, mit einer Flügelspannweite von etwa 22-28 mm. Die abgerundeten Vorderflügel sind meist graugelb mit mehr oder weniger ausgeprägten dunklen Wellenlinien (Abb. 2.1a). Die Hinterflügel sind heller, leicht hellbraun bis weislich (Rein & Zech 1975; Alford 2007). In Ruhe sind die Flügel deltaförmig über dem etwa 15 mm langen Körper ausgebreitet. Die Antennen sind fadenförmig und ihre Länge beträgt etwa $\frac{2}{3}$ der Körperlänge.

Die Flügel der flugunfähigen adulten Weibchen sind zu graubraunen Flügelstummeln reduziert. Ihr Körper ist etwa 5-6 mm lang und weist eine grau bis dunkelbraune Färbung mit graugelber Sprenkelung auf (Alford 2007) (Abb. 2.1b). Sie besitzen kräftige, auffallend lange Beine. Die Pheromondrüsen sind zwischen dem 8. und 9. Abdominalsegment lokalisiert (Boppré 1991).

Die Larven des Kleinen Frostspanners erreichen eine Körperlänge bis etwa 25 mm. Sie sind hellgrün gefärbt, mit einem dunklen dorsalen Streifen und drei helleren weislichen lateralen Streifen (Rein & Zech 1975; Alford 2007) (Abb. 2.1d). Wie alle Spannerlarven, besitzen sie ein Paar Bauchfüße und ein Paar Nachschieber am Hinterende (www.kob-bavendorf.de 2012⁴). Die relativ kräftig ausgebildeten Mundwerkzeuge, ermöglichen den Larven eine polyphage Lebensweise (Aistleitner 2008).

⁴ <http://www.kob-bavendorf.de/Service/schaedlinge-und-krankheiten/schaedlinge/kleiner-frostspanner> (22.04.2012, 18:10 Uhr MESZ). Gilt für alle weiteren Zitate dieser Internetadresse.



ABBILDUNG 2.1 Kleiner Frostspanner als Imago und Larve. (a) Adultes Männchen, (b) adultes Weibchen, (c) Männchen und Weibchen bei Kopulation am Baumstamm, (d) Larve.
[Fotos: Peter Buchner]

2.4 Lebenszyklus und Paarung

Die adulten Kleinen Frostspanner schlüpfen von Mitte Oktober bis Ende Dezember aus den im Erdboden liegenden Puppen (*Rein & Zech* 1975) (vgl. Abb. 2.2). Mit einsetzender Dämmerung beginnen Weibchen nächstgelegene Baumstämme hinaufzuklettern (*Graf et al.* 1995), verharren am Stamm und emittieren Sexualpheromone, um Männchen zur Paarung anzulocken (*Van Dongen et al.* 1998). Die über Tags auf dem Erdboden ruhenden Männchen, beginnen ab der Dämmerung aktiv zu fliegen und lassen sich schließlich am unteren Teil der Baumstämme nieder (*Varley et al.* 1973). Am Baumstamm erfolgt auch die Kopulation, nachdem das Männchen das emittierende Weibchen aufgrund dessen Lockstoffe gefunden hat. Das Männchen richtet seinen Körper parallel zum Körper des Weibchens aus und versucht sein Abdomen an ihres zu drücken (Abb. 2.1c). Die Kopulation dauert mitunter mehrere Stunden (*Van Dongen et al.* 1998). Danach kehrt das Männchen zur Ruhe am Erdboden zurück⁵ und kopuliert am nächsten Tag wieder (*Speyer* 1938; *Van Dongen et al.* 1998). Das Weibchen klettert nach der Kopulation, teilweise auch wäh-

⁵ Laut Mag. Peter Buchner sitzen Frostspanner Männchen tagsüber auch an Baumstämmen und nicht nur am Erdboden.

rend der Kopulation, weiter den Baumstamm hinauf zur Baumkrone, wo es einmalig 100 bis 200 Eier (Alford 2007) in Ritzen der Rinde und Flechten ablegt (Varley et al. 1973; Van Dongen et al. 1998). Männchen können bis zu 7-mal kopulieren, während Weibchen gewöhnlich nur 1-mal, mitunter jedoch bis zu 3-mal kopulieren (Speyer 1938; Cuming 1961; Van Dongen et al. 1998).

Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Ei									Ei		
		Larve									
					Puppe						
									Imago		

ABBILDUNG 2.2 Lebenszyklus des Kleinen Frostspanners innerhalb von 12 Monaten (Januar bis Dezember), mit den vier Phasen seiner Entwicklung. [nach Chinery (1994)]

Ab Ende März bis Mitte Juni (vgl. Abb. 2.2) schlüpfen die Junglarven aus den ovalen, mittlerweile orangerot gewordenen Eiern, zu Beginn des Knospenaustriebs im Frühling (Alford 2007). Anfangs ernähren sie sich von den sich entwickelnden Knospen und Blüten (www.kob-bavendorf.de 2012), später von Blättern und heranreifendem Obst (Aistleitner 2008). Sie produzieren dünne Fäden, an denen hängend sie oft vom Wind über weite Strecken vertrieben werden und somit neue Bäume besiedeln (Alford 2007). Nach einer temperaturabhängigen Entwicklungsdauer (Uvarov 1931) von etwa 25 bis 40 Tagen (Hohmann & Kluge 2010) und ständigem Fressen, seilt sich die Larve zum Erdboden ab, in dem sie sich in einer Tiefe von etwa 8 bis 10 cm in einem lockeren Kokon verpuppt (Rein & Zech 1975). „Die Puppe ruht den ganzen Sommer über und entlässt erst im Spätherbst den Falter, wenn die Bodentemperatur 5 °C beträgt“ (Hohmann & Kluge 2010).

2.5 Populationsdynamik und Umwelteinflüsse

Die Bestandsdynamik des Kleinen Frostspanners ist zahlreichen abiotischen und biotischen Faktoren unterworfen (Dierl & Reichholf 1977), welche umfangreich untersucht wurden⁶.

⁶ Die Einflüsse abiotischer und biotischer Faktoren auf die Bestandsdynamik des Kleinen Frostspanners wurden von folgenden Autoren untersucht: Axelsson et al. (1975), Betts (1955), Buckner (1969), Dempster (1975), East (1974), Elton (1966), Frank (1967a, 1967b), Hassel (1969), Huffaker & Kennet (1969), Murton (1971), Varley (1971), Varley & Gradwell (1968), Varley et al. (1973). Die Liste der Autoren ist aus Dierl & Reichholf (1977) entnommen und wird nicht im Literaturverzeichnis angeführt.

Zur Dezimierung seines Larvenbestandes tragen natürliche Feinde teilweise bei. Bei Massenvermehrung ist die Larve höherem Parasitierungsgrad durch Schlupfwespen, Pilze und Viren ausgesetzt (Krehan et al. 2011). Besonders Meisen verfüttern die Larven an ihre Brut (www.kob-bavendorf.de 2012). Somit ist *Operophtera brumata* im Larvenstadium „hohem Feinddruck ausgesetzt, doch die hohe Nachwuchsrate bedingt prozentual nur geringe Vernichtungskoeffizienten durch insektenfressende Vogel (0,3% bis 4,8%)“ (Dierl & Reichholf 1977).

Weitaus bedeutender für die Dezimierung des Kleinen Frostspanners sind abiotische Faktoren. Dempster (1975) stellt fest, dass die Gesamtverluste, trotz niedriger Vernichtungsrate durch biotische Faktoren, hoch sind. Dierl & Reichholf (1977) folgern weiter, dass diese Dezimierung „aus der Sicht des popularen Gleichgewichts bei 200 Eiern pro Weibchen auch notwendig ist“. So bewirken etwa ungünstige Witterungsverhältnisse, vor allem im Gradozön, eine starke Reduktion der Individuenzahl (Uvarov 1931; Dierl & Reichholf 1977).

2.6 Schädwirkung und Bekämpfung

Im Großteil der Literatur wird die Larve des Kleinen Frostspanners als der am häufigsten auftretende Schädling in Obstkulturen und Wäldern bezeichnet. Sie verursacht alljährlich teilweise „starke Fraßschäden an den frisch austreibenden Blättern von Obst- und anderen Laubbäumen“ (Krehan et al. 2011). „In manchen Fällen spinnen die Raupen Blätter und Blütenknospen zusammen in deren Schutz sie weiter fressen“ (www.kob-bavendorf.de 2012). Auch die Früchte der Obstbäume sind betroffen, in die sich die Larve hineinfisst und diese aushöhlt (Alford 2007). Krehan et al. (2011) erklären, dass Kahlfraß jedoch selten vorkommt. Meist sind die Blätter durchlöchert oder ausgefranst, teilweise werden diese bis auf das Blattgerippe abgeweidet.

Connell & Steyrer (2007) stellen in ihrer Raupenfallen-Untersuchung fest, dass durchschnittlich 4,6 bis 35,9 Larven/m³ Kronengröße (Blatt-/Astvolumen über Falle) an verschiedenen Baumarten auftreten. Es handelt sich dabei um eine Untersuchung an Laubbäumen im Waldbereich⁷. Dennoch ist diese Larvendichte auch bei größeren Obstkulturen möglich, vor allem wenn sich diese in Waldnähe befinden (www.kob-bavendorf.de 2012). Daraus ist zu folgern, dass die Larven von *Operophtera brumata*, aber auch anderer Spannerarten, erheblichen ökologischen und finanziellen Schaden verursachen können.

⁷ Die durchschnittliche Larvendichte ist nicht nur auf *Operophtera brumata* bezogen, sondern auf alle an einer Baumart gefangenen Larven. Untersucht wurden die Baumarten Feldahorn, Hänge-Birke, Zerreiche, Traubeneiche, Gemeine Esche, Hainbuche und Spitzahorn.

Zur Bekämpfung des Kleinen Frostspanners, besonders in Obstkulturen, werden im Oktober, vor dem Schlüpfen der Imagines, Leimringe um die Baumstämme gelegt (*Krehan et al. 2011*). Die am Baumstamm empor kletternden Weibchen bleiben daran kleben und werden so daran gehindert, ihre Eier in den Astkronen abzulegen. Desweiteren werden zur Überwachung der Flugaktivität der Männchen Pheromonfallen eingesetzt (*www.kob-bavendorf.de 2012*). Das synthetisch hergestellte Sexualpheromon des Frostspanner Weibchens, wird in Verbindung mit klebriger Substanz an Bäumen angebracht. Von den Pheromonen angelockt, bleiben die Männchen kleben und eine ungefähre Individuendichte kann abgeschätzt werden.

3 Fluiddynamik und Strömungsmechanik

Baumstämme können auf dem Fachgebiet der Strömungsmechanik als Kreiszyylinder angesehen werden. Dabei wird der Baumstamm oder der Kreiszyylinder als stumpfer Körper betrachtet, um den das Fluid (in diesem Fall Luft) strömt. Es handelt sich dabei um eine Wirbelströmung eines realen kompressiblen Fluids (Sigloch 2009).

3.1 Begriffe, Definitionen und Formeln

3.1.1 Dynamische Viskosität

Die dynamische Viskosität η ist eine „Stoffgröße und ein Maß für die Verschiebbarkeit der Fluidteilchen gegeneinander“ und „ist durch die sogenannten Van-der-Waals'schen Kräfte (Teilchenkräfte) und die Brown'sche Molekularbewegung bedingt“ (Sigloch 2009). Sie beschreibt also die Zähigkeit eines Fluids und wird „definiert durch den Reibungswiderstand, den ein Fluid einer Verformung durch eine Druck- oder Schubspannung entgegensetzt“ (www.buerkle.de 2012⁸). Mit steigender Temperatur erhöht sich die Viskosität von Gasen (Paus 2007), „da die bei höheren Temperaturen sich schneller und weiter bewegendenden Gasteilchen öfter und heftiger gegeneinander stoßen, sich also stärker behindern – wobei die Scherung auch wegen Querdiffusion ansteigt – und dadurch einen größeren Strömungswiderstand bewirken“ (Sigloch 2009).

Die dynamische Viskosität wird nach der Näherung

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \bar{c} \cdot \bar{l} \quad (3.1)$$

berechnet und wird in der Einheit $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ oder $Pa \cdot s$ angegeben. Luft hat bei 20 °C und 100 kPa ein η von $18 \cdot 10^{-6} Pa \cdot s$ (Näherungswert) (Sigloch 2009).

8 www.buerkle.de/media/files/Downloads/Viskositaeten_DE.pdf (03.04.2012, 15:34 Uhr MESZ).

3.1.2 Kinematische Viskosität

Die kinematische Viskosität ν ist der „Quotient von dynamischer Viskosität und Dichte“ (Sigloch 2009), beschreibt also das Verhältnis der beiden Stoffgrößen zueinander. Es gilt für ν die gleiche Temperaturabhängigkeit wie für η , also steigende Viskositätswerte bei Temperaturerhöhung.

Wie eben beschrieben wird die kinematische Viskosität nach der Formel

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.2)$$

berechnet und wird in der Einheit $m^2 \cdot s^{-1}$ angegeben. Luft hat bei 20 °C und 100 kPa ein ν von $15 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ (Näherungswert) (Sigloch 2009).

3.1.3 Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl Re wird in der Strömungsmechanik als die wichtigste Ähnlichkeitsgröße angesehen. „Mit typischen Referenzgrößen, d.h. einer Fluidichte ρ , einer Strömungsgeschwindigkeit c , einer Körperlänge L und der Viskosität η “, beschreibt sie die Strömungsform des Fluids um einen Körper und „kann grob als das Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften definiert werden“ (Hänel 2004). Bei der Körperlänge L handelt es sich in diesem Fall um den Durchmesser des Kreiszyllinders (Baumstammes). Die Strömungsgeschwindigkeit c ist in diesem Fall die auf den Baumstamm auftreffende Windgeschwindigkeit.

Die Reynolds-Zahl wird nach der Formel

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot L}{\eta} \quad (3.3)$$

berechnet und ist eine dimensionslose Zahl.

3.1.4 Widerstandsbeiwert

Beim Strömungswiderstand W handelt es sich „um die Kraft, die ein Fluid auf einen umströmten Körper in Richtung der Anströmung ausübt“ (Herwig 2004). Dabei spielen physikalische Faktoren, wie z.B. die Form des umströmten Körpers, eine wichtige Rolle für dessen Entstehung. „Unabhängig von der Entstehung eines Strömungswiderstands kann dieser in Form“ des Widerstandsbeiwertes c_W ausgedrückt werden (Herwig 2004).

Der Widerstandsbeiwert wird nach der Formel

$$c_W = \frac{2 \cdot W}{\rho \cdot c^2 \cdot A_B} \quad (3.4)$$

berechnet und ist eine dimensionslose Zahl.

c_W steht mit Re und der Oberflächenrauigkeit k des Kreiszylinders in direktem Zusammenhang (Herwig 2004; Hucho 2011). Dabei nimmt c_W mit steigendem Re ab. Das Absinken von c_W im kritischen Re -Bereich (vgl. Abschnitt 3.2.3 und Abb. 3.7) wird mit steigender Oberflächenrauigkeit zu niedrigeren Re -Werten hin verschoben (Herwig 2004) (Abb. 3.1), d.h. die kritische Reynolds-Zahl Re_{kr} wird durch Oberflächenirritationen niedriger (vgl. auch Abschnitt 3.2.4).

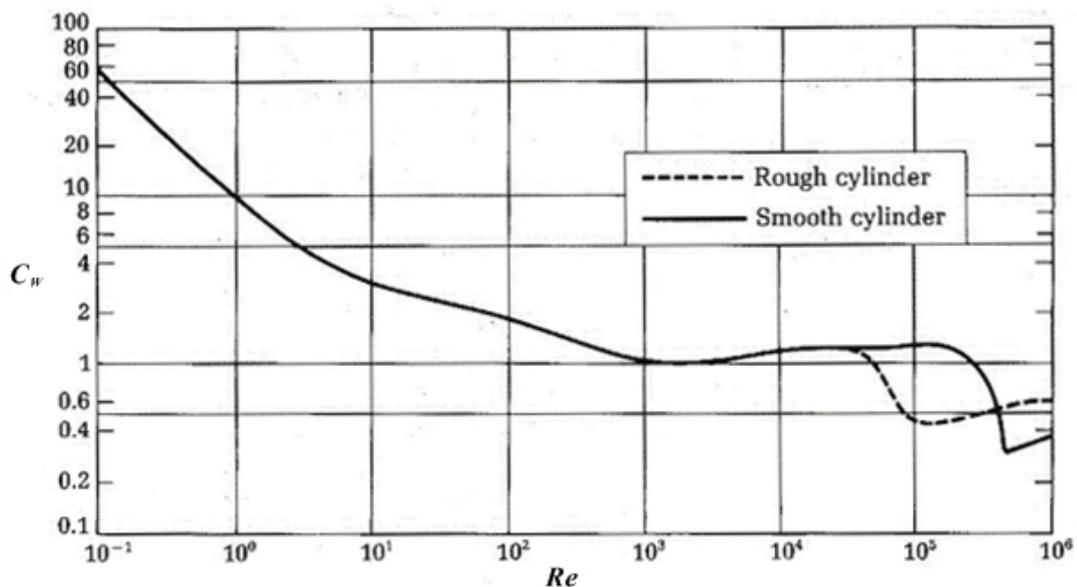


ABBILDUNG 3.1 c_W als Funktion von Re für Kreiszyylinder mit rauer (rough) und glatter (smooth) Oberfläche. (c_W Widerstandsbeiwert, Re Reynolds-Zahl) [aus <http://www.propellersafety.com> (verändert)]

3.1.5 Strouhal-Zahl

„Die Strouhal-Zahl St tritt bei der Berechnung instationärer Strömungsvorgänge auf“ (Sigloch 2009), bei denen teilweise oder vollständige regelmäßige Wirbelbildung, also periodisches Verhalten, auftritt (Herwig 2004; Hucho 2011). Dabei kommt es zu einer Veränderung der Referenzgrößen (Geschwindigkeit, Druck, usw.), „ohne dass diese durch periodisch veränderliche Randbedingungen erzwungen werden“ (Herwig 2004). St ist eine Funktion von Re und nimmt mit steigendem Re leicht zu (Herwig 2004; Hucho 2011).

Die Strouhal-Zahl wird nach der Formel

$$Sr = \frac{f \cdot L}{c} \quad (3.5)$$

berechnet und ist eine dimensionslose Zahl. f ist dabei die Zahl der pro Sekunde auf einer Seite des Kreiszyinders abgehenden Wirbel.

Im Re -Bereich „von etwa $80 < Re < 5000$ kommt es zu einer regelmäßigen Wirbelablösung auf der stromabwärtigen Seite des Kreiszyinders, wobei diese in alternierender Folge an beiden Seiten des Kreiszyinders auftritt“ (Herwig 2004) (vgl. Abschnitt 3.2.5, Tab. 3.1). Diese periodische Strömungsablösung wird als Kármán'sche Wirbelstraße bezeichnet (Abb. 3.2). Mit höher werdendem Re wird die Struktur der Wirbelzone stark durch Instationaritäten und Turbulenzen beeinträchtigt (Herwig 2004).

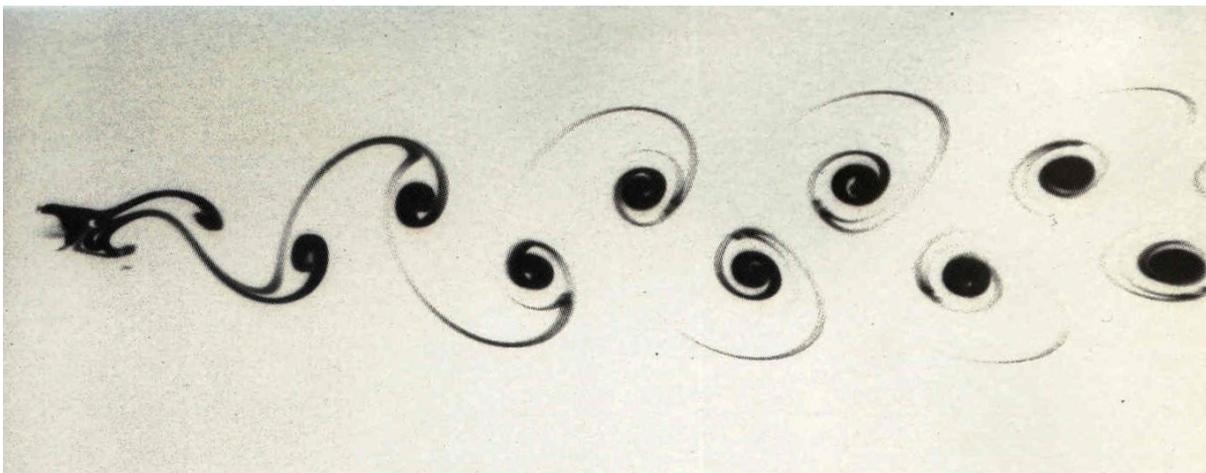


ABBILDUNG 3.2 Negativ Ablichtung einer Kármán'schen Wirbelstraße in Öl. Im Ablösegebiet hinter dem Kreiszyinder entstehen mit zunehmender Entfernung größer werdende Wirbel.
[aus <http://www.lrz.de> (verändert)]

3.2 Strömungscharakteristik und -verlauf

Grundsätzlich werden die beiden Strömungsformen *laminar* und *turbulent* unterschieden (Abb. 3.3), wobei diese beiden Formen einzeln oder zusammen in der Grenzschicht, als auch im Ablösegebiet (Wirbelzone) auftreten können.

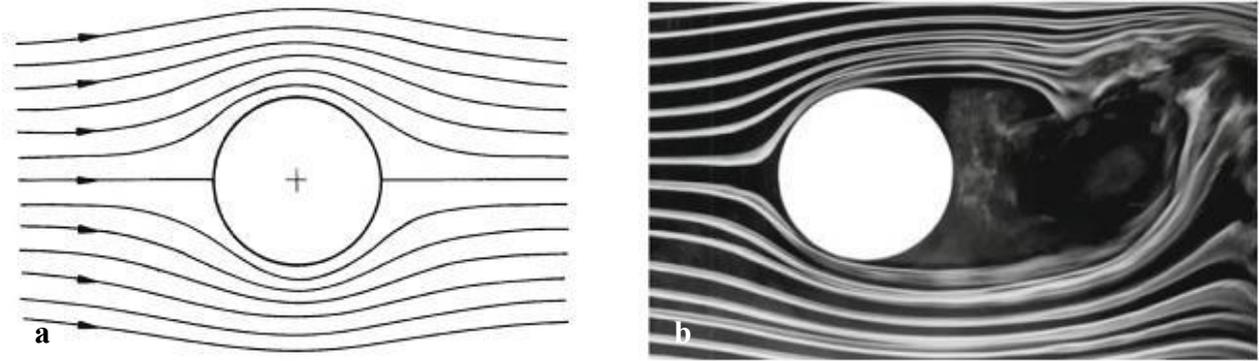


ABBILDUNG 3.3 Strömung um einen Kreiszyylinder. (a) Laminare Strömung ohne Wirbelbildung in der Grenzschicht oder im Ablösegebiet, (b) subkritische Strömung mit laminarer Grenzschicht und turbulent werdendem Ablösegebiet.
[aus Hucho (2011)]

3.2.1 Strömungsablösung

Am Kreiszyylinder lösen sich die Grenzschichten von der Körperwand ab, wodurch die gesamte Strömung von der Oberfläche abgedrängt wird (Sigloch 2009) (Abb. 3.4).

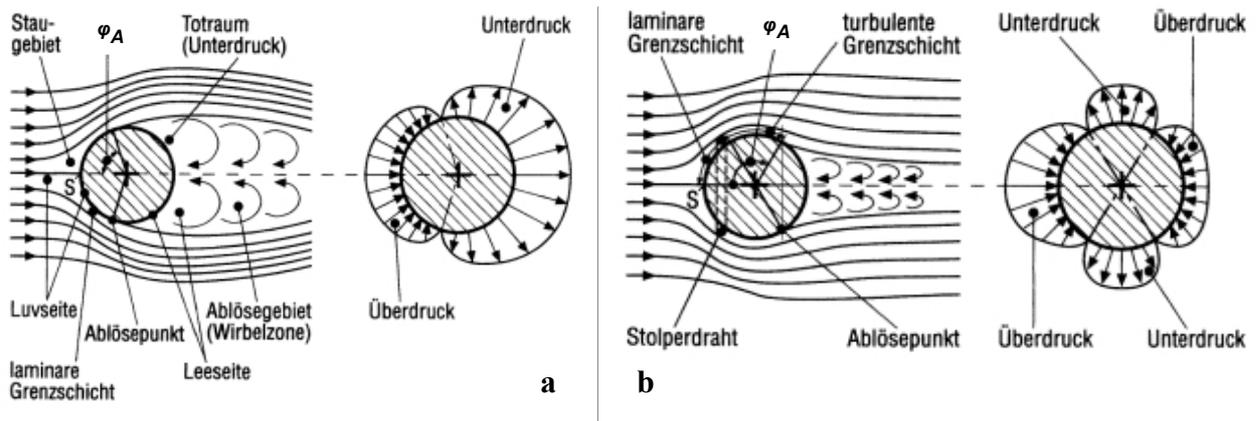


ABBILDUNG 3.4 Strömung um einen Kreiszyylinder oder eine Kugel mit prinzipiellem Stromlinien- und Druckverlauf. Druckauftrag mit Pfeilen normal zur Oberfläche. (a) Laminare Grenzschicht mit Ablöswinkel $80^\circ < \varphi_A < 90^\circ$, (b) turbulente Grenzschicht nach Unebenheit (Stolperdraht) mit Ablöswinkel $110^\circ < \varphi_A < 120^\circ$. (φ_A Ablöswinkel der Grenzschicht, S Staupunkt)
[aus Sigloch (2009) (verändert)]

Die Grenzschicht ist „eine dünne Schicht am Rand eines Strömungsfeldes“ (an der Kreiszyylinderwand), „in der es zur Ausbildung von hohen Geschwindigkeitsgradienten kommt und in der deshalb Reibungseffekte von ausschlaggebender Bedeutung sind“ (Herwig 2004). Lösen sich die Grenzschichten von der Kreiszyylinderwand ab, bildet sich zwischen Wand und der abgelösten Strömung eine mit Wirbeln durchsetzte Zone (Sigloch 2009), die sogenannte Wirbelzone (Abb. 3.4).

(Sigloch 2009) (vgl. Abb. 3.6). „Diese rückläufige Strömung schiebt sich zwischen Körperoberfläche und Grenzschicht, wodurch die Außenströmung vom Körper abgedrängt wird“ (Sigloch 2009). Die Grenzschichtablösung findet somit statt (Punkt A).

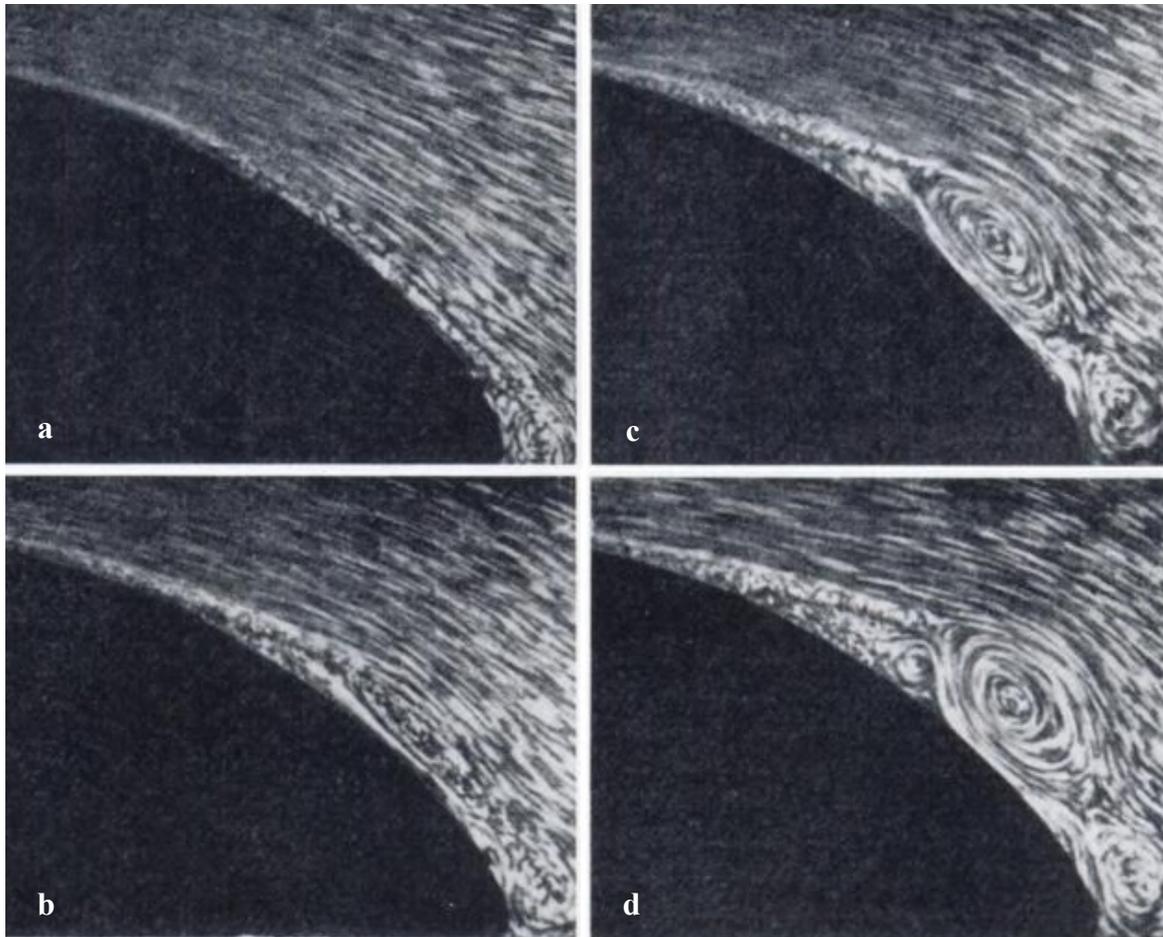


ABBILDUNG 3.6 Entwicklung der Grenzschichtablösung an der Leeseite des Kreiszyinders mit der Zeit. (a) Die rücklaufende Bewegung setzt ein, (b) der Totraum wird breiter, da sich die Rücklaufbewegung nach vorne schiebt, (c) Bildung eines großen Wirbels durch die Rückströmung, (d) Größenzunahme des Wirbels und weitere Abdrängung der Grenzschicht von der Kreiszyinderwand. Wirbel bilden sich an der Körperwand der Leeseite des Kreiszyinders vom Ablösepunkt bis hin zum Mittelpunkt (180°).
[aus Schlichting & Gersten (2000) (verändert)]

3.2.2 Grenzschichtdicke

Die Grenzschichtdicke δ ist definiert als der „Wandabstand, in dem die wandparallele Geschwindigkeit 99% der Außenströmungsgeschwindigkeit erreicht hat“ (Herwig 2004). Mit dem Strömungsweg s wächst die Grenzschichtdicke an (Abb. 3.5), wobei die Dicke der turbulenten Grenzschicht δ_t wesentlich schneller (fast linear) anwächst, als die Dicke der laminaren Grenzschicht δ_l (Herwig 2004; Sigloch 2009).

Die Dicke der laminaren Grenzschicht wird nach der Näherung

$$\delta_l \approx 5 \cdot \sqrt{\frac{v \cdot s_l}{c}} \quad (3.6)$$

und die Dicke der turbulenten Grenzschicht nach der Näherung

$$\delta_t \approx 0,37 \cdot \sqrt[5]{\frac{v \cdot s_t^4}{c}} \quad (3.7)$$

berechnet und wird in einer Längeneinheit angegeben.

3.2.3 Kritische Reynolds-Zahl

Aus dem direkten Zusammenhang zwischen c_w und Re (vgl. Abschnitt 3.1.4 und Abb. 3.1) lassen sich vier Re -Bereiche unterscheiden, die als *unterkritisch*, *kritisch*, *überkritisch* und *transkritisch* bezeichnet werden (Behara & Mittal 2011; Hucho 2011) (Abb. 3.7). Dabei ist im unterkritischen Bereich die Grenzschicht an der Kreiszyylinderwand laminar, im kritischen bis überkritischen Bereich erfolgt der Umschlag der Grenzschicht von laminar in turbulent und im transkritischen Bereich ist die Grenzschicht turbulent (Sigloch 2009; Hucho 2011).

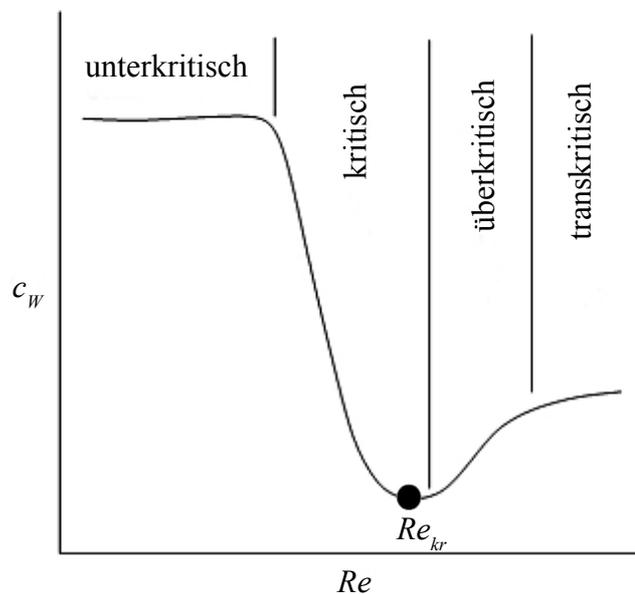


ABBILDUNG 3.7 Strömung um einen Kreiszyylinder. Strömungsbereiche unterkritisch, kritisch, überkritisch und transkritisch in Abhängigkeit von Re . Eingezeichnet ist die kritische Reynolds-Zahl, die den ungefähren Umschlagsbereich der laminaren in eine turbulente Grenzschicht angibt. (c_w Widerstandsbeiwert, Re Reynolds-Zahl, Re_{kr} kritische Reynolds-Zahl)

[aus Behara & Mittal (2011) (verändert nach Hucho (2011))]

Die kritische Reynolds-Zahl Re_{kr} liegt also im Minimum von c_W im kritisch-überkritischen Bereich (Abb. 3.7). Es gibt keine scharfe Grenze für den Umschlag der Grenzschicht von laminar in turbulent (Sigloch 2009), welcher etwa im Bereich $Re_{kr} = 3 \cdot 10^5$ bis $5 \cdot 10^5$ liegt. Der Re_{kr} -Bereich ist wesentlich von folgenden Faktoren abhängig:

- „Strömungsgeschwindigkeit,
- Fluidart, gekennzeichnet durch die Eigenschaften ρ und η “ (Sigloch 2009),
- Körperlänge des umströmten Körpers,
- sowie der Beschaffenheit der Oberfläche (Rauigkeit) des Körpers (Merrick & Bitsuamlak 2008; Sigloch 2009; Hucho 2011).

Diese Faktoren sind allerdings auch an der Zusammensetzung von Re beteiligt. Wie in Abschnitt 3.1.3 erwähnt, ist Re daher die „hauptsächliche Kenngröße für die Strömungsform und den Umschlag“ der Grenzschicht „von laminarer in turbulente Strömung“ (Sigloch 2009).

3.2.4 Rauigkeitseinfluss

Wie bereits in Abschnitt 3.1.4 erwähnt, hat die Beschaffenheit der Oberfläche des Kreiszylinders einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Strömung entlang der Kreiszylinderwand. „Mit zunehmender Rauigkeit“ k „wird der Umschlag der Grenzschicht“ von laminarer in turbulente Strömung „zu kleineren Winkeln vorverlegt“ (Hucho 2011) (vgl. Abschnitt 3.2.1, Abb. 3.4b, Stolperdraht). Außerdem wird der Winkel des Grenzschichtablösepunktes größer und wird hinter das Dickenmaximum des Kreiszylinders verlegt (Merrick & Bitsuamlak 2008; Hucho 2011) (Abb. 3.4b und Abb. 3.5). Er kann im Extremfall 140° betragen. Desweiteren hat k Einfluss auf die Wirbelzone hinter dem Kreiszylinder. So verdoppelt sich beim glatten Kreiszylinder Sr und somit erhöht sich auch die Frequenz f der abgehenden Wirbel (Hucho 2011).

Die Rauigkeit der Kreiszylinderoberfläche wird nach der Formel

$$k = \frac{c \cdot h}{v} \quad (3.8)$$

berechnet und ist eine dimensionslose Zahl. Es ist ein Wert von $k = 200$ notwendig, um die laminare Strömung entlang der Kreiszylinderwand zu verändern und von $k = 1000$, damit eine vollständig turbulente Grenzschicht ausgebildet wird (Merrick & Bitsuamlak 2008). Diese Wert gelten für einen runden Kreiszylinder mit laminarer Anströmung (Windkanalexperimente).

Im Falle eines Baumstammes mit rauer Rinde, kann davon ausgegangen werden, dass eine mehr oder weniger turbulente Grenzschicht vorliegt, da die Umströmung an jeder Unebenheit der Rinde abreißt und sich bis zum Ablösepunkt wieder an der Kreiszyylinderwand anlegt (*Steinrück*, pers. Mitteilung).

Behara und Mittal (2011) zeigen, dass ein Rauigkeitselement mit einer Höhe von 0,5% des Durchmessers an der Luvseite (55°) eines ansonsten glatten Kreiszyinders bereits bei $Re \geq 5 \cdot 10^4$ zum Umschlag der laminaren in eine turbulente Grenzschicht führt. Außerdem setzen Instabilitäten in der Wirbelzone früher ein und die Wirbeldichte ω_z nimmt zu (Abb. 3.8).

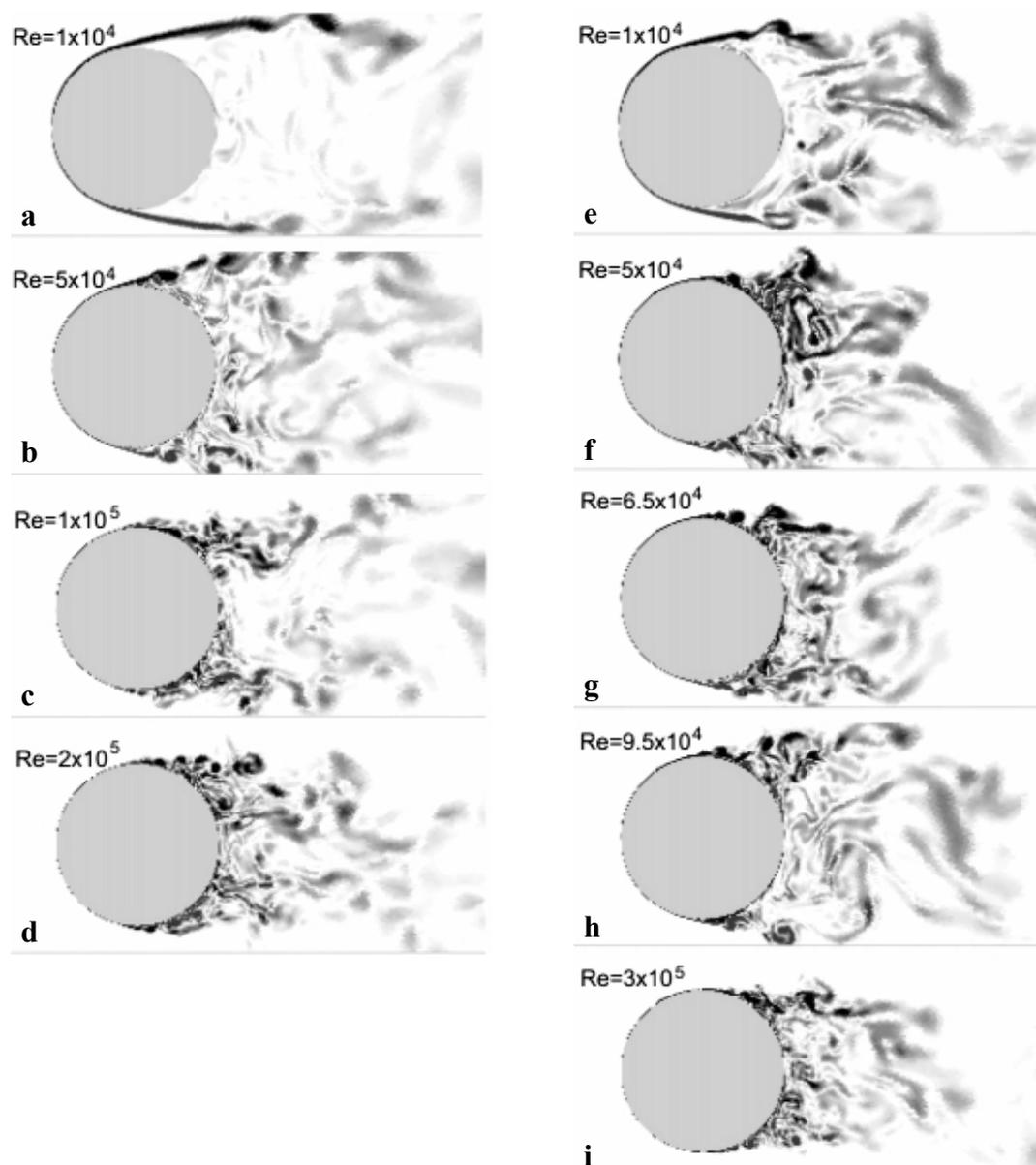


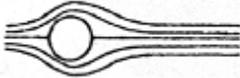
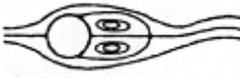
ABBILDUNG 3.8 Strömung um einen Kreiszyylinder bei unterschiedlichem Re . (a-d) Glatter Kreiszyylinder, (e-i) Kreiszyylinder mit Rauigkeitselement bei 55° , aufgrund dessen ω_z schon bei niedrigen Re -Werten zunimmt. (Re Reynolds-Zahl)

[aus *Behara & Mittal* (2011) (verändert)]

3.2.5 Strömungsformen

Die Strömungsformen eines Fluids um einen Kreiszyylinder, die einem bestimmten Re -Bereich zugeordnet werden können, sind in Tab. 3.1 dargestellt und beschrieben.

TABELLE 3.1 Strömungsformen am glatten Kreiszyylinder in Abhängigkeit von Re . Angegeben ist der Re -Bereich, dem eine Strömungsform zugeteilt wird, mit dem jeweiligen Winkel der Grenzschichtablösung. (φ_A Winkel der Grenzschichtablösung, Re Reynolds-Zahl)
[nach Schlichting & Gersten (2000); Sumer & Ferdsoe (2006); Hucho (2011)]

Re -Bereich	Strömungsform	Strömungscharakteristik	φ_A [°]
$Re \rightarrow 0$		schleichende Strömung, stationär, keine Wirbelzone	
$3 \cdot 4 < Re < 30 \cdot 40$		laminare Grenzschicht, stationäres Wirbelpaar in Wirbelzone, Ablösung symmetrisch	$130^\circ < \varphi_A < 180^\circ$
$40 < Re < 90$		laminare Grenzschicht, Einsetzen von Instabilität in Wirbelzone, Beginn der Kármán'schen Wirbelstraße	$115^\circ < \varphi_A < 130^\circ$
$90 < Re < 300$		laminare Grenzschicht, leicht turbulente Wirbelzone, Kármán'sche Wirbelstraße	$\sim 110^\circ$
$300 < Re < 1,3 \cdot 10^5$ (unterkritisch)		laminare Grenzschicht, Wirbelzone vollständig turbulent	$80^\circ < \varphi_A < 90^\circ$
$1,3 \cdot 10^5 < Re < 3,5 \cdot 10^6$ (kritisch)		Umschlag der Grenzschicht von laminar in turbulent, turbulente Wirbelzone	$80^\circ < \varphi_A < 140^\circ$
$3,5 \cdot 10^6 < Re$ (überkritisch, transkritisch)		turbulente Grenzschicht, turbulente Wirbelzone	$110^\circ < \varphi_A < 120^\circ$

4 Material und Methode

4.1 Erhebungsgebiet

Die Datenerhebung wurde im Bezirk Neunkirchen (Niederösterreich) im Bereich des Naturpark Türkensturz durchgeführt (Mittelpunkt des Untersuchungsbereichs: $47,652^\circ$ nördliche Breite; $16,130^\circ$ östliche Länge). Es handelte sich um ein Fagetum mit anderen Arten, wie Föhre, Fichte, Esche, Eiche und Birke, sowie verschiedenen Sträuchern. Der Untersuchungsbereich reichte von etwa 375-450 m Seehöhe (N.N.), an einem in Nord-Süd-Richtung verlaufenden, westlich exponierten Hang.

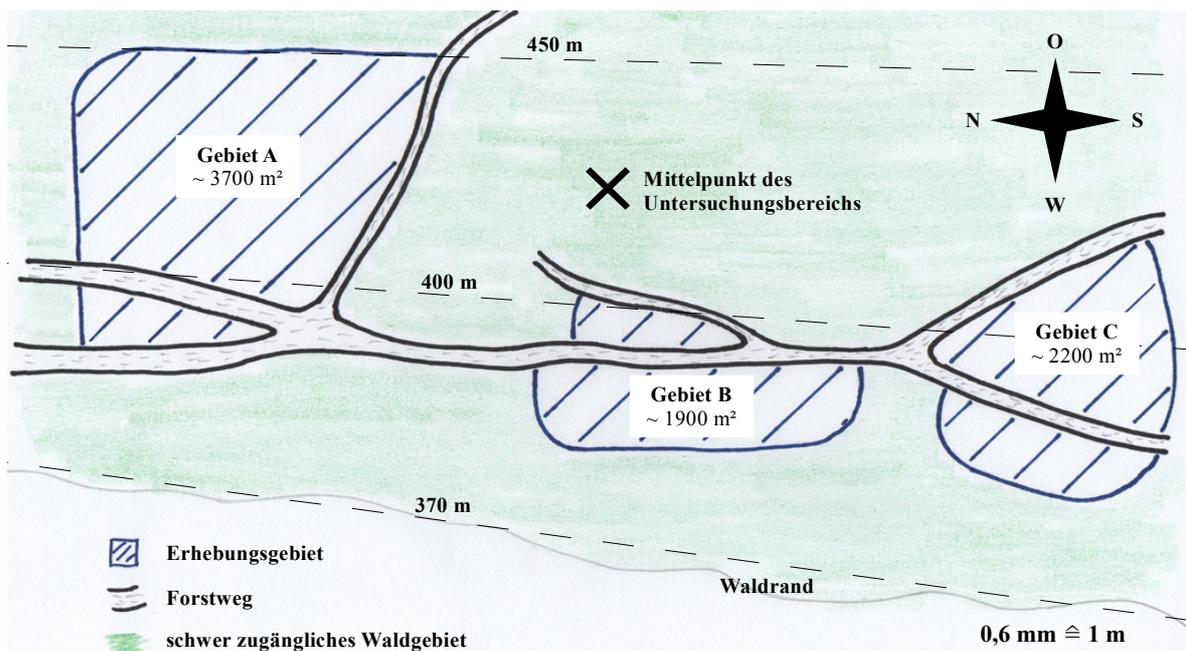


ABBILDUNG 4.1 Schematische Karte des Untersuchungsbereichs. Eingezeichnet sind die Erhebungsgebiete (Gebiet A-C), die Himmelsrichtungen, sowie die Höhenlinien und der Mittelpunkt des Untersuchungsbereichs. Die Breite der Forstwege ist stark überzeichnet.

Der Waldbereich wurde in 3 Erhebungsgebiete eingeteilt, mit einer Gesamtgröße von etwa 0,78 ha (Abb. 4.1). Es handelte sich um die am einfachsten zugänglichen Bereiche der Hangseite. Die Mindestdistanz des westlichsten Punktes der Erhebungsgebiete zum Waldrand, betrug etwa 30 m. Durch die Erhebungsgebiete verlief ein 2-3 m breiter, unbefestigter Forstweg, welcher stellenweise von Sträuchern flankiert war.

4.2 Erhebungszeitraum und -methode

Die Datenerhebung wurde vom 13. Oktober 2011 bis 27. Dezember 2011 durchgeführt. An insgesamt 33 Abenden wurden zwischen 18:00 Uhr und 22:30 Uhr (MEZ) Kontrollgänge durch die Erhebungsgebiete unternommen. Sie wurden mäanderförmig abgegangen, wobei etwa 300 Bäume (gesamt in allen Erhebungsgebieten) mit Taschenlampe auf sitzende Frostspanner Männchen und wartende Weibchen kontrolliert wurden. Es wurden Datum, Uhrzeit am Beginn und am Ende des Kontrollgangs, Witterung, Lufttemperatur und Windverhältnisse, sowie die Anzahl der gesichteten Frostspanner protokolliert.

Zur exakten Bestimmung der Artzugehörigkeit wurden regelmäßig Individuen gefangen. In allen Fällen handelte es sich um Exemplare von *Operophtera brumata*, was mit Hilfe von Bestimmungsliteratur⁹ determiniert wurde.

An 20 Abenden wurde eine detaillierte Erhebung aller gesichteten Frostspanner Männchen und Weibchen durchgeführt. Männliche Individuen wurden nur berücksichtigt, wenn sie nicht kopulierten. Beim Auffinden eines Frostspanners am Baumstamm wurden Datum, Uhrzeit, Witterung und Lufttemperatur, sowie folgende Parameter notiert:

- Baumart
- Beschaffenheit der Rinde (Rindentypus, Struktur)
- Umfang des Baumstammes
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Exposition der am Baumstamm sitzenden Frostspanner nach Himmelsrichtung
- Höhe über dem Erdboden der am Baumstamm sitzenden Frostspanner
- Temperatur der Baumstammoberfläche
- Temperatur in der obersten Erdbodenschicht

Zur genauen Bestimmung der Uhrzeit zum Zeitpunkt des Auffindens eines Frostspanners, wurde eine handelsübliche Armbanduhr verwendet.

9 Chinery (1994); Rein & Zech (1975);
http://lepiforum.eu/cgi-bin/lepiwiki.pl?Operophtera_Brumata (22.12.2011, 22:35 Uhr MEZ);
http://lepiforum.eu/cgi-bin/lepiwiki.pl?Erannis_Defoliaria (22.12.2011, 22:37 Uhr MEZ);
http://lepiforum.eu/cgi-bin/lepiwiki.pl?Operophtera_Fagata (22.12.2011, 22:39 Uhr MEZ).

4.2.1 Baumart und Rindentypus

Die Baumart auf der ein Frostspanner gefunden wurde, konnte vor Ort durch Kenntnis bestimmt werden. Bei Unklarheiten wurde Bestimmungsliteratur¹⁰ verwendet. Buchenarten wurden nicht unterschieden, sondern allgemein als Buche verzeichnet.

Die Beschaffenheit der Rinde (Struktur) wurde in 3 Typen eingeteilt: glatt, aufgeraut, rau. Buchenarten mit glatter, ebener Rinde wurden als *glatt* eingestuft, ebenso Sträucher (Abb. 4.2a, 4.2b). Als *aufgeraut* wurden Buchenarten bestimmt, deren Rinde teilweise zerklüftet und uneben war (Abb. 4.2c). Baumarten mit grober, stark zerklüfteter Rinde, mit Strukturunterschieden bis über 1 cm, wurden als *rau* festgelegt (Abb. 4.2d, 4.2e) (Föhre, Fichte, Esche und Eiche).



ABBILDUNG 4.2 Rindenstrukturen untersuchter Baumarten. (a) Glatte Rinde einer Buche, (b) glatte Rinde eines Strauches, (c) aufgeraute Rinde einer Buche, (d) raue Rinde einer Föhre, (e) raue Rinde einer Esche. [Fotos: Christoph Grill]

Der Umfang jedes besetzten Baumstammes wurde mit einem flexiblen Schneidermaßband, etwa 5-10 cm unterhalb des sitzenden Frostspanners gemessen. War dies wegen Unzugänglichkeit nicht möglich, wurde an der höchst erreichbaren Stelle am Baumstamm gemessen (etwa 2,30 m).

4.2.2 Windgeschwindigkeit und -richtung

Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit wurde eine Skala verwendet, welche an die Beaufort-Skala angelehnt ist, aber niedrige Windgeschwindigkeiten (< 4 m/s) detaillierter berücksichtigt. Es wurden 5 Grade unterschieden (Tab. 4.1), deren genaue Windgeschwindigkeit mit einem Taschen-Windgeschwindigkeitsmessgerät (Huger) bestimmt wurde.

¹⁰ Chinery (1994).

TABELLE 4.1 Skala zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit ohne Messgerät. Angegeben sind die den Graden zugeteilten Windgeschwindigkeiten [m/s] und der für weitere Analysen festgelegte Referenzwert. (c Windgeschwindigkeit, c_{rvt} Referenzwert)

Grad	c [m/s]	c_{rvt} [m/s]
1	$\leq 0,4$	0,2
2	0,5-1	0,7
3	1-2	1,5
4	2-4	3
5	> 4	5

Die Windrichtung wurde in etwa 1-1,5 m Abstand zum Baumstamm an der zur Windrichtung exponierten Baumstammseite (Luvseite) bestimmt. Die Bestimmung erfolgte mittels eines dünnen, etwa 1 m langen Fadens, welcher lotrecht zum Erdboden in den Wind gehalten wurde. Die Auslenkung des Fadens nach Himmelsrichtung mit dem Wind, wurde mit einem digitalen Kompass (TCM) durch Aufsicht auf den Faden bestimmt.

4.2.3 Exposition und Höhenverteilung

Die Exposition nach Himmelsrichtung der am Baumstamm sitzenden Frostspanner wurde mittels eines digitalen Kompass (TCM) in 5° -Einheiten bestimmt. Der Kompass wurde normal zur Baumstammoberfläche, etwa 5 cm unterhalb des sitzenden Frostspanners angelegt.

Die Höhe der am Baumstamm sitzenden Frostspanner wurde mittels einer 2,50 m langen Messstange (5 cm Skala) ermittelt. Die Einheiten zwischen der 5 cm Skala wurden geschätzt. Es wurde die Distanz vom Erdboden bis zum Kopf des sitzenden Frostspanners gemessen. Die Höhenmessung von Individuen in höheren Positionen (über 2,50 m), erfolgte mittels eines markanten Fixpunktes am Baumstamm. Die Distanz zwischen Erdboden und Fixpunkt, sowie die Distanz zwischen Fixpunkt und Frostspanner wurden gemessen und addiert.

4.2.4 Temperaturen

Die Lufttemperatur, Stammtemperatur und Bodentemperatur wurden mit einem digitalen Thermometer (testo 110; Testo G.m.b.H.) mit Stabfühler gemessen. Bei Messung der Lufttemperatur zeigte die Spitze des Stabfühlers Richtung Erdboden, um eine Verfälschung der Temperaturwerte durch aufsteigende Wärme der Hand zu verhindern. Die Stammtemperatur wurde 2-3 cm ober-

halb des Kopfes des sitzenden Frostspanners gemessen. Zur Messung der Bodentemperatur wurde der Stabfühler des Thermometers 3-5 cm in den Erdboden gedrückt, mit ungefährem Abstand von 10-15 cm zum Baumstamm.

4.2.5 Zusätzliches Datenmaterial

Aufgrund von Berechnungen zur Grenzschichtdicke, wurden am 14. November 2012 gegen 19:00 Uhr (MEZ) Daten zur Antennenstellung von Frostspanner Männchen und der Abdomenstellung von Weibchen erhoben. Mittels Lineal wurde der Abstand zwischen Baumstammoberfläche und Antennenspitze bei sitzenden Männchen gemessen, sowie der Abstand des dorsal liegenden Abdomens zur Baumstammoberfläche bei Weibchen. Die Messungen wurden am westlichen Rand des Erhebungsgebiets C durchgeführt.

4.3 Datenanalyse

4.3.1 Ableitungen und Berechnungen

Aus der gemessenen Exposition der Frostspanner nach Himmelsrichtung und der gemessenen Windrichtung, wurde ihre relative Exposition am Baumstamm zur Windrichtung abgeleitet. Die Durchmesser erhobener Baumstämme wurden aus dem gemessenen Umfang errechnet.

Für strömungsmechanische Analysen wurden die fluiddynamischen Größen ρ , η und ν errechnet, wobei der Luftdruck mit 101,3 kPa angenommen wurde. Desweiteren wurden die strömungsmechanischen Größen Re , k , sowie δ_l für Baumarten mit glatter Rinde und δ_r für Baumarten mit aufgerauter und rauer Rinde berechnet.

Der zur Berechnung der Rauigkeit k notwendige Faktor h , wurde nach Abschluss der Datenerhebung durch Einzelmessungen ermittelt. An 5 sich im Durchmesser unterscheidenden Bäumen der selben Art, wurden sämtliche Unebenheiten in der Rindenstruktur ausgemessen. Die Messungen wurden an den in Frage kommenden Baumarten mit aufgerauter und rauer Rinde durchgeführt. Folgend wurde für jede Baumart mit aufgerauter oder rauer Rinde ein mittleres h im Bezug zum Stammdurchmesser errechnet (Tab. 4.2).

TABELLE 4.2 Mittleres h [cm] in der Rindenstruktur erhobener Baumarten mit aufgerauter und rauer Rinde an Stämmen mit $L \leq 30$ cm und $L > 30$ cm. (h Höhe der Oberflächenstruktur, L Stammdurchmesser)

Baumart	h [cm] bei $L \leq 30$ cm	h [cm] bei $L > 30$ cm
Buche (aufgeraut)	0,2	0,2
Eiche	0,5	0,5
Esche	0,27	0,38
Fichte	0,27	0,27
Föhre	0,72	1,02

4.3.2 Statistik

Zum Vergleich der Datenklassen (Vergleich innerhalb der Klassen und zwischen den Klassen, Vergleich der Geschlechter) werden Kontingenzverteilungen (χ^2 -Test) herangezogen. Die Signifikanzschranke wird mit $p \leq 0,05$ festgelegt. Bei Weibchen wird bis zu einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \leq 0,08$ von einem Trend ausgegangen.

Bei kreisverteilten Daten wird als Verteilungsparameter der Summenvektor verwendet (*Batschelet* 1981). Die Irrtumswahrscheinlichkeit ist mit $p \leq 0,05$ festgelegt. Bei auf Windrichtung bezogene Verteilungen, werden die Abweichungen von Positionen zu dieser verwendet.

Zum Vergleich kreisverteilter Datenmengen wird der Watson-Williams-Test (F-Test zum Vergleich kreisverteilter Daten) verwendet. Die Irrtumswahrscheinlichkeit ist mit $p \leq 0,05$ festgelegt.

Die Berechnung der Funktionsgleichung und des Regressionskoeffizienten zur Abnahme des Stammdurchmessers bei steigender Windgeschwindigkeit (Abb. 5.7), erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm „LibreOffice Calc“.

5 Ergebnisse

5.1 Analyse allgemeiner Parameter

5.1.1 Verteilung auf Baumarten

32 von 61 Frostspanner Männchen (52,46%) verteilen sich auf Buchen, wobei auf Buchen mit glatter Rinde 7-mal mehr Männchen sitzen, als auf Buchen mit aufgerauter Rinde (Tab. 5.1). Am zweit häufigsten besetzen sie Eschen (14,75%), gefolgt von Föhren (13,11%) und Sträuchern (13,11%). Eichen und Fichten (jeweils 3,28%) werden am wenigsten besetzt.

8 von 15 Frostspanner Weibchen (53,33%) sammeln sich auf Buchen (Tab. 5.1). Auf Buchen mit glatter Rinde treten 3-mal mehr Weibchen auf, als auf derselben Baumart mit aufgerauter Rinde. Föhren (20%) werden häufiger aufgesucht als Fichten (13,33%). Die geringste Anzahl Weibchen befindet sich auf Eschen (6,67%) und Sträucher (6,67%). Eichen werden nicht besetzt.

TABELLE 5.1 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\delta} = 61$) und Weibchen ($n_{\text{♀}} = 15$) auf Baumarten und Sträuchern. Verglichen sind Männchen und Weibchen auf den jeweiligen Baumarten ($df = 6$). Angegeben ist die Individuenzahl pro Baumart und der Rindentypus der jeweiligen Baumart, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau.

Baumart	Rinde	♂♂			♀♀			Σ	
		n_{δ}	e	χ^2	$n_{\text{♀}}$	e	χ^2	χ^2_{Σ}	p
Buche	glatt	28	27,289	0,019	6	6,711	0,075		
Buche	aufgeraut	4	4,816	0,138	2	1,184	0,562		
Eiche	rau	2	1,605	0,097	0	0,395	0,395		
Esche	rau	9	8,026	0,118	1	1,974	0,481		
Fichte	rau	2	3,211	0,457	2	0,789	1,859		
Föhre	rau	8	8,829	0,078	3	2,171	0,317		
Sträucher	glatt	8	7,224	0,083	1	1,776	0,339		
								5,018	> 0,5

Ein Vergleich von Frostspanner Männchen und Weibchen bezüglich ihrer Verteilung auf Baumarten, ergibt keine signifikanten Unterschiede (Tab. 5.1).

5.1.2 Verteilung auf Rindentypen im Bezug zum Stammdurchmesser

Im Stammdurchmesserbereich 0 cm bis 15 cm sitzen 8 Frostspanner Männchen (13,11%) ausschließlich auf glatter Rinde, wobei die Klassen 5-10 cm und 10-15 cm auf keinem Rindentypus besetzt werden (Abb. 5.1). Bei der Gehölzart der Durchmesserklasse 0-5 cm handelt es sich um Sträucher, deren maximaler Durchmesser 1,6 cm beträgt ($1 \leq L \leq 1,6$ cm). Auf Baumstämmen mit Durchmessern im Bereich 15 cm bis 40 cm ($16,2 \leq L \leq 39,8$ cm), treten 28 Männchen (45,9%) auf allen Rindentypen auf. Hierbei wird raue und aufgeraute Rinde (zusammengefasst) signifikant häufiger besetzt, als glatte Rinde (Tab. 5.2). In den Klassen des darauffolgenden Bereichs 40 cm bis 60 cm ($42 \leq L \leq 58,3$ cm), verteilen sich 12 Männchen auf glatter und 4 Männchen auf rauher und aufgerauter Rinde (26,23% aus n_{δ} in diesem Bereich). Ausschließlich glatte Rinde wird von 9 Individuen (14,76%) auf Baumstämmen besetzt, deren Durchmesser > 60 cm ($60,5 \leq L \leq 70$ cm) beträgt.

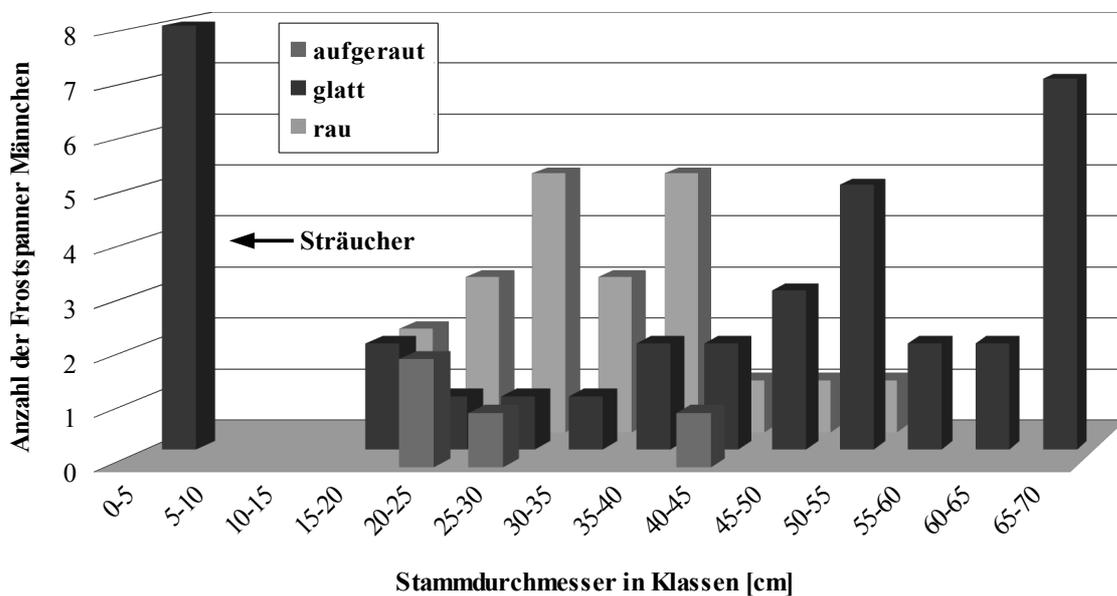


ABBILDUNG 5.1 Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\delta} = 61$) auf den Rindentypen glatt ($n = 36$), aufgeraut ($n = 4$) und rau ($n = 21$) im Bezug zum Stammdurchmesser [cm]. Der Stammdurchmesser ist in 5 cm-Klassen eingeteilt.

Die Verteilung der Frostspanner Männchen auf den Rindentypen glatt, sowie aufgeraut/rau (zusammengefasst) in den 4 eingeteilten Durchmesserklassen, unterscheidet sich signifikant (Tab. 5.2).

TABELLE 5.2 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\text{♂}} = 61$) auf Rindentypen im Bezug zum Stammdurchmesser. Verglichen ist glatte und aufgeraute/raue Rinde bezüglich des Stammdurchmessers ($df = 3$). Aufgeraute und raue Rinde sind zusammengefasst. Der Stammdurchmesser [cm] ist in 4 Klassen eingeteilt. Angegeben ist die Individuenzahl pro Durchmesserklasse, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau. (L Stammdurchmesser)

L -Klasse [cm]	glatte Rinde			raue Rinde			Σ	
	$n_{\text{♂}}$	e	χ^2	$n_{\text{♂}}$	e	χ^2	χ^2_{Σ}	p
0-15	8	4,721	2,277	0	3,279	3,279		
15-40	7	16,525	5,49	21	11,475	7,906		
40-60	12	9,443	0,692	4	6,557	0,997		
60-70	9	5,311	2,562	0	3,689	3,689		
							26,892	< 0,001

1 Frostspanner Weibchen (6,67%) besetzt einen Stamm mit Durchmesser < 20 cm nur in der Klasse 0-5 cm (Abb. 5.2). Es handelt sich hierbei um einen Strauch ($L = 0,9$ cm). Die dazwischen liegenden Klassen werden auf keinem Rindentypus besetzt. Im Durchmesserbereich 20 cm bis 45 cm ($22,6 \leq L \leq 42$ cm) sammeln sich 10 Weibchen (66,67%), wobei aufgeraute/raue Rinde häufiger bezogen wird als glatte Rinde (aufgeraut/rau:glatt = 6:4). Auf Baumstämmen deren Durchmesser zwischen 45 cm und 60 cm liegt, verteilen sich 3 Weibchen (20%) in der Klasse 50-55 cm ($50,3 \leq L \leq 54,1$ cm), bevorzugt auf glatter Rinde. 1 Individuum (6,67%) sitzt im Durchmesserbereich > 65 cm ($L = 66,8$ cm) auf aufgerauter Rinde.

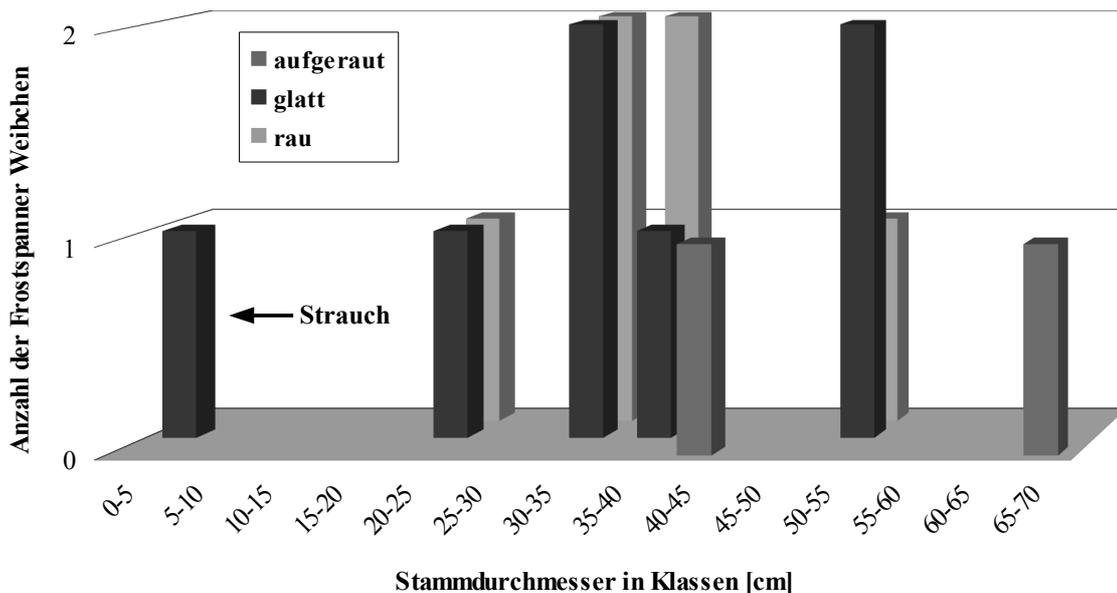


ABBILDUNG 5.2 Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_{\text{♀}} = 15$) auf den Rindentypen glatt ($n = 7$), aufgeraut ($n = 2$) und rau ($n = 6$) im Bezug zum Stammdurchmesser [cm]. Der Stammdurchmesser ist in 5 cm-Klassen eingeteilt.

Es liegen keine signifikanten Unterschiede in der Verteilung der Frostspanner Weibchen in den 4 eingeteilten Durchmesserklassen bezüglich der Rindentypen vor (Tab. 5.3).

TABELLE 5.3 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_{\text{♀}} = 15$) auf Rindentypen im Bezug zum Stammdurchmesser. Verglichen ist glatte und aufgeraute/raue Rinde bezüglich des Stammdurchmessers ($df = 3$). Aufgeraute und raue Rinde sind zusammengefasst. Der Stammdurchmesser [cm] ist in 4 Klassen eingeteilt. Angegeben ist die Individuenzahl pro Durchmesserklasse, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau. (L Stammdurchmesser)

L-Klasse [cm]	glatte Rinde			raue Rinde			Σ	
	$n_{\text{♀}}$	e	χ^2	$n_{\text{♀}}$	e	χ^2	χ^2_{Σ}	p
0-15	1	0,467	0,608	0	0,533	0,533		
15-40	4	4,2	0,01	5	4,8	0,008		
40-60	2	1,867	0,009	2	2,133	0,008		
60-70	0	0,467	0,467	1	0,533	0,409		
							2,052	> 0,5

Beim Vergleich der Verteilung von Frostspanner Männchen und Weibchen in den Durchmesserklassen (5 cm), ergibt sich kein signifikanter Unterschied ($df = 13$; $\chi^2 = 11,851$; $p > 0,5$). Desweiteren bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen beim Besetzen des Rindentypus aufgeraut/rau (zusammengefasst) in den 4 eingeteilten Durchmesserklassen ($df = 2$; $\chi^2 = 3,756$; $p > 0,1$), sowie beim Besetzen des Rindentypus glatt in den eingeteilten Durchmesserklassen ($df = 3$; $\chi^2 = 5,221$; $p > 0,1$).

In Tab. 5.4 sind für Männchen und Weibchen die Minima und Maxima des Stammdurchmessers für jeden Rindentypus zusammengefasst. Auf allen Rindentypen besetzten Männchen Baumstämme mit geringerem Durchmesser, als von Weibchen besetzt werden. Ebenso befinden sich Männchen auf Baumstämmen mit den Rindentypen glatt und rau in höheren Durchmesserbereichen, als Weibchen. Nur aufgeraute Rinde wird von Weibchen im höchsten für Weibchen gemessenen Durchmesserbereich bezogen.

Es liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen Frostspanner Männchen und Weibchen bei der Besetzung der 3 Rindentypen vor ($df = 2$; $\chi^2 = 1,13$; $p > 0,5$) (vgl. Tab. 5.4).

TABELLE 5.4 Minima und Maxima des Stammdurchmessers [cm] der von Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 53$) und Weibchen ($n_{\text{♀}} = 14$) besetzten Rindentypen. Angegeben ist die Individuenzahl pro Rindentypus. Sträucher sind in der Auswertung nicht berücksichtigt. (L Stammdurchmesser)

Rinde	♂♂			♀♀		
	n_{σ}	L -Min. [cm]	L -Max. [cm]	$n_{\text{♀}}$	L -Min. [cm]	L -Max. [cm]
glatt	28	18,5	70	6	22,6	54,1
aufgeraut	4	22	43,3	2	42	66,8
rau	21	16,2	52,6	6	24,8	50,9

5.1.3 Expositionsverteilung an Baumstämmen

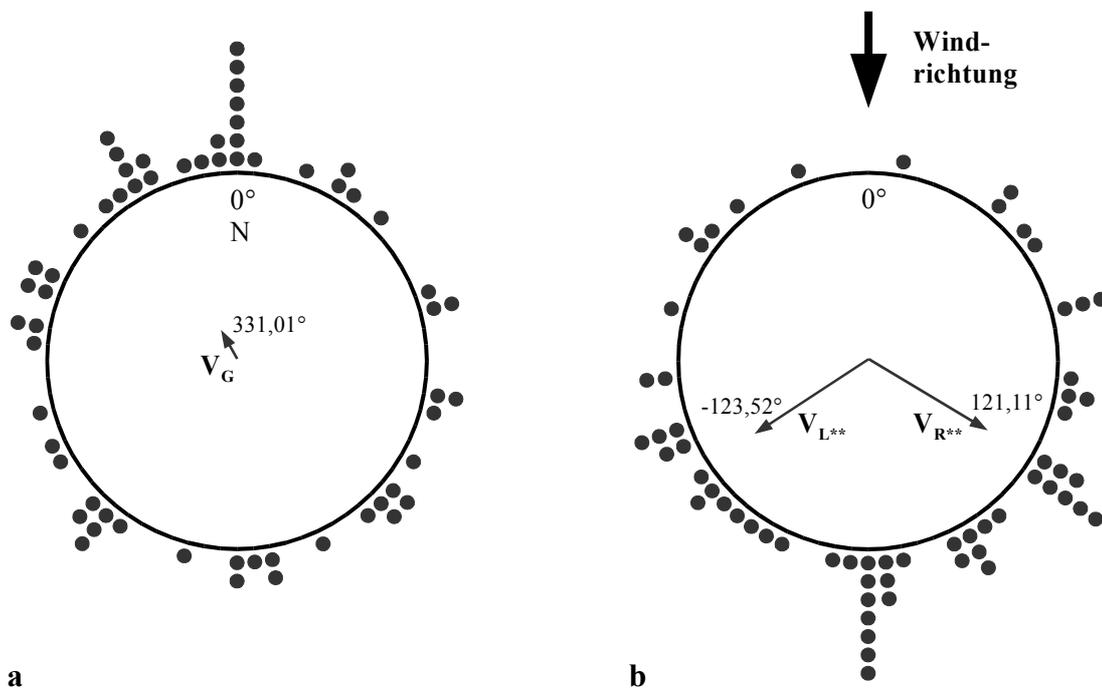


ABBILDUNG 5.3 Expositionsverteilung [°] der Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 61$) an Baumstämmen nach Himmelsrichtung und Windrichtung. (a) Exposition nach Himmelsrichtung wie beobachtet. 0° bezeichnet in diesem Fall die Nordrichtung. Eingezeichnet ist der Summenvektor der gesamten Kreisverteilung (0°-360°). (b) Abgeleitete Exposition relativ zur Windrichtung. Der Pfeil über dem Kreisdiagramm gibt die Windrichtung an. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilung (jeweils 0°-180°). Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.5 zusammengefasst. (V_G Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, V_L Summenvektor des linken Halbkreises, V_R Summenvektor des rechten Halbkreises, ** $p < 0,01$)

Beim Vergleich der gemessenen Expositionsverteilung der Frostspanner Männchen am Baumstamm (Abb. 5.3a) und ihrer relativen Anordnung nach Windrichtung (Abb. 5.3b), zeichnen sich deutliche Unterschiede im Verteilungsmuster ab. Während bei der Verteilungssituation der gemessenen Exposition kein Anordnungsschema erkennbar ist, verteilen sich in der nach Windrich-

tung abgeleiteten Situation 14 Männchen (22,95%) an der Luvseite und 47 Männchen (77,05%) an der Leeseite des Baumstammes. Die Expositionsverteilung der Männchen nach Windrichtung an der Luv- und Leeseite unterscheidet sich signifikant ($df = 1$; $\chi^2 = 17,563$; $p < 0,001$). Die Summenvektoren mit signifikanten Vektorlängen (vgl. Tab. 5.5), zeigen mit einem Unterschied von $2,41^\circ$ in das beginnende zweite Drittel (120° - 150°) der Leeseite (Abb. 5.3b).

TABELLE 5.5 Daten zur Männchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.3. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test für die abgeleitete Kreisverteilung relativ zur Windrichtung (Abb. 5.3b). Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der 180° -Positionen ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VG} Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VG} kritische Vektorlänge des Gesamtsummenvektors, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, ** $p < 0,01$)

Abb. 5.3	$\alpha_{VG} [^\circ]$	a_{VG}	$\alpha_{VL} [^\circ]$	a_{VL}	$\alpha_{VR} [^\circ]$	a_{VR}	df_1 / df_2	$F_{L/R}$
(a) beobachtet	331,01	0,175	-	-	-	-	-	-
(b) relativ zu Wind	-	-	-123,52	0,723**	121,11	0,734**	1 / 59	0,07 _(5:2)

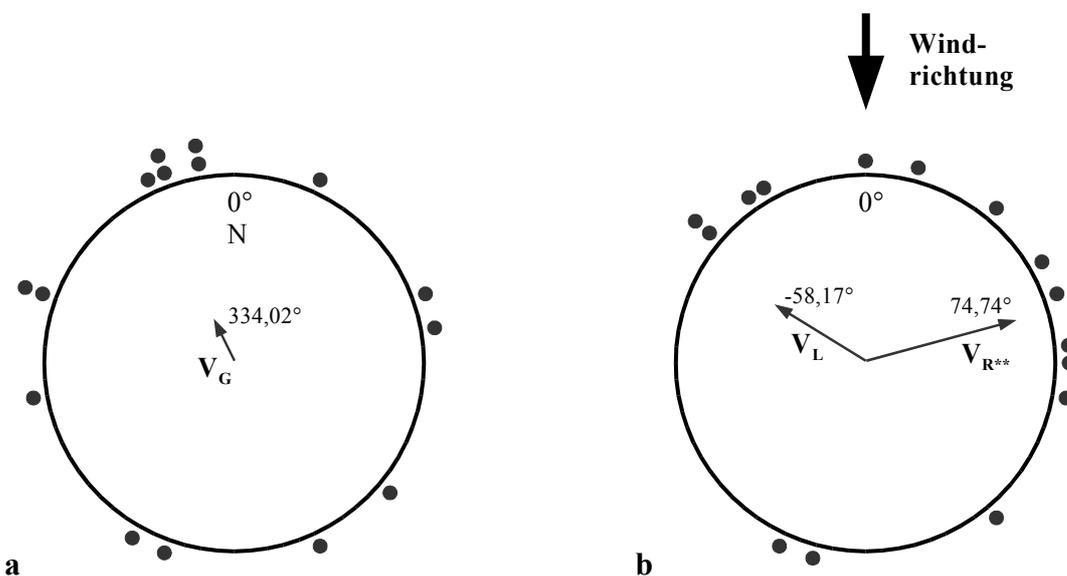


ABBILDUNG 5.4 Expositionsverteilung $[^\circ]$ der Frostspanner Weibchen ($n_{\text{♀}} = 15$) an Baumstämmen nach Himmelsrichtung und Windrichtung. (a) Exposition nach Himmelsrichtung wie beobachtet. 0° bezeichnet in diesem Fall die Nordrichtung. Eingezeichnet ist der Summenvektor der gesamten Kreisverteilung (0° - 360°). (b) Abgeleitete Exposition relativ zur Windrichtung. Der Pfeil über dem Kreisdiagramm gibt die Windrichtung an. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilung (jeweils 0° - 180°). Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.6 zusammengefasst. (V_G Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, V_L Summenvektor des linken Halbkreises, V_R Summenvektor des rechten Halbkreises, ** $p < 0,01$)

Die Expositionsverteilung der Frostspanner Weibchen am Baumstamm nach gemessener Exposition (Abb. 5.4a) und die abgeleitete Anordnung nach Windrichtung (Abb. 5.4b) unterscheiden sich deutlich voneinander. Die Verteilungssituation nach gemessener Exposition, weist kein erkennbares Anordnungsmuster auf. Hingegen geht aus der abgeleiteten Verteilungssituation hervor, dass Weibchen mit 11 Individuen (73,33%) bevorzugt die Luvseite des Baumstammes besetzen ($df = 1$; $\chi^2 = 3,233$; $p \approx 0,073$). 4 Weibchen (26,67%) ordnen sich an der Leeseite des Baumstammes an. Die Summenvektoren zeigen mit einer Abweichung von $16,57^\circ$ voneinander, in das endende zweite Drittel (V_L) (30° - 60°) und in die Mitte des dritten Drittels (V_R) (60° - 90°) der Luvseite (Abb. 5.4b).

TABELLE 5.6 Daten zur Weibchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.4. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test für die abgeleitete Kreisverteilung relativ zur Windrichtung (Abb. 5.4b). Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Strauch durchgeführt. Die Aufteilung der 0° -Position ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VG} Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VG} kritische Vektorlänge des Gesamtsummenvektors, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

Abb. 5.4	$\alpha_{VG} [^\circ]$	a_{VG}	$\alpha_{VL} [^\circ]$	a_{VL}	$\alpha_{VR} [^\circ]$	a_{VR}	df_1 / df_2	$F_{L/R}$
(a) beobachtet	334,02	0,247	-	-	-	-	-	-
(b) relativ zu Wind	-	-	-58,17	0,567	74,74	0,82**	1 / 13	6,53* _(1:0)

Ein Vergleich von Frostspanner Männchen und Weibchen bezüglich der Besetzung der Luv- und Leeseite, ergibt signifikante Unterschiede ($df = 1$; $\chi^2 = 13,847$; $p < 0,001$). Desweiteren liegen signifikante Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen in der Expositionsverteilung an Baumstämmen gesamt, sowie an der linken und rechten Stammseite vor (Tab. 5.7).

TABELLE 5.7 F-Test zur Expositionsverteilung von Frostspanner Männchen ($n_\sigma = 61$) und Weibchen ($n_\varphi = 15$) an Baumstämmen gesamt (0° - 360°), sowie an der linken und rechten Stammseite (jeweils 0° - 180°). Die Aufteilung der $0^\circ/180^\circ$ -Positionen ist als Index ($\sigma:\varphi$) beim F-Wert angegeben. (σ_G Anordnung der Männchen am gesamten Baumstamm, σ_L Anordnung der Männchen an der linken Baumstammseite, σ_R Anordnung der Männchen an der rechten Baumstammseite, φ_G Anordnung der Weibchen am gesamten Baumstamm, φ_L Anordnung der Weibchen an der linken Baumstammseite, φ_R Anordnung der Weibchen an der rechten Baumstammseite, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

F-Test	df_1 / df_2	F
$\sigma_G : \varphi_G$	1 / 74	12,28**
$\sigma_L : \varphi_L$	1 / 33	6,18* _(5:1)
$\sigma_R : \varphi_R$	1 / 39	6,26* _(2:0)

5.1.4 Höhenverteilung an Baumstämmen

Frostspanner Männchen sammeln sich am häufigsten in Höhen zwischen 60 cm und 220 cm am Baumstamm (Abb. 5.5). 48 Individuen (90,47%) (ohne Sträucher) verteilen sich in diesem Bereich. 2 Männchen (3,87%) beziehen Positionen unterhalb dieses Bereichs, wobei erst ab einer Höhe von 30 cm besetzt wird. Die übrigen 3 Männchen (5,66%) befinden sich höher als 220 cm. Die maximale Höhenverteilung reicht bis 241 cm. Die Verteilung der Männchen in den 12 besetzten Höhenklassen unterscheidet sich signifikant ($df = 11$; $\chi^2 = 21,487$; $p < 0,03$).

Auf Sträuchern sitzende Frostspanner Männchen ($n = 8$), verteilen sich auf mittlerer Höhe (40-60 cm) der Sträucher, wobei diese eine maximale Höhe von etwa 1 m haben.

Bei Frostspanner Weibchen tritt die höchste Verteilungsdichte in Höhen zwischen 100 cm und 220 cm auf (Abb. 5.5). 9 Weibchen (64,29%) besetzten diesen Bereich. Unterhalb davon befinden sich 4 Individuen (28,57%). Die minimale Besetzungshöhe beträgt 30 cm. 1 Weibchen (7,14%) besetzt mit deutlichem Abstand zur höchsten Verteilungsdichte, eine maximale Höhe von 300 cm. Es liegen keine signifikanten Unterschiede in der Besetzung der 9 Höhenklassen vor ($df = 8$; $\chi^2 = 4,001$; $p > 0,5$).

1 Frostspanner Weibchen bezieht eine Höhe von 83 cm auf einem Strauch, wobei der Strauch eine Höhe von etwa 1 m hat.

Ein Vergleich von Frostspanner Männchen und Weibchen bezüglich ihrer Höhenverteilung an Baumstämmen, ergibt keinen signifikanten Unterschied ($df = 5$; $\chi^2 = 1,089$; $p > 0,95$).

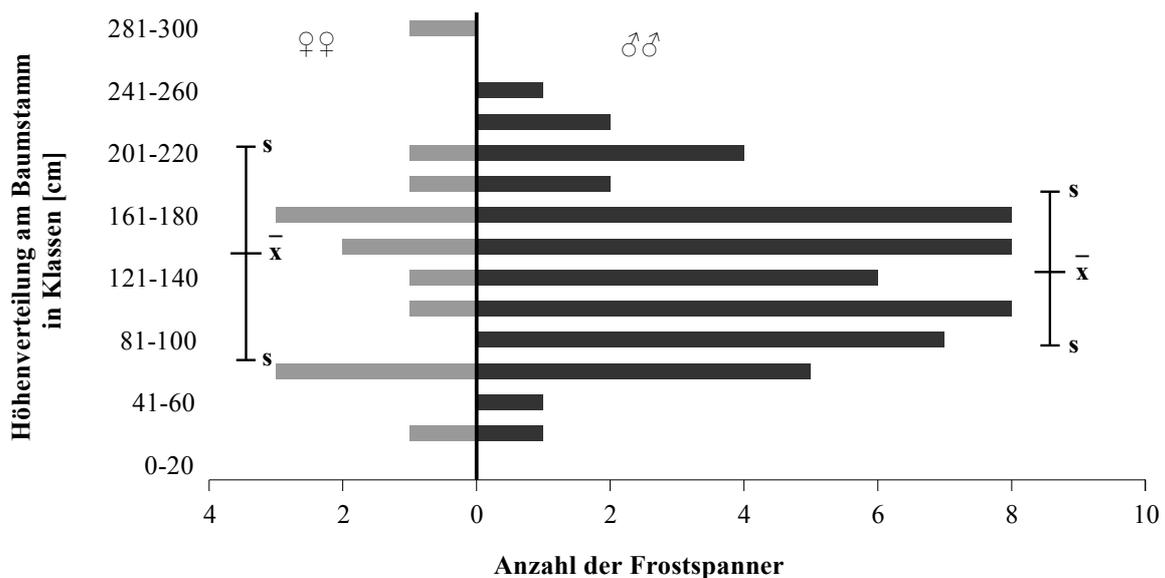


ABBILDUNG 5.5 Höhenverteilung [cm] der Frostspanner Männchen ($n_{\delta} = 53$) und Weibchen ($n_{\text{♀}} = 14$) an Baumstämmen. Für beide Geschlechter ist die mittlere Höhe mit Standardabweichung eingezeichnet ($\text{♂ } \bar{x} = 134,9 \text{ cm}$, $s = 50,3$; $\text{♀ } \bar{x} = 143,6 \text{ cm}$, $s = 68,9$). Die Höhenverteilung ist in 20 cm-Klassen eingeteilt. Auf Sträuchern sitzende Frostspanner sind in der Auswertung nicht berücksichtigt.

5.1.5 Temperaturen

Der Unterschied des höchsten und niedrigsten gemessenen Temperaturwertes, ist bei Luft mit 8,6 °C und der Baumstammoberfläche mit 8,1 °C wenig unterschiedlich (Tab. 5.8). Die Bodentemperatur zeigt Schwankungen von 4,3 °C.

TABELLE 5.8 Minimum und Maximum der Luft-, Stamm- und Bodentemperatur [°C] aus den Messungen beim Auffinden eines Frostspanners (n = 76).

Medium	Temperatur [°C]	
	Min	Max
Luft	-1,1	7,5
Baumstamm	-0,8	7,3
Erdboden	1,3	5,6

5.1.6 Antennen- und Abdomenstellung

Die Antennen der in den Dämmerungs- und Abendstunden an Baumstämmen wartenden Frostspanner Männchen, sind mehr oder weniger gerade vom Kopf abgespreizt und liegen nicht am Körper an (Abb. 5.6a). Die Antennenspitze wird, abhängig von der Größe des Frostspanners, mit einem mittleren Abstand von 10,18 mm (s = 0,17) (n = 17) zum Baumstamm, geringfügig oberhalb des Kopfes positioniert. Das Männchen verharrt mit dem Kopf nach oben am Baumstamm, wobei die Flügel über dem Körper zusammengeklappt sind.

Frostspanner Weibchen sitzen in leicht aufgerichteter Haltung mit dem Kopf nach oben weisend an Baumstämmen, wodurch ein minimaler Abstand zwischen Abdomenende und Baumstamm entsteht (Abb. 5.6b). Abhängig von der Größe des Weibchens, beträgt der mittlere Abstand vom Baumstamm zum dorsal liegenden Abdomen 4,8 mm (s = 0,04) (n = 5).

Zur Analyse der Grenzschichtdicke in Abschnitt 5.2.4, wird für die minimal notwendige Grenzschichtdicke ein kritischer Wert von 10 mm bei Frostspanner Männchen und von 5 mm bei Frostspanner Weibchen angenommen.

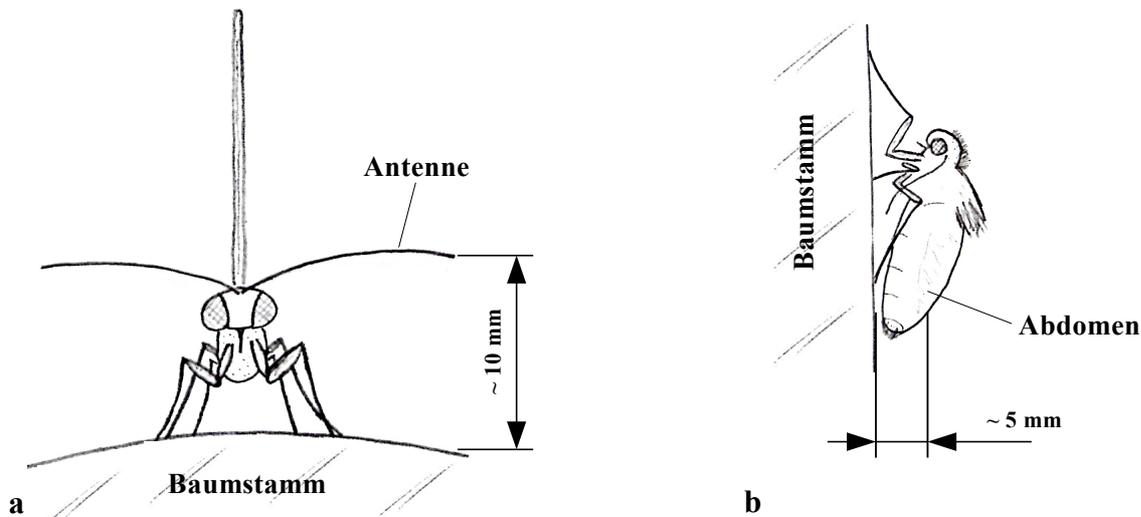


ABBILDUNG 5.6 Schematische Darstellung der am Baumstamm sitzenden Frostspanner. **(a)** Wartendes Männchen mit über dem Körper zusammengeklappten Flügeln. Perspektive von oben. Eingezeichnet ist der ungefähre mittlere Abstand [mm] zwischen Antennenspitze und Baumstamm. **(b)** Sitzendes Weibchen mit leicht aufgerichtetem Thorax. Perspektive von seitlich. Eingezeichnet ist der ungefähre mittlere Abstand [mm] zwischen dorsal gelegenen Abdomen und Baumstamm.

5.2 Analyse der Strömungssituation

5.2.1 Verteilung im Re -Bereich

Die Berechnung der Reynolds-Zahl Re für jeden Baumstamm auf dem Frostspanner sitzen, ergibt Re -Werte $< 1,85 \cdot 10^5$ (Tab. 5.9). Unter Berücksichtigung aller erhobenen Stammdurchmesser und Windgeschwindigkeiten, errechnet sich ein für Frostspanner nutzbares Re -Angebot im Bereich $\sim 80 \leq Re \leq \sim 2,58 \cdot 10^5$ (bei $\rho = 1,27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\nu = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; vgl. Abschnitt 3.1.3).

59 Männchen (96,72%) verteilen sich auf Baumstämmen, auf deren Oberfläche bei vorherrschender Windgeschwindigkeit und gegebenem Durchmesser ein Re -Bereich von $10^3 < Re < 10^5$ vorliegt, wobei der Bereich $10^4 < Re \leq 3 \cdot 10^4$ durch 28 Individuen (45,9% aus n) am häufigsten bezogen wird (Tab. 5.9). Die Klasse $4 \cdot 10^4 < Re \leq 5 \cdot 10^4$ wird im Bereich $10^4 < Re < 10^5$, mit einer Differenz von $0,57 \cdot 10^4$ zum Maximum der vorherigen Klasse, durch 1 Individuum (1,64%) am seltensten besetzt. Der Re -Bereich $4,3 \cdot 10^4 \leq Re \leq 1,4 \cdot 10^5$ (Differenz von $9,7 \cdot 10^4$) wird von Männchen nicht genutzt. Desweiteren werden Baumstämmen, die bei vorherrschender Windgeschwindigkeit eine Umströmung mit $Re > 1,65 \cdot 10^5$ erreichen, nicht besetzt (maximal mögliches $Re \approx 2,58 \cdot 10^5$). Ein Vergleich der besetzten Re -Klassen innerhalb der Männchen ergibt signifikante Unterschiede ($df = 6$; $\chi^2 = 35,687$; $p < 0,001$).

Auf Sträuchern sitzende Frostspanner Männchen ($n = 8$) befinden sich im Bereich $1,31 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3,65 \cdot 10^3$.

TABELLE 5.9 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 61$) und Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) im *Re*-Bereich. Verglichen sind Männchen und Weibchen in den *Re*-Klassen ($df = 6$). Angegeben ist die Individuenzahl pro *Re*-Klasse, das maximale *Re* der besetzten Klasse, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau. Die Anzahl der auf Sträuchern sitzenden Frostspanner (welche bereits im angegebenen n_{σ}/n_{φ} der Klasse enthalten ist), ist bei n_{σ}/n_{φ} als Index angegeben. (*Re* Reynolds-Zahl)

Re-Bereich	♂♂				♀♀				Σ	
	n_{σ}	e	χ^2	Max.	n_{φ}	e	χ^2	Max.	χ^2_{Σ}	p
$\leq 10^3$	0	0,803	0,803	-	1 ₍₁₎	0,197	3,273	$1,36 \cdot 10^2$		
$10^3 - 10^4$	23 ₍₈₎	26,487	0,459	$9,97 \cdot 10^3$	10	6,513	1,867	$9,88 \cdot 10^3$		
$10^4 - 2 \cdot 10^4$	16	14,447	0,167	$1,94 \cdot 10^4$	2	3,553	0,679	$1,78 \cdot 10^4$		
$2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$	12	10,434	0,235	$2,96 \cdot 10^4$	1	2,566	0,956	$2,47 \cdot 10^4$		
$3 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4$	7	5,618	0,34	$3,66 \cdot 10^4$	0	1,382	1,382	-		
$4 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^4$	1	0,803	0,048	$4,23 \cdot 10^4$	0	0,197	0,197	-		
$> 10^5$	2	2,408	0,069	$1,64 \cdot 10^5$	1	0,592	0,281	$1,83 \cdot 10^5$		
									10,756	~0,08

Abb. A im Anhang A zeigt die Verteilung der Frostspanner Männchen im *Re*-Bereich im Bezug zur Windgeschwindigkeit und zum Stammdurchmesser. Daraus erkennbar sind Überlappungen des *Re*-Bereichs bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. Während bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten eine geringe Überlappung von $Re = 4,31 \cdot 10^2$ ($1,01 \cdot 10^4$ bei 0,5-1 m/s bis $1,05 \cdot 10^4$ bei $\leq 0,4$ m/s) vorliegt, kommt es bei höheren Windgeschwindigkeiten zu einer deutlich breiteren Überlappung von $Re = 1,88 \cdot 10^4$ ($1,77 \cdot 10^4$ bei 1-2 m/s bis $3,66 \cdot 10^4$ bei 0,5-1 m/s).

13 Weibchen (86,67%) beziehen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit Baumstämme, deren Umströmung im Bereich $10^3 < Re < 10^5$ liegt (Tab. 5.9). Hierbei wird die Klasse $10^3 < Re \leq 10^4$ durch 10 Weibchen (66,67% aus n) am häufigsten besetzt. Die Klasse $2 \cdot 10^4 < Re \leq 3 \cdot 10^4$ wird im Bereich $10^4 < Re < 10^5$, mit einer Differenz von $0,69 \cdot 10^4$ zum Maximum der vorherigen Klasse, durch 1 Individuum (6,67%) am seltensten bezogen. Für die höchste gemessene *Re*-Klasse ($> 10^5$), ergibt sich eine Differenz von $1,58 \cdot 10^5$ zum Maximum der vorhergehenden besetzten Klasse. Dieser Abschnitt wird von Frostspanner Weibchen nicht besetzt. Das Maximum der *Re*-Verteilung liegt mit $1,83 \cdot 10^5$ deutlich unterhalb des erreichbaren Maximums ($Re \approx 2,58 \cdot 10^5$). Die besetzten *Re*-Klassen unterscheiden sich signifikant ($df = 5$; $\chi^2 = 20,665$; $p < 0,001$).

Unter Zusammenfassung des Bereichs $10^4 < Re < 10^5$ zu einer Klasse, unterscheidet sich die Verteilung der Frostspanner Männchen und Weibchen in den Re -Bereichen signifikant ($df = 3$; $\chi^2 = 10,323$; $p < 0,02$) (vgl. Tab. 5.9).

5.2.2 Anpassung an Re -Bereich

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt der Stammdurchmesser der Baumstämme, auf denen sich Frostspanner Männchen verteilen, logarithmisch ab ($n = 61$; $r = 0,639$; $p < 0,001$) (Abb. 5.7):

$$y = -0,589 \cdot \ln(x) + 2,92$$

Vor allem ab Windgeschwindigkeiten > 1 m/s werden Stammdurchmesserbereiche > 40 cm weniger besetzt, als Stämme mit Durchmessern < 40 cm (13:2) ($df = 1$; $\chi^2 = 8,067$; $p < 0,005$). Desweiteren ergibt ein Vergleich der Durchmesserklassen (0-15 cm, 15-40 cm, 40-60 cm, 60-70 cm) bezüglich der Windgeschwindigkeiten, signifikante Unterschiede ($df = 9$; $\chi^2 = 42,877$; $p < 0,001$).

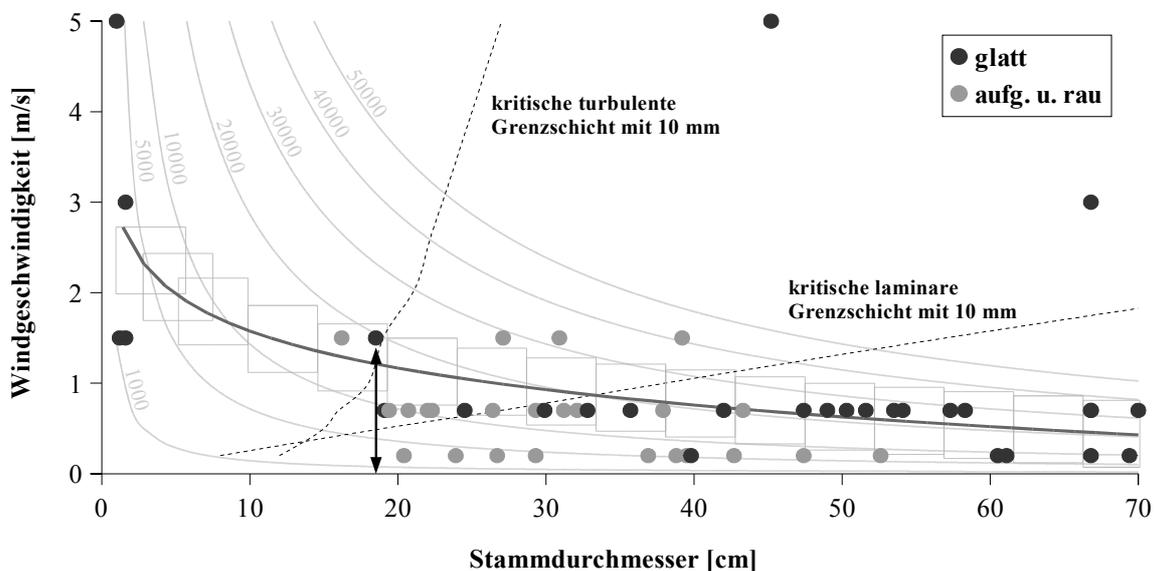


ABBILDUNG 5.7 Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\text{♂}} = 61$) auf Stammdurchmessern [cm] in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [m/s]. Individuen auf glatter und rauer Rinde sind durch Graustufen kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauer Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Re -Bereiche von 10^3 bis $5 \cdot 10^4$ (blassgraue Linien), sowie die logarithmische Funktionslinie (dunkelgraue Linie), über welche Quadrate zur Analyse des Re -Bereichs gelegt sind. Diese berücksichtigen eine Variation der Windgeschwindigkeit von 0,8 m/s (Höhe der Quadrate). Der Verlauf der laminaren Grenzschicht mit einer Dicke von 10 mm (Ablösung bei 90°), sowie der Verlauf der turbulenten Grenzschicht mit einer Dicke von 10 mm (angenommene Ablösung bei 120°) (gestrichelte Linien) bei entsprechendem Stammdurchmesser und vorherrschender Windgeschwindigkeit, ist markiert (es handelt sich um Näherungen). Der doppelseitige Pfeil zwischen den Stammdurchmessern 15 cm und 20 cm, veranschaulicht die Möglichkeit, abhängig von der Exposition am Baumstamm, in eine Grenzschichtdicke < 10 mm zu fallen, falls die Windgeschwindigkeit zunimmt. Bezüglich Grenzschichtdicke, vgl. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4.

Die Auswertung des Re -Bereichs entlang der Funktionslinie mithilfe der eingezeichneten Quadrate (Abb. 5.7), ergibt einen optimalen Re -Bereich von $1,44 \cdot 10^3$ bis $4,28 \cdot 10^4$, in welchen 58 (95,08%) von 61 Frostspanner Männchen fallen (vgl. Abb. 5.9).

Bei Frostspanner Weibchen gibt es keine erkennbare Verteilung an Baumstämmen mit bestimmtem Stammdurchmesser im Bezug zur Windsituation (Abb. 5.8). Ein Vergleich der besetzten Durchmesserklassen (0-15 cm, 15-40 cm, 40-60 cm, 60-70 cm) bezüglich der Windgeschwindigkeiten, ergibt keine signifikanten Unterschiede ($df = 9$; $\chi^2 = 4,997$; $p > 0,8$).

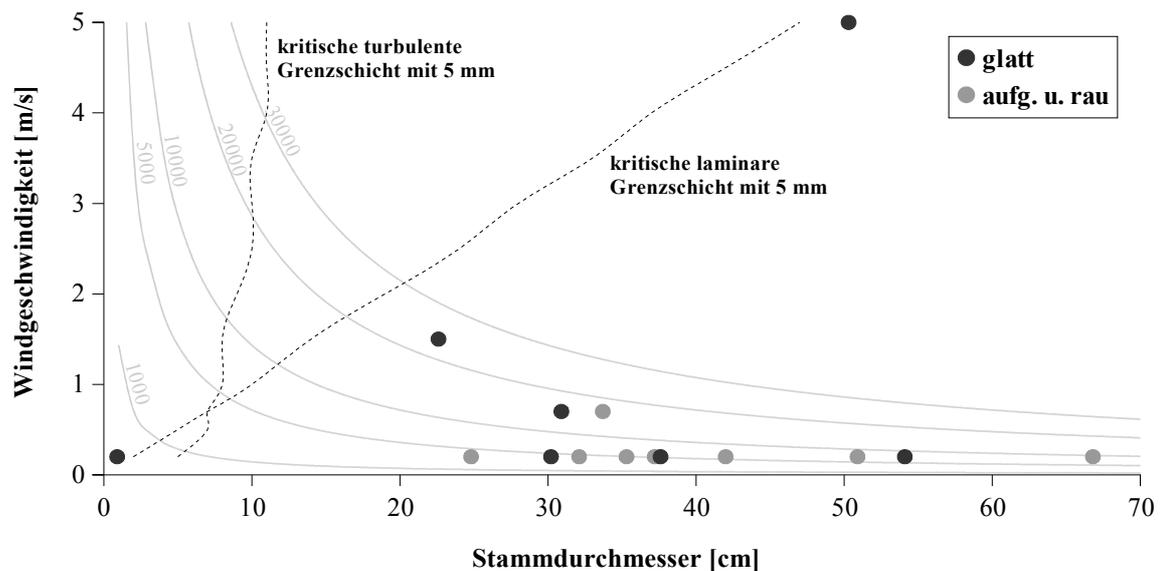


ABBILDUNG 5.8 Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_{\text{♀}} = 15$) auf Stammdurchmessern [cm] in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [m/s]. Individuen auf glatter und rauer Rinde sind durch Graustufen kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauer Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Re -Bereiche von 10^3 bis $3 \cdot 10^4$ (blassgraue Linien). Der Verlauf der laminaren Grenzschicht mit einer Dicke von 5 mm (Ablösung bei 90°), sowie der Verlauf der turbulenten Grenzschicht mit einer Dicke von 5 mm (angenommene Ablösung bei 120°) (gestrichelte Linien) bei entsprechendem Stammdurchmesser und vorherrschender Windgeschwindigkeit, ist markiert (es handelt sich um Näherungen). Bezüglich Grenzschichtdicke, vgl. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4.

5.2.3 Wirkung der Rauigkeit auf Grenzschichtdicke und -ablösung

In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass bei Baumstämmen mit aufgerauter und rauer Rinde, aufgrund ihrer unregelmäßig zerklüfteten und kantigen Struktur und aufgrund eines böigen Windes, eine teilweise oder vollständig turbulente Grenzschicht entsteht (Tab. 5.10). Die turbulente Grenzschicht ist wesentlich dicker, als die laminare (vgl. Abschnitt 3.2.2).

In Tab. 5.10 ist die errechnete mittlere Rauigkeit \bar{k} (vgl. Abschnitt 3.2.4) bei vorherrschender Windgeschwindigkeit, für Baumstämme auf denen Frostspanner Männchen oder Weibchen sitzen, sowie die daraus angenommene Strömungsform, angegeben.

TABELLE 5.10 Mittlere errechnete Rauigkeit für Baumstämme mit aufgerauter/rauer Rinde in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [m/s]. Angegeben ist die Individuenzahl pro c -Klasse, sowie die Minima und Maxima von k bei jeweiliger Windgeschwindigkeit und die entstehenden Strömungsverhältnisse an der Luv- und Leeseite der Baumstämme. (c Windgeschwindigkeit, k Oberflächenrauigkeitsparameter)

c [m/s]	♂♂				♀♀				Strömungsform
	n_{δ}	\bar{k}	Min.	Max.	n_{δ}	\bar{k}	Min.	Max.	
$\leq 0,4$	11	82,4	29,9	154,5	7	71,3	29,6	153,4	Laminare Grenzschicht an der Luvseite mit Umschlag in turbulent bei $\sim 80^\circ$
0,5-1	10	183	105,3	381,8	1	540,9	-	-	Beginnend turbulente Grenzschicht an der Luvseite mit Umschlag in vollständig turbulent bei $\sim 80^\circ$ oder davor
1-2	4	685,1	295,6	1116,8	-	-	-	-	Turbulente Grenzschicht an der Luv- und Leeseite

Gesamt sitzen 43 Frostspanner (56,58%) (Männchen und Weibchen) auf Baumstämmen mit glatter Rinde. Da bei diesen Baumstämmen eine Umströmung im unterkritischen Bereich vorliegt (vgl. Abschnitt 5.2.1), handelt es sich um eine laminare Grenzschicht, mit Ablösung im Bereich $80^\circ < \varphi_A < 90^\circ$. Für Baumstämme mit aufgerauter und rauer Rinde, auf denen sich 33 Individuen (43,42%) (Männchen und Weibchen) befinden, kann die Umströmung als kritisch angesehen werden. Der Ablösewinkel φ_A liegt aufgrund einer turbulenten Grenzschicht im Extremfall bei $\sim 140^\circ$ oder davor, wobei zwischen $\sim 80^\circ$ und $\sim 140^\circ$ eine vollständig turbulente Grenzschicht auftritt.

5.2.4 Einfluss der Grenzschichtdicke beim Besetzen von Baumstämmen

Mit zunehmendem Durchmesser der Baumstämme nimmt die Dicke der laminaren δ_l und turbulenten Grenzschicht δ_t bei konstanter Windgeschwindigkeit stetig zu (Abb. 5.9 und Abb. 5.10). Hingegen nimmt die Dicke beider Grenzschichtarten bei steigenden Windgeschwindigkeiten und konstantem Stammdurchmesser ab. Mit zunehmendem Strömungsweg werden die Grenzschichten dicker. Positionen an der Luvseite, weisen eine deutlich geringere Grenzschichtdicke auf, als Positionen an der Leeseite (vgl. Abb. 5.9).

Ab Windgeschwindigkeiten $\geq 0,5$ m/s werden, abhängig von der eingenommenen Position am Baumstamm, δ_l erreicht, die ≤ 10 mm (angenommene kritische Grenzschichtdicke für Männchen) betragen, sowie $\delta_t \leq 5$ mm (angenommene kritische Grenzschichtdicke für Weibchen) bei Wind-

geschwindigkeiten > 2 m/s (vgl. Tab. A und Tab. B im Anhang A). Als kritische Grenzschichtdicke für Männchen, wird der ungefähre Abstand zwischen Baumstammoberfläche und Antennenspitze angenommen, während das Männchen in wartender Position am Baumstamm verharrt. Für Weibchen in wartender Position, dient der ungefähre Abstand des dorsalen Abdomen zur Baumstammoberfläche als Wert der kritischen Grenzschichtdicke, da die Pheromondrüsen zwischen dem 8. und 9. Abdominalsegment lokalisiert sind.

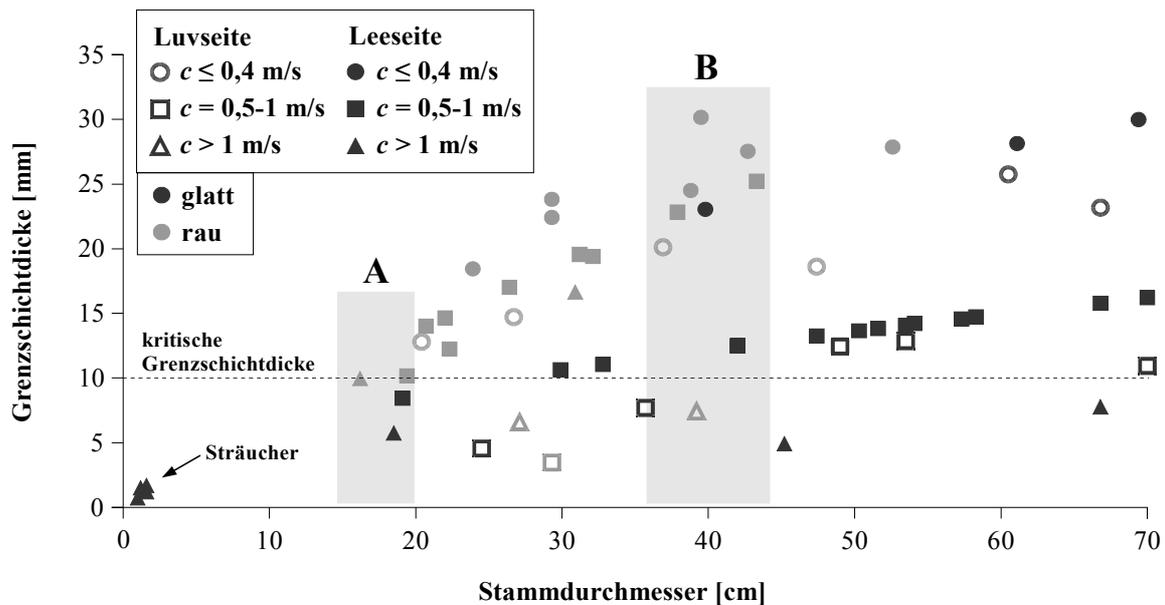


ABBILDUNG 5.9 Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 61$) in entstehenden Grenzschichtdicken und in Abhängigkeit des Stammdurchmessers [cm] und der Windgeschwindigkeit [m/s]. An der Luv- und Leeseite sitzenden Männchen, sowie Windgeschwindigkeiten sind durch unterschiedliche Symbole kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauere Rinde sind zusammengefasst. Aufgetragen ist die errechnete laminare Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit glatter Rinde, sowie für in Frage kommende Baumstämme mit rauere Rinde (Luvseite) (vgl. Tab. 5.10) und die errechnete turbulente Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit rauere Rinde. Für Männchen, die sich an der Leeseite (nach φ_A) glatter Baumstämme befinden, wurde mit einem Strömungsweg der laminaren Grenzschicht bis 90° gerechnet, da die Grenzschicht dort ablöst und Verwirbelungen an der Leeseite entstehen. Bei Individuen auf Baumstämmen mit rauere Rinde an der Leeseite nach φ_A ($\sim 140^\circ$), wurde mit einer turbulenten Grenzschicht mit Ablösung bei 140° gerechnet. Der tatsächliche Strömungsweg (von 0° bis zur Exposition) wurde zur Berechnung für Individuen vor den jeweiligen Ablöswinkeln herangezogen. Eingezeichnet ist die kritische Grenzschichtdicke (10 mm, gestrichelte horizontale Linie) und die Übergangsbereiche (graue Flächen), in welchen die jeweilige Grenzschichtart bei gemittelter Windgeschwindigkeit eine Dicke von 10 mm erreicht; im Bereich A die turbulente Grenzschicht bei $L \approx 15-20$ cm und im Bereich B die laminare Grenzschicht bei $L \approx 35-45$ cm. Vgl. auch Abb. 5.7. (A Übergangsbereich, in welchem die turbulente Grenzschicht dicker als 10 mm wird, B Übergangsbereich, in welchem die laminare Grenzschicht dicker als 10 mm wird)

9 Männchen (18,87%) (ohne Sträucher) nehmen Positionen an Baumstämmen ein, an denen abhängig vom Stammdurchmesser und der Windgeschwindigkeit, eine Grenzschichtdicke < 10 mm entsteht (Abb. 5.9). 1 Individuum befindet sich mit 9,96 mm an der kritischen Grenze und wird in den Bereich > 10 mm miteinbezogen. Demnach befinden sich 44 Männchen (83,02%) in einer Grenzschichtdicke > 10 mm. Es sitzen signifikant mehr Männchen auf Baumstämmen mit einer

Grenzschichtdicke > 10 mm, als auf Baumstämmen mit Grenzschichtdicken < 10 mm ($df = 1$; $\chi^2 = 23,113$; $p < 0,001$).

Bei Betrachtung der Individuen unterhalb der kritischen Grenzschichtdicke in Abb. 5.9, ist erkennbar, dass sich diese entweder an der Luvseite des Baumstammes, oder auf glatter Rinde befinden. Desweiteren ist erkennbar, dass Individuen bei Windgeschwindigkeiten von 0,5-2 m/s an der Leeseite von Baumstämmen mit rauer Rinde, aufgrund der entstehenden dickeren turbulenten Grenzschicht, in den Bereich einer Grenzschichtdicke > 10 mm fallen.

Auf Sträuchern sitzende Frostspanner Männchen ($n = 8$) (13,11% aus n_{δ}) erreichen eine $\delta_l < 1,7$ mm.

Aus Abb. 5.7 und Abb. 5.9 ist erkennbar, dass sich Individuen, die auf Stammdurchmessern < 18 cm sitzen, bei höheren Windgeschwindigkeiten (1-2 m/s) außerhalb des Bereichs einer Grenzschicht > 10 mm befinden (Abb. 5.7, doppelseitiger Pfeil), was allerdings von der jeweiligen Position am Baumstamm abhängt. Im Stammdurchmesserbereich 0-18 cm werden ab Windgeschwindigkeiten $\geq 0,5$ m/s δ_l und $\delta_l < 10$ mm erreicht (errechnete Grenzschichtdicke bei 90° in beiden Fällen). Desweiteren liegen im Bereich ~ 20 -45 cm bei zunehmender Windgeschwindigkeit (ab $\geq 0,5$ m/s) δ_l mit ~ 10 mm nur mit zunehmendem Stammdurchmesser vor (vgl. Tab. A und Tab. B im Anhang A).

Bereich A und B in Abb. 5.9 sind die bei gemittelter Windgeschwindigkeit (errechneten) frühest besetzbaren Bereiche einer turbulenten (A) und laminaren Grenzschichtdicke (B) von 10 mm. Nach Bereich A (ab ~ 20 cm) beträgt die Dicke der turbulenten und nach Bereich B (ab ~ 45 cm) die Dicke der laminaren Grenzschicht (bei gemittelter Windgeschwindigkeit) über 10 mm. Innerhalb dieser Bereiche (15-45 cm) befinden sich 23 Männchen (92%) auf rauer und 9 Männchen (32,14%) auf glatter Rinde. Nach Bereich B (> 45 cm) sitzen 2 Individuen (8%) auf rauer und 19 (67,86%) auf glatter Rinde. Die Verteilung auf glatter und rauer Rinde innerhalb und außerhalb (nach Bereich B) der Bereiche unterscheidet sich signifikant ($df = 1$; $\chi^2 = 19,773$; $p < 0,001$).

13 Frostspanner Weibchen (92,86%) (ohne Strauch) sitzen bei vorherrschender Windgeschwindigkeit auf Baumstämmen, deren Grenzschicht > 5 mm erreicht (Abb. 5.10). 1 Weibchen (7,14%) fällt aufgrund einer gemessenen Position bei 0° (Staupunkt) in eine Grenzschichtdicke von 0 mm. 1 Weibchen (6,67% aus n_{φ}) besetzt einen Strauch mit $\delta_l = 3,5$ mm.

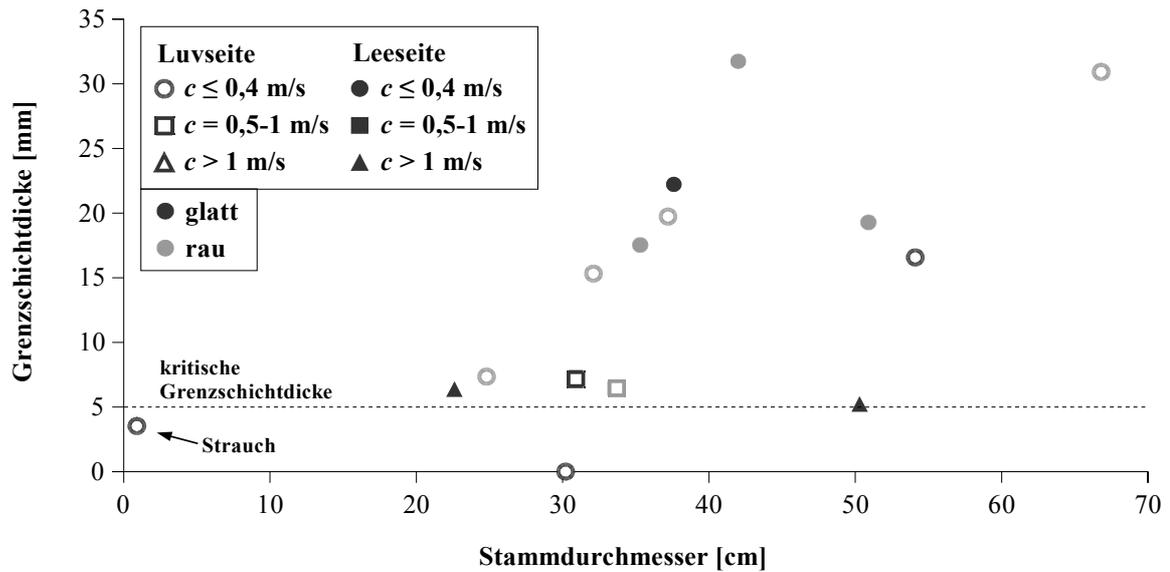


ABBILDUNG 5.10 Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) in entstehenden Grenzschichtdicken in Abhängigkeit des Stammdurchmessers [cm] und der Windgeschwindigkeit [m/s]. An der Luv- und Leeseite sitzenden Weibchen, sowie Windgeschwindigkeiten sind durch unterschiedliche Symbole kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauere Rinde sind zusammengefasst. Aufgetragen ist die errechnete laminare Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit glatter Rinde, sowie für in Frage kommende Baumstämme mit rauher Rinde (Luvseite) (vgl. Tab. 5.10) und die errechnete turbulente Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit rauher Rinde. Für Weibchen, die sich an der Leeseite (nach φ_A) glatter Baumstämme befinden, wurde mit einem Strömungsweg der laminaren Grenzschicht bis 90° gerechnet, da die Grenzschicht dort ablöst und Verwirbelungen an der Leeseite entstehen. Bei Individuen auf Baumstämmen mit rauher Rinde an der Leeseite nach φ_A ($\sim 140^\circ$), wurde mit einer turbulenten Grenzschicht mit Ablösung bei 140° gerechnet. Der tatsächliche Strömungsweg (von 0° bis zur Exposition) wurde zur Berechnung für Individuen vor den jeweiligen Ablöswinkeln herangezogen. Eingezeichnet ist die kritische Grenzschichtdicke (5 mm, gestrichelte horizontale Linie). Vgl. auch Abb. 5.8.

5.2.5 Expositionsverteilung im Strömungsfeld

Sowohl auf glatter, als auch auf rauher Rinde, verteilen sich Frostspanner Männchen signifikant häufiger in Zonen am Baumstamm, in denen Wirbelbildung auftritt (Abb. 5.11, Tab. 5.11, Tab. 5.12). 49 Männchen (80,33%) befinden sich in diesen Bereichen, wobei 39 Männchen (79,59% aus 49 Ind.) aufgrund einer Position nach φ_A in diese Strömungsform fallen. 12 Männchen (19,67%) treten in einer laminaren Grenzschicht vor φ_A auf, in welcher sich keine Wirbel bilden.

Die Summenvektoren des linken und rechten Halbkreises mit signifikanten Vektorlängen (Tab. 5.11) weisen bei beiden Rindentypen in das erste Drittel der Leeseite des Baumstammes (Abb. 5.11), an welcher in beiden Fällen Wirbel auftreten. Für glatte Rinde liegen die Summenwinkel $25,86^\circ$ (V_L) und $33,46^\circ$ (V_R) nach dem Ablöswinkel der laminaren Grenzschicht ($\sim 80^\circ$). Bei rauher Rinde befinden sich die errechneten Summenwinkel $33,28^\circ$ (V_L) und $38,55^\circ$ (V_R) nach dem Umschlagswinkel in eine turbulente Grenzschicht ($\sim 80^\circ$).

Ein Vergleich der Summenvektoren der Rindentypen, zeigt für raue Rinde eine geringe Abweichung. Auf rauher Rinde liegt der Summenwinkel der rechten Hälfte (V_R) um $7,42^\circ$ und der Summenwinkel der linken Hälfte (V_L) um $5,09^\circ$ hinter den entsprechenden Summenwinkel für glatte Rinde.

Sträucher werden von Männchen ausschließlich gegen den Mittelpunkt der Leeseite hin (180°) besetzt, wie der Summenvektor mit signifikanter Vektorlänge für Sträucher (V_{ST}) verdeutlicht (Abb. 5.11a).

Es liegen keine signifikanten Unterschiede in der Expositionsverteilung der Frostspanner Männchen an der rechten und linken Stammseite beim jeweiligen Rindentypus vor (Tab. 5.11).

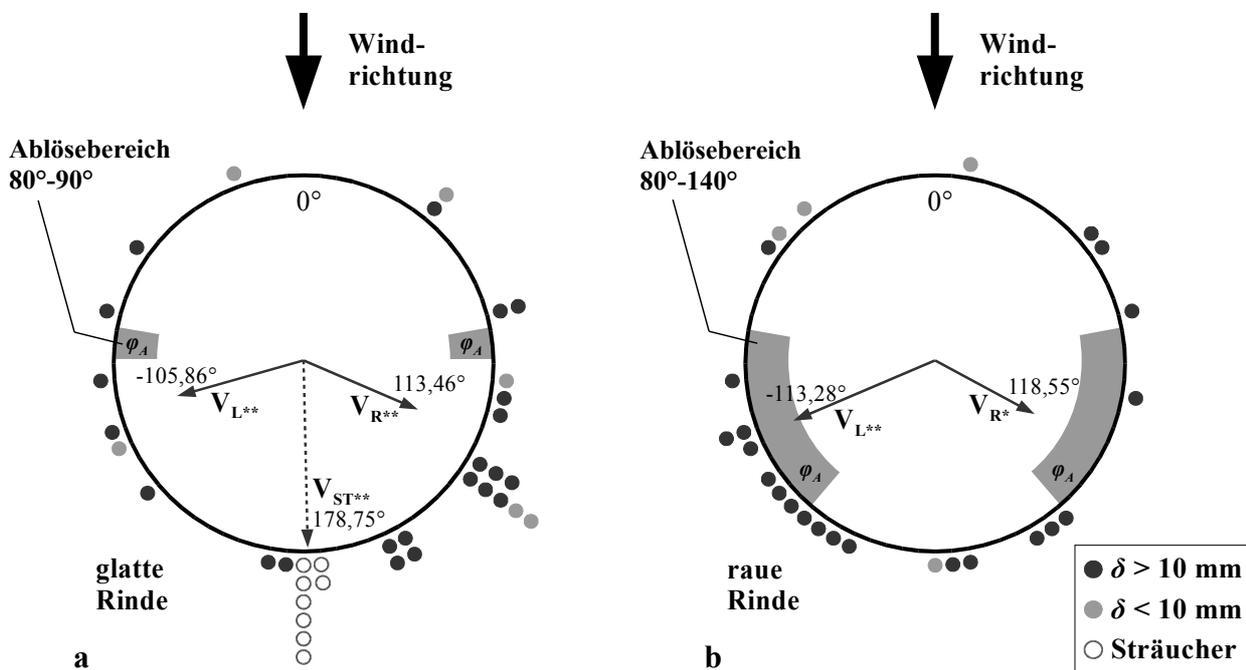


ABBILDUNG 5.11 Nach Windrichtung abgeleitete Expositionverteilung [$^\circ$] der Frostspanner Männchen ($n_\sigma = 61$) im Strömungsfeld um den Baumstamm. Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kennlich gemacht sind Sträucher und Positionen, an denen die Grenzschichtdicke aufgrund der Position, des Stammdurchmessers und der vorherrschenden Windgeschwindigkeit < 10 mm beträgt. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils $0^\circ-180^\circ$), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung. (a) Positionen im Strömungsfeld auf glatter Rinde ($n = 36$). Die Summenvektoren V_L und V_R wurden ohne Sträucher berechnet. Eingezeichnet ist der Summenvektor für Sträucher (gestrichelter Vektor). Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_A < 90^\circ$. (b) Positionen im Strömungsfeld auf aufgerauter/rauer Rinde (zusammengefasst) ($n = 25$). Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_A < 140^\circ$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.11 zusammengefasst. (δ Grenzschichtdicke, φ_A Ablösewinkel, V_L Summenvektor des linken Halbkreises, V_R Summenvektor des rechten Halbkreises, V_{ST} Summenvektor für Sträucher, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

TABELLE 5.11 Daten zur Männchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.11. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0°-180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test für glatte Rinde wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der 180°-Positionen ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, α_{VST} Summenvektor für Sträucher, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, a_{VST} kritische Vektorlänge des Summenvektors für Sträucher, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

Abb. 5.11	α_{VL} [°]	a_{VL}	α_{VR} [°]	a_{VR}	α_{VST} [°]	a_{VST}	df_1 / df_2	$F_{L/R}$
(a) glatt	-105,86	0,693**	113,46	0,844**	178,75	0,999**	1 / 34	1,3 _(4:2)
(b) rau	-113,28	0,812**	118,55	0,598*	-	-	1 / 23	2,88 _(0:1)

TABELLE 5.12 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 61$) und Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) im Strömungsfeld auf den Rindentypen glatt und aufgeraut/rau, sowie zur Gesamtverteilung (Gesamtsituation ohne Berücksichtigung des Rindentypus). Aufgeraute und rauere Rinde sind zusammengefasst. Verglichen ist die Besetzung der Strömungsfeldbereiche innerhalb des Geschlechts (df innerhalb $\sigma\sigma$ und $\varphi\varphi$: glatt $df = 1$; rau $df = 2$; Umschlag $df = 1$; gesamt $df = 2$), sowie beider Geschlechter ($\sigma\sigma$ vs. $\varphi\varphi$) (df $\sigma\sigma$ vs. $\varphi\varphi$: glatt $df = 1$; rau $df = 2$; Umschlag $df = 1$; gesamt $df = 2$). Angegeben ist die Individuenzahl im jeweiligen Bereich und der χ^2_{Σ} -Wert mit Signifikanzniveau. Signifikante Werte sind hervorgehoben. Mit dem Index (t) sind Frostspanner gekennzeichnet, die in einem mit Wirbeln durchsetzten Bereich sitzen. (φ_A Ablöswinkel)

Rinde	Position	$\sigma\sigma$			$\varphi\varphi$			$\sigma\sigma$ vs. $\varphi\varphi$	
		n_{σ}	χ^2_{Σ}	p	n_{φ}	χ^2_{Σ}	p	χ^2_{Σ}	p
glatt	vor φ_A ($< \sim 80^\circ$ bzw. $\sim 110^\circ_{\varphi}$)	7	13,444	0,001	4	0,142	$\sim 0,7$	4,37	0,038
	nach φ_A ($> \sim 80^\circ$)	29 _(t)			3 _(t)				
rau	vor φ_A ($< \sim 80^\circ$)	7	0,559	$> 0,4$	6	6,249	$< 0,05$	6,145	$< 0,05$
	in φ_A ($\sim 80^\circ$ bis $\sim 140^\circ$)	8 _(t)			1 _(t)				
	nach φ_A ($> \sim 140^\circ$)	10 _(t)			1 _(t)				
	vor Umschlag in turbulent	5	9,0	0,0027	6	2,0	0,157	8,248	0,0042
	nach Umschlag in turbulent	20 _(t)			2 _(t)				
	gesamt	vor φ_A	14	26,634	0,001	10	8,4	$\sim 0,02$	8,72
	in φ_A	8 _(t)			1 _(t)				
	nach φ_A	39 _(t)			4 _(t)				

Frostspanner Weibchen befinden sich auf rauer Rinde signifikant häufiger vor φ_A , als nach oder in φ_A (Abb. 5.12, Tab. 5.12). Auf glatter Rinde liegen keine signifikanten Unterschiede in der Verteilung vor φ_A und nach φ_A (4:3) vor. Gesamt gesehen, verteilen sich 10 Weibchen (66,67%) an der Luvseite des Baumstammes im Bereich vor φ_A , wobei bei allen eine laminare Grenzschicht ohne Wirbelbildung auftritt. 5 Weibchen (33,33%) sitzen in einer mit Wirbeln durchsetzten Zone am Baumstamm.

Mit Ausnahme des rechten Summenvektors (V_R) der Verteilung auf glatter Rinde, zeigen die Summenvektoren mit maximal 30° (V_L glatt) und minimal $17,36^\circ$ (V_L rau) vor dem Ablöse-/Umschlagswinkel der laminaren Grenzschicht ($\sim 80^\circ$), in die Luvseite des Baumstammes (Abb. 5.12). Die Besetzung eines Strauches durch 1 Individuum, erlaubt keine Aussagen zur Verteilung der Weibchen auf Sträuchern.

Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der Expositionsverteilung der Frostspanner Weibchen an der rechten und linken Stammseite des jeweiligen Rindentypus (Tab. 5.13).

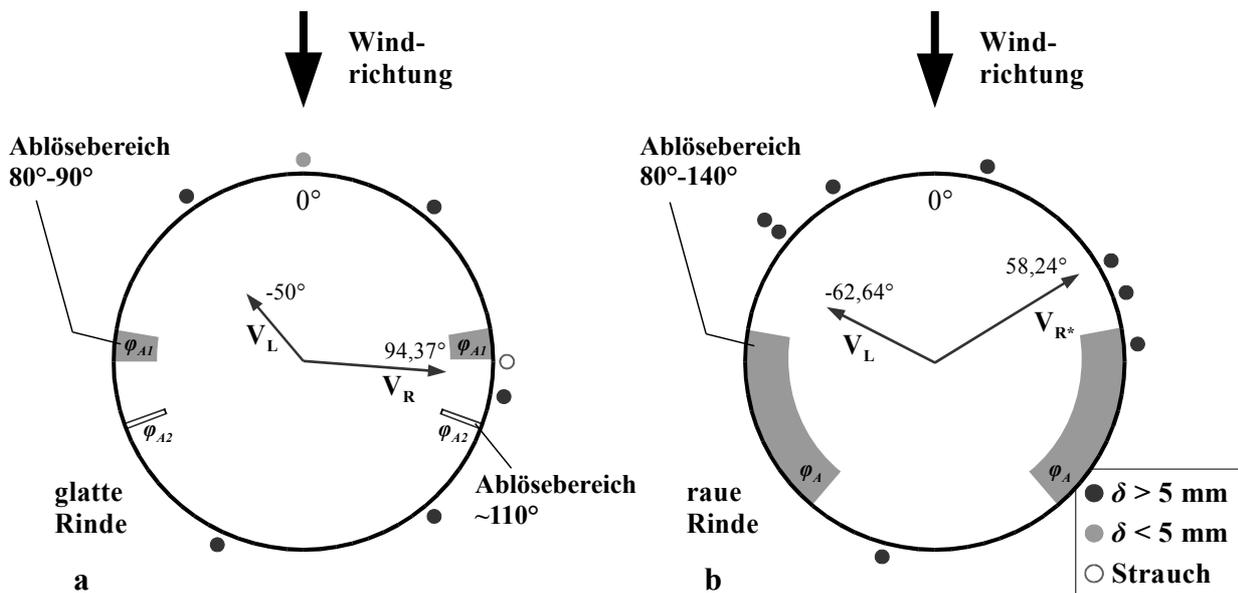


ABBILDUNG 5.12 Nach Windrichtung abgeleitete Expositionsverteilung [°] der Frostspanner Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) im Strömungsfeld um den Baumstamm. Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kennzeichnend gemacht sind Sträucher und Positionen, an denen die Grenzschichtdicke aufgrund der Position, des Stammdurchmessers und der vorherrschenden Windgeschwindigkeit < 5 mm beträgt. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils 0° - 180°), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung. (a) Positionen im Strömungsfeld auf glatter Rinde ($n = 7$). Die Summenvektoren V_L und V_R wurden ohne Sträucher berechnet. Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_{A1} < 90^\circ$ und bei $\varphi_{A2} \approx 110^\circ$ für den Strauch. (b) Positionen im Strömungsfeld auf aufgerauter/rauer Rinde (zusammengefasst) ($n = 8$). Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_A < 140^\circ$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.13 zusammengefasst. (δ Grenzschichtdicke, φ_A Ablösewinkel, V_L Summenvektor des linken Halbkreises, V_R Summenvektor des rechten Halbkreises, * $p < 0,05$)

TABELLE 5.13 Daten zur Weibchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.12. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0°-180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test für glatte Rinde wurde incl. Strauch durchgeführt. Die Aufteilung der 0°-Position ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$)

Abb. 5.12	α_{VL} [°]	a_{VL}	α_{VR} [°]	a_{VR}	df_1 / df_2	$F_{L/R}$
(a) glatt	-50	0,471	94,37	0,759	1 / 5	5,34 (1:0)
(b) rau	-62,64	0,645	58,24	0,9*	1 / 6	1,54

Ein Vergleich von Frostspanner Männchen und Weibchen bezüglich ihrer Verteilung im Strömungsfeld vor φ_A , im Ablösebereich (in φ_A) und nach φ_A , ergibt für beide Rindentypen, für den Umschlagspunkt laminar/turbulent, als auch für die Gesamtverteilung, signifikante Unterschiede (Tab. 5.12). Desweiteren liegen in ihrer Expositionsverteilung auf rauher Rinde signifikante Unterschiede vor (Tab. 5.14). Die Anordnung an der linken und rechten Stammseite für den jeweiligen Rindentypus unterscheidet sich nicht signifikant.

TABELLE 5.14 F-Test zur Expositionsverteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 61$) und Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) im Strömungsfeld auf den Rindentypen glatt und aufgeraut/rau gesamt (0°-360°), sowie an der linken und rechten Stammseite (jeweils 0°-180°). Aufgeraute und rauere Rinde sind zusammengefasst. Der F-Test für glatte Rinde wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der 0°/180°-Positionen ist als Index ($\sigma:\varphi$) beim F-Wert angegeben. (σ_G Anordnung der Männchen am gesamten Baumstamm, σ_L Anordnung der Männchen an der linken Baumstammseite, σ_R Anordnung der Männchen an der rechten Baumstammseite, φ_G Anordnung der Weibchen am gesamten Baumstamm, φ_L Anordnung der Weibchen an der linken Baumstammseite, φ_R Anordnung der Weibchen an der rechten Baumstammseite, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, ** $p < 0,01$)

F-Test	Rinde	df_1 / df_2	F
$\sigma_G : \varphi_G$	glatt	1 / 41	3,31
	rau	1 / 31	9,11**
$\sigma_L : \varphi_L$	glatt	1 / 14	2,55
	rau	1 / 16	3,13 (4:1)
$\sigma_R : \varphi_R$	glatt	1 / 25	1,9 (2:0)
	rau	1 / 13	3,37 (1:0)

5.2.6 Wirkung der Windgeschwindigkeit auf die Exposition

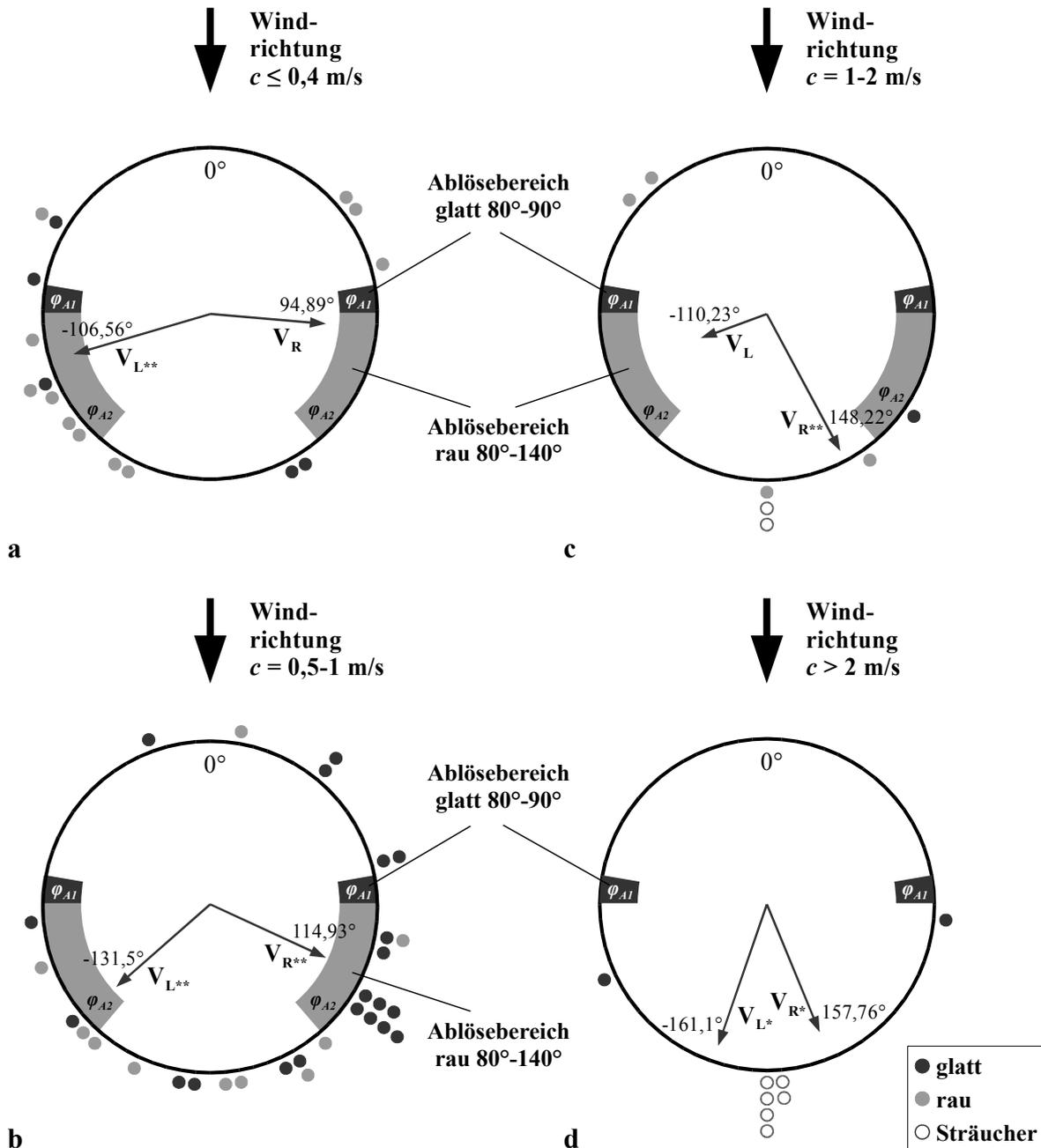


ABBILDUNG 5.13 Expositionsverteilung [°] der Frostspanner Männchen ($n_\delta = 61$) an Baumstämmen nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit [m/s]. Die Kreisdiagramme zeigen die Anordnung der Frostspanner Männchen an Baumstämmen bei den Windgeschwindigkeiten (a) $c \leq 0,4$ m/s ($n = 16$), (b) $c = 0,5-1$ m/s ($n = 30$), (c) $c = 1-2$ m/s ($n = 7$) und (d) $c > 2$ m/s ($n = 8$). Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kennzeichnend gemacht sind Frostspanner auf glatter und rauer Rinde, sowie auf Sträuchern. Aufgeraute und aufgeraute/raue Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils $0^\circ-180^\circ$), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung, deren Bereich durch Graustufen hervorgehoben ist. Die Grenzschichtablösung liegt für glatte Rinde bei $80^\circ < \varphi_{A1} < 90^\circ$ und für rauer Rinde bei $80^\circ < \varphi_{A2} < 140^\circ$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.15 zusammengefasst. (φ_A Ablösewinkel, c Windgeschwindigkeit, V_L Summenvektor des linken Halbkreises, V_R Summenvektor des rechten Halbkreises, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

Bei Betrachtung der Verteilung der Frostspanner Männchen an Baumstämmen nach Windgeschwindigkeit, ist ersichtlich, dass der Winkel des jeweilig signifikanten Summenvektors (jener mit höchstem a-Wert) mit zunehmender Windgeschwindigkeit größer wird (Abb. 5.13, Tab. 5.15). Dabei tritt die größte Zunahme des Winkels mit 33,29° bei 0,5-1 m/s auf 1-2 m/s auf. Bei Windgeschwindigkeiten ≥ 1 m/s beziehen 9 Individuen (60%) Positionen bei 175° und 180°, wobei es sich mit Ausnahme 1 Position um Sträucher handelt (Abb. 5.13c, 5.13d). Aus den übrigen 6 Individuen (40%) besetzen 4 Männchen (66,67% aus 6 Ind.) Bereiche nach φ_A und 2 Männchen (33,33%) Bereiche vor φ_A .

Gesamt gesehen, unterscheidet sich die Verteilung vor φ_A , im Bereich von φ_A und nach φ_A mit zunehmender Windgeschwindigkeit signifikant (Tab. 5.16).

TABELLE 5.15 Daten zur Männchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.13. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0°-180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der 180°-Positionen ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

Abb. 5.13	α_{VL} [°]	a_{VL}	α_{VR} [°]	a_{VR}	df_1 / df_2	$F_{L/R}$
(a) $\leq 0,4$ m/s	-106,56	0,858**	94,89	0,697	1 / 14	1,47
(b) 0,5-1 m/s	-131,5	0,753**	114,93	0,763**	1 / 28	0,99
(c) 1-2 m/s	-110,23	0,422	148,22	0,937**	1 / 5	0,13 (2:1)
(d) > 2 m/s	-161,1	0,901*	157,76	0,831*	1 / 6	0,02 (3:1)

TABELLE 5.16 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen an Positionen vor, im Bereich und nach der Grenzschichtablösung (φ_A) mit zunehmender Windgeschwindigkeit [m/s]. Verglichen sind die besetzten Bereich innerhalb der c -Klassen ($df = 1$) und bezüglich aller c -Klassen ($df = 6$) (gesamt). Angegeben ist die Individuenzahl in der verhältnismäßigen Position zu φ_A bei vorherrschender Windgeschwindigkeit, die χ^2_{Σ} -Werte mit Signifikanzniveau des Vergleichs innerhalb der Klassen, sowie der χ^2_{Σ} -Wert mit Signifikanzniveau für den Gesamtvergleich. Signifikante Werte sind hervorgehoben. (φ_A Ablösewinkel, c Windgeschwindigkeit)

c [m/s]	n_{φ}			innerhalb		gesamt	
	vor φ_A	in φ_A	nach φ_A	χ^2	p	χ^2	p
$\leq 0,4$	6	5	5	0,125	$> 0,5$	14,26	~0,03
0,5-1	6	3	21	18,6	$< 0,001$		
1-2	2	0	5	5,43	$< 0,025$		
> 2	0	0	8	15,998	$< 0,001$		

8 Frostspanner Weibchen (72,73% bei $c \leq 0,4$ m/s) besetzten bei Windgeschwindigkeiten $\leq 0,4$ m/s Position im Bereich vor φ_A (Abb. 5.14a). Die übrigen 3 Individuen (27,27%) verteilen sich im Bereich in φ_A (1 Ind.) und nach φ_A (2 Ind.). Diese Verteilung ist signifikant (Tab. 5.18). Analysen zu Windgeschwindigkeiten $\geq 0,5$ m/s erscheinen in Anbetracht einer geringen Datenmenge nicht sinnvoll. Zu bemerken wäre nur, dass es sich bei den Position an der Leeseite in Abb. 5.14b um Windgeschwindigkeiten > 1 m/s handelt.

Bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten unterscheidet sich die Verteilung vor φ_A , im Bereich von φ_A und nach φ_A mit zunehmender Windgeschwindigkeit signifikant (Tab. 5.18). Gesamt gesehen, liegen keine signifikanten Unterschiede vor.

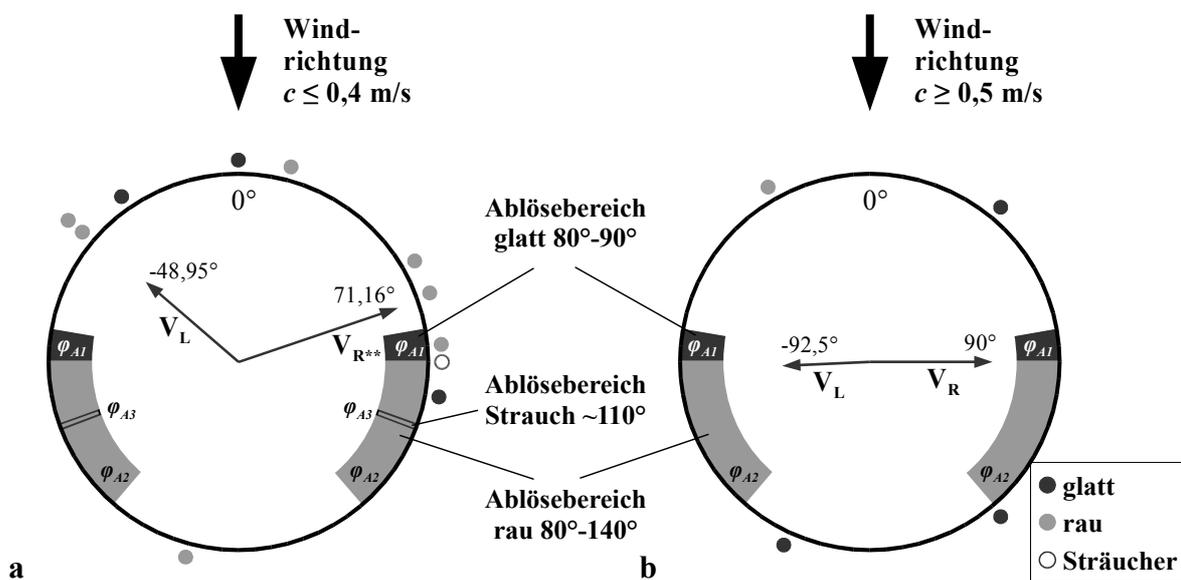


ABBILDUNG 5.14 Expositionsverteilung [°] der Frostspanner Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) an Baumstämmen nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit [m/s]. Die Kreisdiagramme zeigen die Anordnung der Frostspanner Weibchen an Baumstämmen bei den Windgeschwindigkeiten (a) $c \leq 0,4$ m/s ($n = 11$), (b) $c \geq 0,5$ m/s ($n = 4$). Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kennlich gemacht sind Frostspanner auf glatter und aufgerauter/rauer Rinde, sowie auf Sträuchern. Aufgeraute und raue Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils 0° - 180°), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung, deren Bereich durch Graustufen hervorgehoben ist. Die Grenzschichtablösung liegt für glatte Rinde bei $80^{\circ} < \varphi_{A1} < 90^{\circ}$, für raue Rinde bei $80^{\circ} < \varphi_{A2} < 140^{\circ}$ und für den Strauch bei $\varphi_{A3} \approx 110^{\circ}$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.17 zusammengefasst. (φ_A Ablösewinkel, c Windgeschwindigkeit, V_L Summenvektor des linken Halbkreises, V_R Summenvektor des rechten Halbkreises, ** $p < 0,01$)

Ein Vergleich von Frostspanner Männchen und Weibchen bezüglich ihrer Exposition relativ zu φ_A bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten, ergibt für die Verteilung bei $c = 0,5$ - 1 m/s signifikante Unterschiede ($df = 2$; $\chi^2 = 6,4$, $p \approx 0,03$). In den Verteilungen $c \leq 0,4$ m/s ($df = 2$; $\chi^2 = 3,428$; $p > 0,1$) und $c > 1$ m/s ($df = 1$; $\chi^2 = 0,301$; $p > 0,5$) liegen keine signifikanten Unterschiede vor. Unterschiede in der gesamten Verteilung sind aus Tab. 5.12 ersichtlich. Die Expositionsverteilung gesamt, sowie der linken Stammseite, unterscheidet sich bei $c \leq 0,4$ m/s signifikant (Tab. 5.19).

TABELLE 5.17 Daten zur Weibchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.14. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0°-180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Strauch durchgeführt. Die Aufteilung der 0°-Position ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

Abb. 5.14	α_{VL} [°]	a_{VL}	α_{VR} [°]	a_{VR}	df_1 / df_2	$F_{L/R}$
(a) $\leq 0,4$ m/s	-48,95	0,65	71,16	0,889**	1 / 9	5,8* _(1:0)
(b) $> 0,5$ m/s	-92,5	0,462	90	0,643	1 / 2	24,97*

TABELLE 5.18 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Weibchen an Positionen vor, im Bereich und nach der Grenzschichtablösung (φ_A) mit zunehmender Windgeschwindigkeit [m/s]. Verglichen sind die besetzten Bereich innerhalb der c -Klassen ($df = 1$) und bezüglich aller c -Klassen ($df = 4$) (gesamt). Angegeben ist die Individuenzahl in der verhältnismäßigen Position zu φ_A bei vorherrschender Windgeschwindigkeit, die χ^2_{Σ} -Werte mit Signifikanzniveau des Vergleichs innerhalb der Klassen, sowie der χ^2_{Σ} -Wert mit Signifikanzniveau für den Gesamtvergleich. Signifikante Werte sind hervorgehoben. (φ_A Ablösewinkel, c Windgeschwindigkeit)

c [m/s]	n_{φ}			innerhalb		gesamt	
	vor φ_A	in φ_A	nach φ_A	χ^2	p	χ^2	p
$\leq 0,4$	8	1	2	7,529	~0,006	6,959	$> 0,1$
0,5-1	2	0	0	3,998	< 0,05		
> 1	0	0	2	3,998	< 0,05		

TABELLE 5.19 F-Test zur Expositionsverteilung von Frostspanner Männchen ($n_{\delta} = 61$) und Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) an Baumstämmen gesamt (0°-360°), sowie an der linken und rechten Stammseite nach Windgeschwindigkeit [m/s]. Die Aufteilung der 0°/180°-Positionen ist als Index (δ : φ) beim F-Wert angegeben. (δ_G Anordnung der Männchen am gesamten Baumstamm, δ_L Anordnung der Männchen an der linken Baumstammseite, δ_R Anordnung der Männchen an der rechten Baumstammseite, φ_G Anordnung der Weibchen am gesamten Baumstamm, φ_L Anordnung der Weibchen an der linken Baumstammseite, φ_R Anordnung der Weibchen an der rechten Baumstammseite, c Windgeschwindigkeit, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$)

F-Test	c [m/s]	df_1 / df_2	F
$\delta_G : \varphi_G$	$\leq 0,4$	1 / 25	12,52**
	$\geq 0,5$	1 / 47	0,315
$\delta_L : \varphi_L$	$\leq 0,4$	1 / 14	4,98* _(0:1)
	$\geq 0,5$	1 / 17	0,65 _(5:0)
$\delta_R : \varphi_R$	$\leq 0,4$	1 / 9	0,74
	$\geq 0,5$	1 / 28	0,83 _(2:0)

6 Diskussion

Die Verteilung paarungsbereiter Weibchen und wartender Männchen des Kleinen Frostspanners an Baumstämmen in einem submontanen Mischwald wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht. Neben der Analyse ihrer Verteilung auf Baumarten und Rindentypen, ihrer Höhenverteilung am Baumstamm, der Luft-, Stamm- und Bodentemperatur und der Antennenstellung der Männchen, sowie der Abdomenstellung der Weibchen, wurde eine eingehende strömungsmechanische Untersuchung der Expositionsverteilungen vorgenommen. Nach Ableitung ihrer relativen Exposition am Baumstamm nach Windrichtung, wurden ihre Positionen im Strömungsfeld auf unterschiedlichen Rindentypen analysiert. Desweiteren wurde ihre Verteilung in unterschiedlichen Reynolds-Bereichen und der Einfluss der Grenzschichtdicke beim Besetzen von Baumstämmen untersucht.

6.1 Allgemeine Parameter

6.1.1 Verteilung auf Baumarten und Rindentypen

Die Verteilung des Kleinen Frostspanners auf den Rindentypen glatt und aufgeraut/rau unterscheidet sich innerhalb der Geschlechter nur gering voneinander (♂♂ 28:25; ♀♀ 6:8) (ohne Sträucher). Das Besetzen einer Baumart steht in direktem Zusammenhang mit dem Rindentypus, da jede Baumart einen speziellen Rindentypus hat. Ausschließlich Buchenarten und Sträucher weisen glatte Rinde auf (Tab. 5.1), wobei Sträucher aufgrund ihres geringen Stammdurchmessers später besprochen werden (Abschnitt 6.2.1), da sie eine strömungsmechanische Rolle bei stärker werdendem Wind spielen. Die übrigen protokollierten Baumarten haben aufgeraute/raue Rinde. Daraus erklärt sich die hohe Anzahl der Männchen und Weibchen auf Buchen, gegenüber anderen Baumarten (Tab. 5.1). Einzig durch das Besetzen von Buchen ist eine Position auf glatter Rinde möglich.

Rindentypus und Stammdurchmesser spielen für Frostspanner Männchen offensichtlich eine wichtige Rolle beim Besetzen von Baumstämmen. Obwohl im untersuchten Waldgebiet ein Stammdurchmesserangebot von ~0,5 cm bis 70 cm für beide Rindentypen vorliegt, werden

Baumstämme mit Durchmessern $< \sim 16$ cm (mit Ausnahme von Sträuchern) nicht besetzt (Abb. 5.1). Desweiteren befinden sich im Durchmesserbereich 15-40 cm signifikant mehr Männchen auf rauer, als auf glatter Rinde (Abb. 5.1, Tab. 5.2). Diese Verteilung hat strömungsmechanische Gründe und wird daher später besprochen (Abschnitt 6.2.2).

Für Frostspanner Weibchen scheinen Rindentypus und Stammdurchmesser keine Rolle für das Besetzen von Baumstämmen zu spielen. Ihre Verteilung in Stammdurchmesserbereichen wirkt zufällig (Abb. 5.2, Tab. 5.3), was sich mit *Graf et al.* (1995) deckt. Da Weibchen nach dem Schlupf bei einsetzender Dämmerung einen *nächstgelegenen* Baumstamm hinaufklettern, ist anzunehmen, dass keine gezielte Wahl einer Baumart erfolgt. Erkennbar ist allerdings eine Bevorzugung von Baumstämmen mit Durchmessern von ~ 20 cm bis ~ 45 cm (Abb. 5.2). Dies ist auf das Angebot an Baumstämmen im untersuchten Waldgebiet zurückzuführen, in dem überwiegend Bäume mit Durchmessern zwischen ~ 20 cm und ~ 40 cm vorhanden sind.

6.1.2 Expositionsverteilung an Baumstämmen

Die exakte Bestimmung der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit im Waldgebiet gestaltete sich mitunter schwierig. Da der Wind böig ist und die Richtung sich ständig mehr oder weniger ändert, ist jeweils nur eine Momentaufnahme der Windsituation möglich.

Die Ergebnisse der Expositionsverteilung an Baumstämmen nach Windrichtung, zeigen eine deutliche Bevorzugung der Leeseite bei Männchen (Abb. 5.3b) und einen Trend zur Bevorzugung der Luvseite bei Weibchen (Abb. 5.4b). Es ist daher auszuschließen, dass die Expositionswahl der Frostspanner Männchen und Weibchen zufällig erfolgt. Die Windsituation ist in hohem Maße ausschlaggebend für eine gezielte Anordnung am Stamm. Der Grund für diese Anordnung ist strömungsmechanischer Art und wird daher später diskutiert (Abschnitt 6.2.3).

6.1.3 Höhenverteilung an Baumstämmen

Aufgrund der Unfähigkeit beider Geschlechter Nahrung aufzunehmen und der damit verbundenen letalen Erschöpfung bei zu hohem Energieaufwand, sollte von beiden Geschlechtern eine Optimierung des Investments angestrebt werden. Das wird unter anderem dadurch erreicht, dass beide Geschlechter gleiche Höhenbereiche an Baumstämmen besetzen ($p > 0,95$) (Abb. 5.5). Der optimale Höhenbereich am Baumstamm scheint zwischen ~ 60 cm und ~ 220 cm zu liegen. *Varley et al.* (1973) bestätigt, dass sich Frostspanner am unteren Teil der Baumstämme niederlassen. Da sich sowohl männliche als auch weibliche Individuen bevorzugt in diesem Bereich sammeln, ist

für Männchen eine gute Wahrnehmbarkeit des Sexualpheromones gewährleistet, da die Pheromondichte auf Höhe der Weibchen am Höchsten ist. Eine aufwendige Suche der Pheromonspur in der vertikalen Ebene und die damit verbundene Flugaktivität werden somit vermieden. Zusätzlich ist der Energieaufwand für Weibchen, durch das Zurücklegen einer nur kurzen Strecke am Baumstamm bis zur Position der Pheromonemittierung, minimiert. Ihre verbleibenden Reserven können somit für den Aufstieg in die Baumkrone und zur Eiablage eingesetzt werden.

Zu beachten ist, dass Weibchen teilweise schon während der Kopulation Wegstrecken am Baumstamm zurücklegen, wobei das Männchen mitgezogen wird (*Van Dongen et al. 1998*). Während der Datenerhebung wurde aus 13 kopulierenden Weibchen nur 1 Individuum beobachtet, welches sich am Stamm wenige Zentimeter mit seinem Geschlechtspartner aufwärts bewegte. Daher ist eine Verfälschung der weiblichen Höhenverteilung durch diesen Umstand auszuschließen.

6.1.4 Temperaturen

Es konnten keine Zusammenhänge der Luft-, Stamm- und Bodentemperatur mit der Verteilung des Kleinen Frostspanners an Baumstämmen gefunden werden. Zwischen Luft- und Stammtemperatur liegen nahezu keine Unterschiede vor, da sich die Oberflächentemperatur des Stammes an jene der Luft angleicht (Tab. 5.8). Daraus ist zu schließen, dass die Temperatur der Baumstammoberfläche keinen Einfluss auf das Besetzen eines Baumstammes durch ein Frostspanner Männchen oder Weibchen hat.

Die Auswirkungen der Bodentemperatur sowie von Witterungsbedingungen auf den Schlupf der Imagines im Herbst, wurden bereits von zahlreichen Autoren untersucht (vgl. Abschnitt 1.2).

6.2 Strömungssituation

6.2.1 Re-Bereich und Windsituation

In die Berechnung der Reynolds-Zahl Re , fließen neben Luftdichte und dynamischer Viskosität, der Stammdurchmesser und die Windgeschwindigkeit ein (vgl. Abschnitt 3.1.3). Die Abnahme des Stammdurchmessers oder der Windgeschwindigkeit führt zu kleineren Re -Werten und umgekehrt. Diesen Umstand machen sich Frostspanner Männchen zu Nutze. Obwohl im untersuchten Waldgebiet ein nutzbares Re -Angebot von $\sim 80 \leq Re \leq \sim 2,58 \cdot 10^5$ vorliegt, besetzten Männchen Baumstämme mit Umströmungen bis $Re = 4,23 \cdot 10^4$ (mit Ausnahme von 2 Ausreißern) (Tab. 5.9).

Mit steigender Windgeschwindigkeit kommt es zu Überlappungen des *Re*-Bereichs (Abb. A im Anhang A), sowie zur signifikanten Abnahme des Stammdurchmessers (Abb. 5.7). Daraus ist zu schließen, dass Männchen *Re*-Bereiche $> 4,28 \cdot 10^4$ vermeiden, wie auch die Auswertung der Funktionslinie aus Abb. 5.7 (optimaler *Re*-Bereich) zeigt. Um zunehmende Windgeschwindigkeit zu kompensieren, findet ein gezieltes Besetzen von Baumstämmen mit geeigneten Durchmessern statt.

Diese Anpassung hat vermutlich mehrere Gründe: Mit zunehmender Windgeschwindigkeit könnte es Frostspanner Männchen schwerer fallen, sich am Baumstamm festzuhalten. Da sie mit über dem Körper zusammengeklappten Flügeln am Baumstamm warten, bieten diese dem Wind eine relativ große Angriffsfläche im Verhältnis zu Körpermasse und die Falter werden vom Baumstamm geweht. Bei der Datenerhebung wurde beobachtet, dass Männchen schon bei leichtem Anblasen mit dem Mund vom Baumstamm fallen. Durch das Ausweichen auf Stämme von Sträuchern bei höheren Windgeschwindigkeiten ($c > 1$ m/s) (Abb. 5.13a-d), ist ein gewisser Schutz vor Wind gewährleistet. Hier liegen niedrige *Re*-Werte vor und eine laminare Ablösung bei $\sim 90^\circ$. Männchen auf Sträuchern beziehen ausschließlich Positionen um 180° zur Windrichtung (Abb. 5.11a, Abb. 5.13c, d). Somit sitzen sie im Windschatten und die Flügel stellen keine Angriffsfläche mehr für den Wind dar. Ihre Antennen ragen in dieser Position links und rechts über den schmalen Stamm hinaus, wodurch ein Empfang weiblicher Sexualpheromone möglich ist. Allerdings ist fraglich, ob bei höheren Windgeschwindigkeiten der Pheromonspur Richtung Weibchen gefolgt wird. Dabei wäre relativ hoher Energieaufwand nicht zu vermeiden bzw. wäre es den Männchen gar nicht möglich, gegen den starken Wind vorwärts zu kommen. Den Beobachtungen im Untersuchungsgebiet nach zu urteilen, wird Flugaktivität bei diesen Windgeschwindigkeiten ($c > 2$ m/s) vermieden, was sich mit *Singer & Parmesan* (2010) deckt.

Ein weiterer Grund für die Anpassung der Frostspanner Männchen an den bestimmten *Re*-Bereich, könnten die an der Leeseite der Baumstämmen entstehenden Wirbel sein. Wie aus der folgenden Besprechung hervorgehen wird, benötigen Männchen diese Wirbelzone vermutlich, um den Pheromonempfang zu optimieren. Mit steigendem *Re* werden die Wirbel allerdings kleiner (*Braun*, pers. Mitteilung) (Abb. 3.8a-d, e-i). Möglicherweise ist eine gewisse Wirbelgröße an der Leeseite notwendig, um eine verbesserte Wahrnehmbarkeit des weiblichen Pheromons zu erreichen.

Weibchen des Kleinen Frostspanners treten in *Re*-Bereichen bis $2,47 \cdot 10^4$ auf (außer 1 Individuum) (Tab. 5.9). Im Gegensatz zu Männchen, liegt bei Weibchen keine signifikant unterschiedliche Verteilung auf Baumstämmen mit bestimmten Durchmessern im Bezug zur Windgeschwindigkeit

vor. Desweiteren nimmt ihr Auftreten mit zunehmender Windgeschwindigkeit deutlich ab (Abb. 5.8, Tab. 5.18). Daraus ist zu schließen, dass sie höhere *Re*-Bereiche meiden. Obwohl es am Baumstamm im Bereich 0° - 90° (bevorzugt besetzter Bereich von Weibchen) zu einer Beschleunigung der Umströmung kommt (vgl. Abb. 3.5), welche mit steigender Windgeschwindigkeit zunimmt, ist auszuschließen, dass Frostspanner Weibchen zu schwach sind, um sich in dieser Situation am Baumstamm festzuhalten. Die Tatsachen, dass sie kräftige Beine besitzen, den Baumstamm bis in die Baumkrone zur Eiablage (*Varley et al. 1973*) und teilweise schon während der Kopulation mitsamt dem Männchen erklimmen (*Van Dongen et al. 1998*), würden diese Annahme widerlegen. Möglicherweise bedeutet das notwendig kräftigere Festhalten am Baumstamm bei steigender Windgeschwindigkeit höheren Energieaufwand. Diese Energie sollte jedoch für die eben genannten Aktivitäten eingesetzt werden.

Ein weiterer Grund der Vermeidung höherer *Re*-Bereiche von Weibchen, könnte die Paarung selbst sein. Das Männchen richtet sich parallel zum Weibchen aus, wobei seine Flügel über dem Körper zusammengeklappt sind (Abb. 2.1c). Somit entsteht eine relativ großer Angriffsfläche für den Wind und die Wahrscheinlichkeit, dass beide Individuen bei eventueller Zunahme der Windgeschwindigkeit vom Baumstamm geweht werden, erhöht sich deutlich. Hinzu kommt, dass das Männchen dem Weibchen keine Unterstützung beim eventuellen Erklimmen des Baumstammes während der Paarung gibt. Es lässt sich vielmehr vom Weibchen den Baumstamm hinaufziehen, ohne seine Beine zu bewegen (eigene Beobachtung). Es ist also anzunehmen, dass das Festhalten am Baumstamm während der Paarung hauptsächlich vom Weibchen ausgeht. Somit würde eine Paarung bei höheren Windgeschwindigkeiten eine riskante Angelegenheit sein, da für beide Individuen die Möglichkeit besteht vom Baumstamm geweht zu werden. Das wäre für das Männchen mit einer eventuell neuen Partnersuche und für das Weibchen mit erneutem Erklimmen des Baumstammes und somit mit großem Verbrauch vorhandener Energiereserven verbunden.

6.2.2 Einfluss der Grenzschichtdicke beim Besetzen von Baumstämmen

Wie bereits erwähnt, scheint der Rindentypus bei Baumstämmen mit bestimmten Stammdurchmessern eine wichtige Rolle für Frostspanner Männchen zu spielen. Grund dafür ist offensichtlich die entstehende strömungsmechanische Situation. Während bei Baumstämmen mit glatter Rinde eine laminare Grenzschicht entsteht, liegt bei Baumstämmen mit rauer Rinde eine größtenteils turbulente Grenzschicht vor (Tab. 5.10) (bezüglich Grenzschicht, vgl. Abschnitt 3.2.2). Die turbulente Grenzschicht ist wesentlich dicker als die laminare und nimmt mit zunehmender Lauf-

länge auch schneller an Dicke zu (Herwig 2004; Sigloch 2009). Die Dicke der Grenzschicht ist abhängig vom Stammdurchmesser und der Windgeschwindigkeit. Sie nimmt bei konstanter Windgeschwindigkeit mit steigendem Stammdurchmesser zu und mit steigender Windgeschwindigkeit bei konstantem Stammdurchmesser ab (vgl. Tab. A im Anhang A).

Möglicherweise hängt die Baumstammwahl der Frostspanner Männchen von entstehenden Grenzschichtdicken ab. Aus Abb. 5.9 ist erkennbar, dass eine Grenzschichtdicke < 10 mm anscheinend vermieden wird. Allerdings tritt eine Grenzschicht > 10 mm erst im Stammdurchmesserbereich von etwa 10 cm auf und das nur bei Windgeschwindigkeiten bis 0,2 m/s. Bei darüber liegenden Windgeschwindigkeiten, ist sie bei gleichem Stammdurchmesser bereits dünner als 10 mm (vgl. Tab. A und Tab. B im Anhang A). Dies könnte die Erklärung dafür sein, weshalb Frostspanner Männchen Baumstämme erst ab Durchmessern von ~ 16 cm besetzten und bis ~ 45 cm signifikant häufiger auf rauher Rinde sitzen. Berücksichtigt man die Böigkeit des Windes, ist dieser Stammdurchmesserbereich optimal gewählt, mittels einer turbulenten Grenzschicht in eine Dicke ≥ 10 mm zu fallen (vgl. Abb. 5.9). Ab ~ 45 cm sitzen Männchen bevorzugt auf glatter Rinde, da ab diesem Bereich nun auch laminare Grenzschichtdicken > 10 mm trotz Windböigkeit vorliegen (vgl. Tab. A im Anhang A). Die Stellung der Antennen bei Männchen in wartender Position am Baumstamm, unterstützt die genannten Argumente. Mit einem mittleren Abstand der Antennen von ~ 10 mm zum Baumstamm (Abb. 5.6a), ist ein optimales Wahrnehmen der weiblichen Sexualpheromone in der Grenzschicht gewährleistet.

Zu beachten ist, dass die Grenzschicht an der Leeseite (von Männchen bevorzugte Seite) nicht an der Körperwand anliegt, sondern in bestimmtem Winkel (φ_A) von ihr ablöst. An der Leeseite sitzende Frostspanner Männchen, befinden sich demnach nicht direkt in der strömenden Grenzschicht, sondern in entstehenden Großwirbeln (vgl. Abb. 3.6), welche wesentlich dicker sind, als die Grenzschicht. Die Grenzschichtdicke könnte mit der Größe der gebildeten Wirbel zusammenhängen. Eine zu geringe Dicke (< 10 mm bei $\sim 90^\circ$), könnte zu kleineren Wirbeln führen. Mit steigendem Re nimmt die Grenzschichtdicke ab, ebenso die Wirbelgröße (Braun, pers. Mitteilung). Wie bereits erwähnt, scheinen Männchen eine gewisse Wirbelgröße zu bevorzugen, um die Wahrnehmbarkeit des weiblichen Pheromons zu optimieren (vgl. auch Abschnitt 6.2.3). Deshalb werden Grenzschichtdicken < 10 mm anscheinend vermeiden.

Die gewählte Exposition am Baumstamm ist wichtig für die Dicke der Grenzschicht, da diese, wie erwähnt, mit zunehmender Lauflänge zunimmt. Wie aus Abb. 5.9 erkennbar ist, fallen Männchen auch aufgrund einer Position an der Luvseite der Baumstämme, in eine Grenzschichtdicke < 10 mm, da ihre Dicke an dieser Seite noch zu dünn ist. Weil nun die Grenzschichtdicke mit

steigender Windgeschwindigkeit abnimmt, sollte sich die Exposition der Männchen mit steigender Windgeschwindigkeit deutlich Richtung Luvseite verschieben, um in eine Grenzschichtdicke > 10 mm zu fallen. Diese Annahme wird durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt (vgl. Abb. 5.13a-d, Tab. 5.15, Tab. 5.16).

Wie erwähnt, scheint der Rindentypus in bestimmten Stammdurchmesserbereichen und die damit verbundene Grenzschichtart für Frostspanner Weibchen keine Rolle zu spielen. Allerdings ist durch die Annahme, einer nötigen maximal 5 mm dicken Grenzschicht, nicht erklärt, warum Baumstämme < 20 cm Durchmesser nicht besetzt werden (Abb. 5.8, Abb. 5.10). Eine Grenzschicht von 5 mm wäre bereits bei Stammdurchmessern um 5 cm erreicht. Eine Erklärung dafür wäre evtl. das zufällige Besetzen eines Baumstammes.

Durch eine Grenzschichtdicke von 5 mm, ist auf jeden Fall gewährleistet, dass das Weibchen seine Pheromone in diese abgeben kann, welche folgend von der Grenzschicht bei ihrer Ablösung in den Raum transportiert werden. Auch an der Luvseite, an welcher Frostspanner Weibchen bevorzugt sitzen, liegen Grenzschichtdicken bis 5 mm vor (Abb. 5.10).

6.2.3 Expositionsverteilung im Strömungsfeld

Für die Frostspanner sind nur die strömungsmechanischen Bereiche *unterkritisch* und *kritisch* von Bedeutung (vgl. Tab. 3.1). Abhängig von Stammdurchmesser, Rindentypus und Windgeschwindigkeit, kommt es zu unterschiedlichen Strömungsformen um den Baumstamm. Mit zunehmendem Re erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Wirbelbildung in der Grenzschicht und ihre Ablösewinkel ändern sich (Tab. 3.1). An der Luvseite (0° - 90°) setzt eine Beschleunigung der Umströmung ein, welche an der Leeseite (90° - 180°) wiederum entschleunigt wird (Abb. 3.5), wobei es zu einer rückläufigen Strömung und somit Wirbelbildung kommt (Abb. 3.6).

Bei glatten Kreiszyklindern tritt bei niedrigen Re -Werten Wirbelbildung nach der Grenzschichtablösung auf ($\sim 80^\circ$ - 180°) (vgl. Abb. 3.6, Abb. 3.8a-b). Die Umströmung rauher Kreiszyklinder weist bereits in der Grenzschicht Kleinwirbelbildung auf (turbulente Grenzschicht ab $\sim 80^\circ$), wobei sich der Ablösewinkel trotz gleicher Re -Werte nach hinten verschiebt (vgl. Abb. 3.8a-b mit Abb. 3.8e-f). Im Extremfall liegt der Ablösewinkel bei 140° , was allerdings von Stammdurchmesser, Rindenstruktur und Windgeschwindigkeit abhängt. Bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten liegt die Grenzschichtablösung vor 140° .

Wie in Abschnitt 6.1.2 erwähnt, ist die Expositionswahl der Frostspanner Männchen und Weibchen am Baustamm von der Windsituation abhängig. Der Grund für die gezielte Anordnung der Männchen an der Leeseite und der Weibchen an der Luvseite von Baumstämmen, könnte unmittelbar mit der entstehenden Strömungssituation zusammenhängen.

Frostspanner Männchen benötigen anscheinend einen entschleunigten wirbeldurchsetzten Bereich am Baustamm, um optimal Pheromone wahrzunehmen (Abb. 5.11, Tab. 5.12). Dieser Bereich liegt sowohl auf glatter, als auch auf aufgerauter/rauer Rinde nach dem Winkel der Grenzschichtablösung (φ_A) vor. 77,05% der Männchen befinden sich in dieser Zone ($p < 0,001$).

Werden Pheromone in der Grenzschicht um den Baustamm geführt, wird ein Teil mit der Grenzschichtablösung in den Raum hinaus transportiert, während ein anderer Teil, durch die nach dem Ablösewinkel entstehenden Großwirbel, an der Leeseite des Baumstammes verwirbelt wird. Die Pheromone werden also in Form der sich bildenden Wirbel verbreitet. Damit verbunden ist eine relativ lange Verweildauer der Pheromone an der Leeseite, da es zu einer rückläufigen Strömung kommt, welcher sie unterliegen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich eine dem Durchmesser der Wirbel entsprechende „Pheromonschicht“ bildet (vgl. Abb. 3.6d), welche durch ihre Dicke die Wahrnehmbarkeit für Männchen deutlich erhöht.

Ein weiterer Aspekt der Pheromonwahrnehmung bei Frostspanner Männchen ist ihre wartende Stellung am Baustamm. Die über dem Körper zusammengeklappten Flügel, stellen mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Stauzone für die Umströmung dar. Demnach kommt es zu einem der Flügelgröße entsprechendem Rückstau der pheromondurchsetzten Luft und an der Anströmungsseite entsteht eine Rückstauzone. Diese gestaute Luft strömt demnach langsam an den Flügelkanten vorbei, direkt auf die Antennen, wobei sich die der Strömung zugewandte Antenne bereits mehr oder weniger in der Rückstauzone befindet. Somit wäre eine verbesserte Wahrnehmbarkeit der in der gestauten Luft vorhandenen Pheromone möglich, da diese stark entschleunigt und über den gesamten Körper des Männchens verbreitet wären. Dies könnte auch ein Grund sein, weshalb Männchen ihre Flügel nur in wartender Stellung am Baustamm über dem Körper zusammenklappen. In Ruhe sind die Flügel über dem Körper ausgebreitet.

Frostspanner Weibchen verteilen sich signifikant häufiger vor dem Ablösewinkel (φ_A) (Tab. 5.12, Abb. 5.12) in einer laminaren Grenzschicht. Sie benötigen anscheinend eine beschleunigte Strömung, welche nur an der Luvseite eines Baumstammes entstehen kann, um eine optimale Verbreitung ihrer Pheromone im Raum zu erreichen.

Wie bereits erwähnt, werden in der Grenzschicht vorhandene Pheromone zum Teil mit der Grenzschichtablösung in den Raum hinaus transportiert. Da im vorliegenden Fall aufgrund der niedrigen Windgeschwindigkeit auch auf rauer Rinde eine laminare Grenzschicht an der Luvseite auftritt, ist damit zu rechnen, dass der Ablöswinkel deutlich vor 140° liegt, eventuell sogar zwischen 80° und 90° . Die Beschleunigung der Strömung findet im Bereich 0° - 90° statt (Abb. 3.5). Sie ist maximal bei 90° und nimmt mit größer werdendem Winkel wieder ab. Daraus folgt, dass von Frostspanner Weibchen abgegebene Pheromone durch die Strömung vom Baumstamm weg in den Raum hinaus beschleunigt werden. Somit ermöglicht eine Position an der Luvseite eines Baumstammes, eine schnelle Verbreitung der Pheromone im Raum. Desweiteren ist ihre Verbreitung über einen relativ breiten Raumabschnitt gewährleistet, da die vom Stamm abgelöste Strömung mit zunehmender Wegstrecke größer werdende Turbulenzen entwickelt und dadurch viel breiter wird (vgl. Abb. 3.2 und Abb. 3.8a, b, e,). Würden Weibchen hingegen Positionen an der Leeseite der Baumstämme beziehen, käme es durch die an dieser Seite auftretende rückläufige Strömung und die daraus entstehende Wirbelbildung, zu einer deutlich zeitverzögerten und schmaleren Ausbreitung der Lockstoffe (Totraum).

Ein weiterer Aspekt der räumlichen Pheromonverbreitung von Baumstämmen mit glatter Rinde aus, könnte das Frostspanner Weibchen selbst sein. Sein Körper wirkt in der Strömung wie ein Rauigkeitselement. Dadurch entsteht die eben beschriebene Situation, mit Turbulenzen in der abgelösten Strömung. Dies bewirkt ihre Verbreiterung und eine Zunahme der Wirbeldichte (vgl. Abb. 3.8e).

6.3 Beantwortung der Fragestellung

Die in der Fragestellung aufgestellten Hypothesen, konnten durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden. Durch Ausnutzen der Windsituation und gezieltes Anordnen der Männchen und Weibchen des Kleinen Frostspanners an Baumstämmen im Waldgebiet, wird das Investment und ein erfolgreiches Zusammentreffen zur Paarung optimiert.

Unnützes Umherfliegen der Männchen wird durch gleiche Höhenverteilungen beider Geschlechter vermieden. Männchen beziehen Positionen an einem vermutlich willkürlich gewählten Baumstamm, in denen sie von der höchst möglichen in der Luft vorhandenen Pheromonkonzentration umgeben sind. Weibchen hingegen sammeln sich in Bereichen am Baumstamm, in denen ihre Lockstoffe nicht nur in den Raum hinaus beschleunigt werden, sondern auch einen möglichst großflächigen Bereich abdecken. Somit werden bei beiden Geschlechtern vorhandene Energiere-

serven nicht unnütz eingesetzt. Sie werden von Männchen für notwendige Flugaktivität und die Kopulation benötigt. Weibchen benötigen diese für den Aufstieg in die Baumkronen zur Eiablage.

6.4 Mögliche Fehlerquellen und weiterführende Analysen

Bei der vorliegenden Arbeit ist zu beachten, dass die strömungsmechanischen Analysen von einem idealen Modell eines Kreiszyinders abgeleitet wurden. Es handelt sich dabei um Windkanalexperimente mit laminarer Anströmung. Eine exakte Entsprechung der Strömungssituation ist für Baumstämme nicht zu erwarten, sondern vielmehr eine Annäherung an die Modelle der Strömungsmechanik. So weit dies möglich war, wurden eventuell auftretende Unterschiede bei der Auswertung berücksichtigt. Desweiteren ist im Waldgebiet eher mit einer turbulenten Anströmung, als mit einer laminaren zu rechnen. Durch eine turbulente Ablösung am Baumstamm und Instabilitäten im Nachlauf, ist der weitere Verlauf der Luftmassen turbulent.

Eine genaue Analyse der im Wald herrschenden Strömungssituation könnte durch Experimente vor Ort oder mithilfe von Strömungssimulationsprogrammen durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung der Verteilung von Frostspannern an Baumstämmen im Zusammenhang mit der Wind- und Strömungssituation, wären Windkanalexperimente. Durch die kontrollierbare Umgebung dieses Versuchsaufbaus, könnten präzise Aussagen getroffen werden.

DANKSAGUNG

An erster Stelle möchte ich mich bei Ao. Univ.-Prof. Dr. Gerhard Spitzer bedanken, für eine ausgezeichnete Betreuung und Zusammenarbeit während der Dauer meiner Diplomarbeit.

An zweiter Stelle möchte ich mich bei Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Mag. Dr. Herbert Steinrück, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung an der TU Wien, bedanken, für seine Hilfe bei den Themen Fluidodynamik und Strömungsmechanik, sowie für die Beantwortung vieler Fragen zu diesen Fachgebieten.

Desweiteren möchte ich mich bei DDr. Gerd Müller, Leiter des Departements für theoretische Biologie, sowie bei Heidemarie Pollak, Sekretärin des Departements, für die freundliche Aufnahme am Departement bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei Andrea Grasl, Franz Koller und Familie Ungersböck, für die freundliche Genehmigung ihre Wälder für meine Forschungszwecke betreten zu dürfen. Außerdem bedanke ich mich bei Prof. Mag. Peter Buchner, Klemens Maria Hofbauer-Gymnasium in Katzelsdorf a.d. Leitha, für seine Ratschläge und die freundliche Zusage seine Fotos für meine Diplomarbeit verwenden zu dürfen. Weiters danke ich meinem Bruder Christoph, für seine technische Unterstützung bei der Ablichtung von Rindentypen. Ich möchte mich auch bei Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stefan Braun, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung an der TU Wien, für seine Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Vater, der mich mit vollem Einsatz bei der Datenerhebung unterstützte und ohne dessen Hilfe diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Literaturverzeichnis

Aistleitner E. 2008: Die Spanner und Eulen des Fürstentums Liechtenstein (Lepidoptera: Geometridae, Nolidae, Erebidae, Noctuidae). *Amtlicher Lehrmittelverlag, Vaduz.*

Albert R., Bogenschutz H. & König E. 1984: Untersuchungen zum Einsatz von Sexuallockstoff-Fallen zur Überwachung des Massenwechsels von *Operophtera brumata* L. (Lepid., Geometridae). *Zeitschrift für angewandte Entomologie* 98: 286-298.

Alford D. V. 2007: Pests of fruit crops: A color handbook. *Manson Publishing Ltd, London.*

Alma P. J. 1970: A study of the activity and behaviour of the winter moth, *Operophtera brumata* (L.) (Lep., Hydriomenidae). *Entomologist's Monthly Magazine* 105: 258-265.

Batschelet E. 1981: Circular statistics in biology. *Academic Press, London.*

Behara S. & Mittal S. 2011: Transition of the boundary layer on a circular cylinder in the presence of a trip. *Journal of Fluids and Structures* 27: 702-715.

Blomquist G. J. & Bangères A.-G. 2010: Insect Hydrocarbons: Biology, biochemistry and chemical ecology. *Cambridge University Press, New York.*

Boppré M. 1991: Pheromonbiologie: Chemoökologischer Kontext der Sexualpheromone von Lepidopteren. *Verhandlungen der deutschen Zoologischen Gesellschaft* 84: 201-211.

<http://www.buerkle.de>

Buse A. & Good J. E. G. 1996: Synchronization of larval emergence in winter moth (*Operophtera brumata* L.) and budburst in pedunculate oak (*Quercus robur* L.) under simulated climate change. *Ecological Entomology* 21: 335-343.

Buse A., Good J. E. G., Dury S. & Perrins C. M. 1998: Effects of elevated temperature and carbon dioxide on the nutritional quality of leaves of oak (*Quercus robur* L.) as food for the winter moth (*Operophtera brumata* L.). *Functional Ecology* 12: 742-749.

Chinery M. 1994: Natur Enzyklopädie: Pflanzen und Tiere in Europa. *RVG-Interbook Verlagsgesellschaft mbH, Remseck bei Stuttgart.*

Connell J. & Steyrer G. 2007: Raupenfallen-Untersuchung 2006: Artenspektrum von Schmetterlingen an Laubbäumen. *Forstschutz Aktuell* 38: 12-17.

Cuming F. G. 1961: The distribution, life history, and economic importance of the winter moth, *Operophtera brumata* (L.) (Lepidoptera, Geometridae) in Nova Scotia. *Canadian Entomologist* 93: 135-142.

Dempster J. P. 1975: Animal population ecology. *Academic Press, London.*

Dierl J. & Reichholf J. 1977: Die Flügelreduktion bei Schmetterlingen als Anpassungsstrategie. *Spixiana* 1: 27-40.

Edland T. 1971: Wind dispersal of the winter moth larvae *Operophtera brumata* L. (Lep., Geometridae) and its relevance to control measures. *Norsk Entomologist Tidsskrift* 18: 103-105.

<http://www.faunaeur.org>

Feeny P. P. 1968: Effect of oak tannins on larval growth of the winter moth *Operophtera brumata*. *Journal of Insect Physiology* 14: 805-817.

Frank J. H. 1967: The insect predators of the pupal stage of the winter moth, *Operophtera brumata* (L.) (Lepidoptera: Hydriomenidae). *Journal of Animal Ecology* 36: 375-389.

Graf B., Borer F., Höpli H. U., Höhn H. & Dorn S. 1995: The winter moth, *Operophtera brumata* L. (Lep., Geometridae), on apple and cherry: spatial and temporal aspects of recolonization in autumn. *Journal of Applied Entomology* 119: 295-301.

Habermehl G. G., Hammann P. E., Krebs H. C. & Ternes W. 2008: Naturstoffchemie: Eine Einführung, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. *Springer Verlag, Berlin Heidelberg*.

Hagen S. B., Jepsen J. U., Ims R. A. & Yoccoz N. G. 2007: Shifting altitudinal distribution of outbreak zones of winter moth *Operophtera brumata* in sub-arctic birch forest: a response to recent climate warming? *Ecography* 30: 299-307.

Hand S. C., Ellis N. W. & Stoakley J. T. 1987: Development of a pheromone monitoring system for the winter moth, *Operophtera brumata* (L.), in apples and in sitka spruce. *Crop Protection* 6: 191-196.

Hänel D. 2004: Molekulare Gasdynamik: Einführung in die kinetische Theorie der Gase und Lattice-Boltzmann-Methoden. *Springer Verlag, Berlin Heidelberg*.

Heisswolf A., Käär M., Klemola T. & Ruohomäki K. 2010: Local outbreaks of *Operophtera brumata* and *Operophtera fagata* cannot be explained by low vulnerability to pupal predation. *Agricultural and Forest Entomology* 12: 81-87.

Herwig H. 2004: Strömungsmechanik A-Z: Eine systematische Einordnung von Begriffen und Konzepten der Strömungsmechanik, 1. Auflage. *Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden*.

Hohmann R. & Kluge U. 2010: Umweltbürgerinfo: NAOM-Merkblatt-Nr. 97.10. *Naturwissenschaftliche Arbeitsgemeinschaft Obertshausen – Mosbach e.V., Obertshausen*.

Holliday N. J. 1977: Population ecology of winter moth (*Operophtera brumata*) on apple in relation to larval dispersal and time of bud burst. *Journal of Applied Ecology* 14: 803-813.

Holliday N. J. 1983: Effects of temperature on winter moth pupae, *Operophtera brumata* (Lepidoptera: Geometridae). *Canadian Entomologist* 115: 243-249.

<http://www.hortipendium.de>

Hucho W.-H. 2011: Aerodynamik der stumpfen Körper: Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis, 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. *Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden*.

Jain S. C., Roelofs W. L. & Meinwald J. 1983: Synthesis of a sex attractant pheromone from a geometrid moth, *Operophtera brumata* (the winter moth). *Journal of Organic Chemistry* 48: 2274-2275.

Jepsen J. U., Hagen S. B., Ims R. A. & Yoccoz N. G. 2008: Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophtera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest: evidence of a recent outbreak range expansion. *Journal of Animal Ecology* 77: 257-264.

Kerslake J. E., Kruuk L. E. B., Hartley S. E. & Woodin S. J. 1996: Winter moth (*Operophtera brumata* (Lepidoptera: Geometridae)) outbreaks on Scottish heather moorlands: effects of host plant and parasitoids on larval survival and development. *Bulletin of Entomological Research* 86: 155-164.

Kimberling D. N. & Miller J. C. 1988: Effects of temperature on larval eclosion of the winter moth, *Operophtera brumata*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 47: 249-254.

Kimberling D. N., Miller J. C. & Penrose R. L. 1986: Distribution and parasitism of winter moth, *Operophtera brumata* (Lepidoptera: Geometridae), in western Oregon. *Environmental Entomology* 15: 1042-1046.

Knauf W., Bestmann H. J. & Vostrowsky O. 1984: Responses of male winter moth (*Operophtera brumata*) to their sex attractant (3Z,6Z,9Z)-1,3,6,9-nonadecatetraene and to some structural analogues. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 35: 208-210.

<http://www.kob-bavendorf.de>

Krehan H., Tomiczek C., Steyrer G. & Perny B. 2011: Wie schädlich sind „Forstschädlinge“?: Ökologie prominenter Borkenkäferarten (Buchdrucker, Kupferstecher, Lärchen/Kiefer-Borkenkäfer) sowie wichtiger Blatt- und Nadelfresser. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft & Wallner R. M. (eds): Wald: Biotop und Mythos, Grüne Reihe Band 23. *Böhlau Verlag Ges.m.b.H. & Co. KG, Wien*. 175-188.

<http://www.lepiforum.eu>

<http://www.lrz.de>

MacPhee A., Newton A. & McRae K. B. 1988: Population studies on the winter moth *Operophtera brumata* (L.) (Lepidoptera: Geometridae) in apple orchards in Nova Scotia. *Canadian Entomologist* 120: 73-83.

Merrick R. & Bitsuamlak G. 2008: Control of flow around a circular cylinder by the use of surface roughness: A computational and experimental approach. *4th International Conference, Advances on Wind and Structures, Jeju Korea*.

Millar J. G. 2010: Polyene hydrocarbons, epoxides, and related compounds as components of lepidopteran pheromone blends. In: Blomquist G. J. & Bangères A.-G. (eds): Insect hydrocarbons: Biology, biochemistry and chemical ecology. *Cambridge University Press, New York*. 390-447.

Paus H. J. 2007: Physik in Experimenten und Beispielen, 3. aktualisierte Auflage. *Hanser Verlag, München*.

Peterson N. A. & Nilssen A. C. 1998: Late autumn eclosion in the winter moth *Operophtera brumata*: compromise of selective forces in life-cycle timing. *Ecological Entomology* 23: 417-426.

Platz E. 1999: Identifizierung und Synthese von Insektenpheromonen. *Dissertation Universität Hamburg*.

<http://www.propellersafety.com>

Raymond B. & Hails R. S. 2007: Variation in plant resource quality and the transmission and fitness of the winter moth, *Operophtera brumata* nucleopolyhedrovirus. *Biological Control* 41: 237-245.

Raymond B., Vanbergen A., Watt A., Hartley S. E., Cory J. S. & Hails R. S. 2002: Escape from pupal predation as a potential cause of outbreaks of the winter moth, *Operophtera brumata*. *Oikos* 98: 219-228.

Rein G. & Zech J. 1975: Wunderwelt der Schmetterlinge: Ein Führer zu unseren heimischen Schmetterlingen. *Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co., Stuttgart*.

Roelofs W. L., Hill A. S., Linn C. E., Meinwald J., Jain S. C., Herbert H. J. & Smith R. F. 1982: Sex pheromone of the winter moth, a geometrid with unusually low temperature precopulatory responses. *Science* 217: 657-659.

Rubtsov V. V. & Utkina I. A. 2011: Long-term dynamics of *Operophtera brumata* L. in the oak stands of Forest-Steppe. *Contemporary Problems of Ecology* 4: 777-783.

Schlichting H. & Gersten K. 2000: Boundary-layer theory, 8th revised and enlarged edition. *Springer Verlag, Berlin Heidelberg*.

Sigloch H. 2009: Technische Fluidmechanik, 7. Auflage. *Springer Verlag, Berlin Heidelberg*.

Singer M. C. & Parmesan C. 2010: Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy? *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365: 3161-3176.

Speyer W. 1938: Beiträge zur Biologie des Kleinen Frostspanners (*Cheimatobia brumata*). *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 48: 449-471.

Sumer B. M. & Ferdsoe J. 2006: Hydrodynamics around cylindrical structures, Revised edition. *Advanced Series on Ocean Engineering* 26. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore*.

Tenow O., Nilssen A. C., Bylund H. & Hogstad O. 2007: Waves and synchrony in *Epirrita autumnata* / *Operophtera brumata* outbreaks. I. Lagged synchrony: regionally, locally and among species. *Journal of Animal Ecology* 76: 258-268.

Tikkanen O.-P., Carr T. G. & Roininen H. 1999: Factors influencing the distribution of a generalist spring-feeding moth, *Operophtera brumata* (Lepidoptera: Geometridae), on host plants. *Environmental Entomology* 28: 461-469.

Tikkanen O.-P. & Julkunen-Tiitto R. 2003: Phenological variation as protection against defoliating insects: the case of *Quercus robur* and *Operophtera brumata*. *Oecologia* 136: 244-251.

Tikkanen O.-P. & Lyytikäinen-Saarenmaa P. 2002: Adaptation of a generalist moth, *Operophtera brumata*, to variable budburst phenology of host plants. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 103: 123-133.

Tikkanen O.-P., Niemelä P. & Keränen J. 2000: Growth and development of a generalist insect herbivore, *Operophtera brumata*, on original and alternative host plants. *Oecologia* 122: 529-536.

Tikkanen O.-P. & Roininen H. 2001: Spatial pattern of outbreaks of *Operophtera brumata* in eastern Fennoscandia and their effects on radial growth of trees. *Forest Ecology and Management* 146: 45-54.

Tikkanen O.-P., Roininen H., Niemelä P., Tahvanainen J. & Zinovjev A. 1998: Use of host plants by *Operophtera brumata* L. (Lep., Geometridae) during the first recorded outbreak in the subcontinental boreal zone of Fennoscandia. *Journal of Applied Entomology* 122: 247-253.

- Topp W. & Kirsten K.** 1991: Synchronisation of pre-imaginal development and reproductive success in the winter moth, *Operophtera brumata* L. *Journal of Applied Entomology* 111: 137-146.
- Uvarov B. P.** 1931: Insects and climate. *Transactions of the Royal Entomological Society of London* 79: 1-232.
- Vanbergen A. J., Raymond B., Pearce I. S. K., Watt A. D., Hails R. S. & Hartley S. E.** 2003: Host shifting by *Operophtera brumata* into novel environments leads to population differentiation in life-history traits. *Ecological Entomology* 28: 604-612.
- Van Dongen S., Backeljau T., Matthysen E. & Dhondt A. A.** 1997: Synchronization of hatching date with budburst of individual host trees (*Quercus robur*) in the winter moth (*Operophtera brumata*) and its fitness consequences. *Journal of Animal Ecology* 66: 113-121.
- Van Dongen S., Matthysen E., Sprengers E. & Dhondt A. A.** 1998: Mate selection by male winter moths *Operophtera brumata* (Lepidoptera, Geometridae): Adaptive male choice or female control? *Behaviour* 135: 29-42.
- Van Dongen S., Sprengers E., Löfstedt C. & Matthysen E.** 1999: Fitness components of male and female winter moth (*Operophtera brumata* L.) (Lepidoptera, Geometridae) relative to measures of body size and asymmetry. *Behavioral Ecology* 10: 659-665.
- Varley C. G., Gradwell G. R. & Hassel M. P.** 1973: Insect population ecology: an analytical approach. *Blackwell Scientific Publications, Oxford*.
- Watt A. D., Evans R. & Varley T.** 1992: The egg laying behaviour of a native insect, the winter moth *Operophtera brumata* (L.) (Lep., Geometridae), on an introduced tree species, Sitka spruce *Picea sitchensis*. *Journal of Applied Entomology* 114: 1-4.
- Watt A. D. & McFarlane A. M.** 2002: Will climate change have a different impact on different trophic levels? Phenological development of the winter moth *Operophtera brumata* and its host plants. *Ecological Entomology* 27: 254-256.
- Wint W.** 1983: The role of alternative host-plant species in the life of a polyphagous moth, *Operophtera brumata* (Lepidoptera: Geometridae). *Journal of Animal Ecology* 52: 439-450.

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1 Kleiner Frostspanner als Imago und Larve. **(a)** Adultes Männchen, **(b)** adultes Weibchen, **(c)** Männchen und Weibchen bei Kopulation am Baumstamm, **(d)** Larve.
[Fotos: Peter Buchner] (S. 23)

ABBILDUNG 2.2 Lebenszyklus des Kleinen Frostspanners innerhalb von 12 Monaten (Januar bis Dezember), mit den vier Phasen seiner Entwicklung.
[nach *Chinery* (1994), S. 359] (S. 24)

ABBILDUNG 3.1 c_W als Funktion von Re für Kreiszyylinder mit rauher (rough) und glatter (smooth) Oberfläche. (c_W Widerstandsbeiwert, Re Reynolds-Zahl)
[<http://www.propellersafety.com/wordpress/wp-content/uploads/drag-reynolds-number-chart.gif> (07.04.2012, 19:45 Uhr MESZ) (verändert)] (S. 29)

ABBILDUNG 3.2 Negativ Ablichtung einer Kármán'schen Wirbelstraße in Öl. Im Ablösegebiet hinter dem Kreiszyylinder entstehen mit zunehmender Entfernung größer werdende Wirbel.
[<http://www.lrz.de/~hakenesch/bilder/wirbelstrasse.jpg> (18.04.2012, 17:21 Uhr MESZ) (verändert)] (S. 30)

ABBILDUNG 3.3 Strömung um einen Kreiszyylinder. **(a)** Laminare Strömung ohne Wirbelbildung in der Grenzschicht oder im Ablösegebiet, **(b)** subkritische Strömung mit laminarer Grenzschicht und turbulent werdendem Ablösegebiet.
[aus *Hucho* (2011), S. 95] (S. 31)

ABBILDUNG 3.4 Strömung um einen Kreiszyylinder oder eine Kugel mit prinzipiellem Stromlinien- und Druckverlauf. Druckauftrag mit Pfeilen normal zur Oberfläche. **(a)** Laminare Grenzschicht mit Ablöswinkel $80^\circ < \varphi_A < 90^\circ$, **(b)** turbulente Grenzschicht nach Unebenheit (Stolperdraht) mit Ablöswinkel $110^\circ < \varphi_A < 120^\circ$. (φ_A Ablöswinkel der Grenzschicht, **S** Staupunkt)
[aus *Sigloch* (2009), S. 103 (verändert)] (S. 31)

ABBILDUNG 3.5 Geschwindigkeitsprofile an einem umströmten stumpfen Körper. Beschreibung siehe Text. **(A)** Punkt der Grenzschichtablösung, **(B)** Bereich des Druckabfalls und der Beschleunigung, **(G)** Punkt des niedrigsten Drucks und der höchsten Geschwindigkeit, **(n)** Geschwindigkeitsprofile, **(V)** Bereich des Druckanstiegs und der Verzögerung, **(WP)** Wendepunkt der Fluidteilchen
[aus *Sigloch* (2009), S. 101] (S. 32)

ABBILDUNG 3.6 Entwicklung der Grenzschichtablösung an der Leeseite des Kreiszyinders mit der Zeit. **(a)** Die rücklaufende Bewegung setzt ein, **(b)** der Totraum wird breiter, da sich die Rücklaufbewegung nach vorne schiebt, **(c)** Bildung eines großen Wirbels durch die Rückströmung, **(d)** Größenzunahme des Wirbels und weitere Abdrängung der Grenzschicht von der Kreiszyylinderwand. Wirbel bilden sich an der Körperwand der Leeseite des Kreiszyinders vom Ablösepunkt bis hin zum Mittelpunkt (180°).
[aus *Schlichting & Gersten* (2000), S. 40 (verändert)] (S. 33)

ABBILDUNG 3.7 Strömung um einen Kreiszyylinder. Strömungsbereiche unterkritisch, kritisch, überkritisch und transkritisch in Abhängigkeit von Re . Eingezeichnet ist die kritische Reynolds-Zahl, die den ungefähren Umschlagsbereich der laminaren in eine turbulente Grenzschicht angibt. (c_W Widerstandsbeiwert, Re Reynolds-Zahl, Re_{kr} kritische Reynolds-Zahl)
[aus *Behara & Mittal* (2011) (verändert nach *Hucho* (2011), S. 97)] (S. 34)

ABBILDUNG 3.8 Strömung um einen Kreiszyylinder bei unterschiedlichem Re . **(a-d)** Glatter Kreiszyylinder, **(e-i)** Kreiszyylinder mit Rauigkeitselement bei 55° , aufgrund dessen ω_z schon bei niedrigen Re -Werten zunimmt. (Re Reynolds-Zahl)
[aus Behara & Mittal (2011) (verändert)] (S. 36)

ABBILDUNG 4.1 Schematische Karte des Untersuchungsbereichs. Eingezeichnet sind die Erhebungsgebiete (Gebiet A-C), die Himmelsrichtungen, sowie die Höhenlinien und der Mittelpunkt des Untersuchungsreichs. Die Breite der Forstwege ist stark überzeichnet. (S. 39)

ABBILDUNG 4.2 Rindenstrukturen untersuchter Baumarten. **(a)** Glatte Rinde einer Buche, **(b)** glatte Rinde eines Strauches, **(c)** aufgeraute Rinde einer Buche, **(d)** raue Rinde einer Föhre, **(e)** raue Rinde einer Esche.
[Fotos: Christoph Grill] (S. 41)

ABBILDUNG 5.1 Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\text{♂}} = 61$) auf den Rindentypen glatt ($n = 36$), aufgeraut ($n = 4$) und rau ($n = 21$) im Bezug zum Stammdurchmesser [cm]. Der Stammdurchmesser ist in 5 cm-Klassen eingeteilt. (S. 46)

ABBILDUNG 5.2 Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_{\text{♀}} = 15$) auf den Rindentypen glatt ($n = 7$), aufgeraut ($n = 2$) und rau ($n = 6$) im Bezug zum Stammdurchmesser [cm]. Der Stammdurchmesser ist in 5 cm-Klassen eingeteilt. (S. 47)

ABBILDUNG 5.3 Expositionsverteilung [$^\circ$] der Frostspanner Männchen ($n_{\text{♂}} = 61$) an Baumstämmen nach Himmelsrichtung und Windrichtung. **(a)** Exposition nach Himmelsrichtung wie beobachtet. 0° bezeichnet in diesem Fall die Nordrichtung. Eingezeichnet ist der Summenvektor der gesamten Kreisverteilung (0° - 360°). **(b)** Abgeleitete Exposition relativ zur Windrichtung. Der Pfeil über dem Kreisdiagramm gibt die Windrichtung an. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilung (jeweils 0° - 180°). Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.5 zusammengefasst. (\mathbf{V}_G Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, \mathbf{V}_L Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{V}_R Summenvektor des rechten Halbkreises, ** $p < 0,01$) (S. 49)

ABBILDUNG 5.4 Expositionsverteilung [$^\circ$] der Frostspanner Weibchen ($n_{\text{♀}} = 15$) an Baumstämmen nach Himmelsrichtung und Windrichtung. **(a)** Exposition nach Himmelsrichtung wie beobachtet. 0° bezeichnet in diesem Fall die Nordrichtung. Eingezeichnet ist der Summenvektor der gesamten Kreisverteilung (0° - 360°). **(b)** Abgeleitete Exposition relativ zur Windrichtung. Der Pfeil über dem Kreisdiagramm gibt die Windrichtung an. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilung (jeweils 0° - 180°). Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.6 zusammengefasst. (\mathbf{V}_G Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, \mathbf{V}_L Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{V}_R Summenvektor des rechten Halbkreises, ** $p < 0,01$) (S. 50)

ABBILDUNG 5.5 Höhenverteilung [cm] der Frostspanner Männchen ($n_{\text{♂}} = 53$) und Weibchen ($n_{\text{♀}} = 14$) an Baumstämmen. Für beide Geschlechter ist die mittlere Höhe mit Standardabweichung eingezeichnet ($\text{♂} \bar{x} = 134,9$ cm, $s = 50,3$; $\text{♀} \bar{x} = 143,6$ cm, $s = 68,9$). Die Höhenverteilung ist in 20 cm-Klassen eingeteilt. Auf Sträuchern sitzende Frostspanner sind in der Auswertung nicht berücksichtigt. (S. 52)

ABBILDUNG 5.6 Schematische Darstellung der am Baumstamm sitzenden Frostspanner. **(a)** Wartendes Männchen mit über dem Körper zusammengeklappten Flügeln. Perspektive von oben. Eingezeichnet ist der ungefähre mittlere Abstand [mm] zwischen Antennenspitze und Baumstamm. **(b)** Sitzendes Weibchen mit leicht aufgerichtetem Thorax. Perspektive von seitlich. Eingezeichnet ist der ungefähre mittlere Abstand [mm] zwischen dorsal gelegenen Abdomen und Baumstamm. (S. 54)

ABBILDUNG 5.7 Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\text{♂}} = 61$) auf Stammdurchmessern [cm] in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [m/s]. Individuen auf glatter und rauher Rinde sind durch Graustufen kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauher Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Re -Bereiche von 10^3 bis $5 \cdot 10^4$ (blassgraue Linien), sowie die logarithmische Funktionslinie (dunkelgraue Linie), über welche Quadrate zur Analyse des Re -Bereichs gelegt sind. Diese berücksichtigen eine Variation der Windgeschwindig-

keit von 0,8 m/s (Höhe der Quadrate). Der Verlauf der laminaren Grenzschicht mit einer Dicke von 10 mm (Ablösung bei 90°), sowie der Verlauf der turbulenten Grenzschicht mit einer Dicke von 10 mm (angenommene Ablösung bei 120°) (gestrichelte Linien) bei entsprechendem Stammdurchmesser und vorherrschender Windgeschwindigkeit, ist markiert (es handelt sich um Näherungen). Der doppelseitige Pfeil zwischen den Stammdurchmessern 15 cm und 20 cm, veranschaulicht die Möglichkeit, abhängig von der Exposition am Baumstamm, in eine Grenzschichtdicke < 10 mm zu fallen, falls die Windgeschwindigkeit zunimmt. Bezüglich Grenzschichtdicke, vgl. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4. (S. 56)

ABBILDUNG 5.8 Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) auf Stammdurchmessern [cm] in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [m/s]. Individuen auf glatter und rauer Rinde sind durch Graustufen kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauer Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Re -Bereiche von 10^3 bis $3 \cdot 10^4$ (blassgraue Linien). Der Verlauf der laminaren Grenzschicht mit einer Dicke von 5 mm (Ablösung bei 90°), sowie der Verlauf der turbulenten Grenzschicht mit einer Dicke von 5 mm (angenommene Ablösung bei 120°) (gestrichelte Linien) bei entsprechendem Stammdurchmesser und vorherrschender Windgeschwindigkeit, ist markiert (es handelt sich um Näherungen). Bezüglich Grenzschichtdicke, vgl. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4. (S. 57)

ABBILDUNG 5.9 Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\varphi} = 61$) in entstehenden Grenzschichtdicken und in Abhängigkeit des Stammdurchmessers [cm] und der Windgeschwindigkeit [m/s]. An der Luv- und Lee-seite sitzenden Männchen, sowie Windgeschwindigkeiten sind durch unterschiedliche Symbole kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauer Rinde sind zusammengefasst. Aufgetragen ist die errechnete laminare Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit glatter Rinde, sowie für in Frage kommende Baumstämme mit rauer Rinde (Luvseite) (vgl. Tab. 5.10) und die errechnete turbulente Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit rauer Rinde. Für Männchen, die sich an der Leeseite (nach φ_A) glatter Baumstämme befinden, wurde mit einem Strömungsweg der laminaren Grenzschicht bis 90° gerechnet, da die Grenzschicht dort ablöst und Verwirbelungen an der Leeseite entstehen. Bei Individuen auf Baumstämmen mit rauer Rinde an der Leeseite nach φ_A (~140°), wurde mit einer turbulenten Grenzschicht mit Ablösung bei 140° gerechnet. Der tatsächliche Strömungsweg (von 0° bis zur Exposition) wurde zur Berechnung für Individuen vor den jeweiligen Ablösewinkeln herangezogen. Eingezeichnet ist die kritische Grenzschichtdicke (10 mm, gestrichelte horizontale Linie) und die Übergangsbereiche (graue Flächen), in welchen die jeweilige Grenzschichtart bei gemittelter Windgeschwindigkeit eine Dicke von 10 mm erreicht; im Bereich A die turbulente Grenzschicht bei $L \approx 15$ -20 cm und im Bereich B die laminare Grenzschicht bei $L \approx 35$ -45 cm. Vgl. auch Abb. 5.7. (A Übergangsbereich, in welchem die turbulente Grenzschicht dicker als 10 mm wird, B Übergangsbereich, in welchem die laminare Grenzschicht dicker als 10 mm wird) (S. 59)

ABBILDUNG 5.10 Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) in entstehenden Grenzschichtdicken in Abhängigkeit des Stammdurchmessers [cm] und der Windgeschwindigkeit [m/s]. An der Luv- und Leeseite sitzenden Weibchen, sowie Windgeschwindigkeiten sind durch unterschiedliche Symbole kenntlich gemacht. Aufgeraute und rauer Rinde sind zusammengefasst. Aufgetragen ist die errechnete laminare Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit glatter Rinde, sowie für in Frage kommende Baumstämme mit rauer Rinde (Luvseite) (vgl. Tab. 5.10) und die errechnete turbulente Grenzschichtdicke [mm] für Baumstämme mit rauer Rinde. Für Weibchen, die sich an der Leeseite (nach φ_A) glatter Baumstämme befinden, wurde mit einem Strömungsweg der laminaren Grenzschicht bis 90° gerechnet, da die Grenzschicht dort ablöst und Verwirbelungen an der Leeseite entstehen. Bei Individuen auf Baumstämmen mit rauer Rinde an der Leeseite nach φ_A (~140°), wurde mit einer turbulenten Grenzschicht mit Ablösung bei 140° gerechnet. Der tatsächliche Strömungsweg (von 0° bis zur Exposition) wurde zur Berechnung für Individuen vor den jeweiligen Ablösewinkeln herangezogen. Eingezeichnet ist die kritische Grenzschichtdicke (5 mm, gestrichelte horizontale Linie). Vgl. auch Abb. 5.8. (S. 61)

ABBILDUNG 5.11 Nach Windrichtung abgeleitete Expositionverteilung [°] der Frostspanner Männchen ($n_{\varphi} = 61$) im Strömungsfeld um den Baumstamm. Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kenntlich gemacht sind Sträucher und Positionen, an denen die Grenzschichtdicke aufgrund der Position, des Stammdurchmessers und der vorherrschenden Windgeschwindigkeit < 10 mm beträgt. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils 0°-180°), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung. (a) Positionen im Strömungsfeld auf glatter Rinde ($n = 36$). Die Summenvektoren V_L und V_R wurden ohne Sträucher berechnet. Eingezeichnet ist der Summenvektor für Sträucher (gestrichelter Vektor). Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_A < 90^\circ$. (b) Positionen im Strömungsfeld auf

aufgerauter/rauer Rinde (zusammengefasst) ($n = 25$). Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_A < 140^\circ$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.11 zusammengefasst. (δ Grenzschichtdicke, φ_A Ablösewinkel, \mathbf{V}_L Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{V}_R Summenvektor des rechten Halbkreises, \mathbf{V}_{ST} Summenvektor für Sträucher, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 62)

ABBILDUNG 5.12 Nach Windrichtung abgeleitete Expositionsverteilung [$^\circ$] der Frostspanner Weibchen ($n_\varnothing = 15$) im Strömungsfeld um den Baumstamm. Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kennlich gemacht sind Sträucher und Positionen, an denen die Grenzschichtdicke aufgrund der Position, des Stammdurchmessers und der vorherrschenden Windgeschwindigkeit < 5 mm beträgt. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils 0° - 180°), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung. (a) Positionen im Strömungsfeld auf glatter Rinde ($n = 7$). Die Summenvektoren \mathbf{V}_L und \mathbf{V}_R wurden ohne Sträucher berechnet. Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_{A1} < 90^\circ$ und bei $\varphi_{A2} \approx 110^\circ$ für den Strauch. (b) Positionen im Strömungsfeld auf aufgerauter/rauer Rinde (zusammengefasst) ($n = 8$). Die Grenzschichtablösung liegt bei $80^\circ < \varphi_A < 140^\circ$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.13 zusammengefasst. (δ Grenzschichtdicke, φ_A Ablösewinkel, \mathbf{V}_L Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{V}_R Summenvektor des rechten Halbkreises, * $p < 0,05$) (S. 64)

ABBILDUNG 5.13 Expositionsverteilung [$^\circ$] der Frostspanner Männchen ($n_\delta = 61$) an Baumstämmen nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit [m/s]. Die Kreisdiagramme zeigen die Anordnung der Frostspanner Männchen an Baumstämmen bei den Windgeschwindigkeiten (a) $c \leq 0,4$ m/s ($n = 16$), (b) $c = 0,5$ -1 m/s ($n = 30$), (c) $c = 1$ -2 m/s ($n = 7$) und (d) $c > 2$ m/s ($n = 8$). Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kennlich gemacht sind Frostspanner auf glatter und rauer Rinde, sowie auf Sträuchern. Aufgeraute und aufgeraute/raue Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils 0° - 180°), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung, deren Bereich durch Graustufen hervorgehoben ist. Die Grenzschichtablösung liegt für glatte Rinde bei $80^\circ < \varphi_{A1} < 90^\circ$ und für rauer Rinde bei $80^\circ < \varphi_{A2} < 140^\circ$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.15 zusammengefasst. (φ_A Ablösewinkel, c Windgeschwindigkeit, \mathbf{V}_L Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{V}_R Summenvektor des rechten Halbkreises, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 66)

ABBILDUNG 5.14 Expositionsverteilung [$^\circ$] der Frostspanner Weibchen ($n_\varnothing = 15$) an Baumstämmen nach Windrichtung und Windgeschwindigkeit [m/s]. Die Kreisdiagramme zeigen die Anordnung der Frostspanner Weibchen an Baumstämmen bei den Windgeschwindigkeiten (a) $c \leq 0,4$ m/s ($n = 11$), (b) $c \geq 0,5$ m/s ($n = 4$). Der Pfeil über den Kreisdiagrammen gibt die Windrichtung an. Kennlich gemacht sind Frostspanner auf glatter und aufgerauter/rauer Rinde, sowie auf Sträuchern. Aufgeraute und raue Rinde sind zusammengefasst. Eingezeichnet sind die Summenvektoren der linken und rechten Hälfte der Kreisverteilungen (jeweils 0° - 180°), sowie die Winkel der Grenzschichtablösung, deren Bereich durch Graustufen hervorgehoben ist. Die Grenzschichtablösung liegt für glatte Rinde bei $80^\circ < \varphi_{A1} < 90^\circ$, für raue Rinde bei $80^\circ < \varphi_{A2} < 140^\circ$ und für den Strauch bei $\varphi_{A3} \approx 110^\circ$. Die Daten der Kreisdiagramme sind in Tab. 5.17 zusammengefasst. (φ_A Ablösewinkel, c Windgeschwindigkeit, \mathbf{V}_L Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{V}_R Summenvektor des rechten Halbkreises, ** $p < 0,01$) (S. 68)

ABBILDUNG A Verteilung der Forstspanner Männchen im *Re*-Bereich. Auf der primären Ordinate (links) ist die Windgeschwindigkeit [m/s] (c -Wert) aufgetragen und auf der sekundären Ordinate (rechts) der Stammdurchmesser [cm] (L -Wert), welche jeweils durch Graustufen kenntlich gemacht sind. Eingezeichnet ist die zunehmende Überlappung des *Re*-Bereichs (gestrichelte Linien) mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Die Abszisse ist logarithmisch skaliert. (c Windgeschwindigkeit, L Stammdurchmesser, Re Reynolds-Zahl) (S. 97)

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1 Systematik des Kleinen Frostspanners.

[nach http://www.hortipendium.de/Kleiner_Frostspanner (22.04.2012, 18:07 Uhr MESZ); http://www.faunaeur.org/full_results.php?id=445091 (03.05.2012, 13:42 Uhr MESZ)] (S. 21)

TABELLE 3.1 Strömungsformen am glatten Kreiszyylinder in Abhängigkeit von Re . Angegeben ist der Re -Bereich, dem eine Strömungsform zugeteilt wird, mit dem jeweiligen Winkel der Grenzschichtablösung. (φ_A Winkel der Grenzschichtablösung, Re Reynolds-Zahl)

[nach *Schlichting & Gersten* (2000), S. 22; *Sumer & Ferdsoe* (2006), S. 2; *Hucho* (2011), S. 104] (S. 37)

TABELLE 4.1 Skala zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit ohne Messgerät. Angegeben sind die den Graden zugeteilten Windgeschwindigkeiten [m/s] und der für weitere Analysen festgelegte Referenzwert. (c Windgeschwindigkeit, c_{rwt} Referenzwert) (S. 42)

TABELLE 4.2 Mittleres h [cm] in der Rindenstruktur erhobener Baumarten mit aufgerauter und rauer Rinde an Stämmen mit $L \leq 30$ cm und $L > 30$ cm. (h Höhe der Oberflächenstruktur, L Stammdurchmesser) (S. 44)

TABELLE 5.1 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_\delta = 61$) und Weibchen ($n_\varphi = 15$) auf Baumarten und Sträuchern. Verglichen sind Männchen und Weibchen auf den jeweiligen Baumarten ($df = 6$). Angegeben ist die Individuenzahl pro Baumart und der Rindentypus der jeweiligen Baumart, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau. (S. 45)

TABELLE 5.2 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_\delta = 61$) auf Rindentypen im Bezug zum Stammdurchmesser. Verglichen ist glatte und aufgeraute/raue Rinde bezüglich des Stammdurchmessers ($df = 3$). Aufgeraute und raue Rinde sind zusammengefasst. Der Stammdurchmesser [cm] ist in 4 Klassen eingeteilt. Angegeben ist die Individuenzahl pro Durchmesserklasse, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau. (L Stammdurchmesser) (S. 47)

TABELLE 5.3 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Weibchen ($n_\varphi = 15$) auf Rindentypen im Bezug zum Stammdurchmesser. Verglichen ist glatte und aufgeraute/raue Rinde bezüglich des Stammdurchmessers ($df = 3$). Aufgeraute und raue Rinde sind zusammengefasst. Der Stammdurchmesser [cm] ist in 4 Klassen eingeteilt. Angegeben ist die Individuenzahl pro Durchmesserklasse, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau. (L Stammdurchmesser) (S. 48)

TABELLE 5.4 Minima und Maxima des Stammdurchmessers [cm] der von Frostspanner Männchen ($n_\delta = 53$) und Weibchen ($n_\varphi = 14$) besetzten Rindentypen. Angegeben ist die Individuenzahl pro Rindentypus. Sträucher sind in der Auswertung nicht berücksichtigt. (L Stammdurchmesser) (S. 49)

TABELLE 5.5 Daten zur Männchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.3. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test für die abgeleitete Kreisverteilung relativ zur Windrichtung (Abb. 5.3b). Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der 180° -Positionen ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VG} Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VG} kritische Vektorlänge des Gesamtsummenvektors, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, F_{LR} Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, ** $p < 0,01$) (S. 50)

TABELLE 5.6 Daten zur Weibchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.4. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test für die abgeleitete Kreisverteilung relativ zur Windrichtung (Abb. 5.4b). Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Strauch durchgeführt. Die Aufteilung der 0° -Position ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (\mathbf{a}_{VG} Summenvektor der gesamten Kreisverteilung, \mathbf{a}_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{a}_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, \mathbf{a}_{VG} kritische Vektorlänge des Gesamtsummenvektors, \mathbf{a}_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, \mathbf{a}_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, $\mathbf{df}_1 / \mathbf{df}_2$ Freiheitsgrade der F-Verteilung, $\mathbf{F}_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 51)

TABELLE 5.7 F-Test zur Expositionsverteilung von Frostspanner Männchen ($n_\sigma = 61$) und Weibchen ($n_\varphi = 15$) an Baumstämmen gesamt (0° - 360°), sowie an der linken und rechten Stammseite (jeweils 0° - 180°). Die Aufteilung der $0^\circ/180^\circ$ -Positionen ist als Index ($\sigma:\varphi$) beim F-Wert angegeben. (σ_G Anordnung der Männchen am gesamten Baumstamm, σ_L Anordnung der Männchen an der linken Baumstammseite, σ_R Anordnung der Männchen an der rechten Baumstammseite, φ_G Anordnung der Weibchen am gesamten Baumstamm, φ_L Anordnung der Weibchen an der linken Baumstammseite, φ_R Anordnung der Weibchen an der rechten Baumstammseite, $\mathbf{df}_1 / \mathbf{df}_2$ Freiheitsgrade der F-Verteilung, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 51)

TABELLE 5.8 Minimum und Maximum der Luft-, Stamm- und Bodentemperatur [$^\circ\text{C}$] aus den Messungen beim Auffinden eines Frostspanners ($n = 76$). (S. 53)

TABELLE 5.9 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_\sigma = 61$) und Weibchen ($n_\varphi = 15$) im *Re*-Bereich. Verglichen sind Männchen und Weibchen in den *Re*-Klassen ($\mathbf{df} = 6$). Angegeben ist die Individuenzahl pro *Re*-Klasse, das maximale *Re* der besetzten Klasse, sowie die Erwartungswerte, die χ^2 -Einzelwerte und die Summe der χ^2 -Einzelwerte mit Signifikanzniveau. Die Anzahl der auf Sträuchern sitzenden Frostspanner (welche bereits im angegebenen n_σ/n_φ der Klasse enthalten ist), ist bei n_σ/n_φ als Index angegeben. (*Re* Reynolds-Zahl) (S. 55)

TABELLE 5.10 Mittlere errechnete Rauigkeit für Baumstämme mit aufgerauter/rauer Rinde in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [m/s]. Angegeben ist die Individuenzahl pro *c*-Klasse, sowie die Minima und Maxima von *k* bei jeweiliger Windgeschwindigkeit und die entstehenden Strömungsverhältnisse an der Luv- und Leeseite der Baumstämme. (*c* Windgeschwindigkeit, *k* Oberflächenrauigkeitsparameter) (S. 58)

TABELLE 5.11 Daten zur Männchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.11. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test für glatte Rinde wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der 180° -Positionen ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (\mathbf{a}_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, \mathbf{a}_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, \mathbf{a}_{VST} Summenvektor für Sträucher, \mathbf{a}_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, \mathbf{a}_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, \mathbf{a}_{VST} kritische Vektorlänge des Summenvektors für Sträucher, $\mathbf{df}_1 / \mathbf{df}_2$ Freiheitsgrade der F-Verteilung, $\mathbf{F}_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 63)

TABELLE 5.12 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen ($n_\sigma = 61$) und Weibchen ($n_\varphi = 15$) im Strömungsfeld auf den Rindentypen glatt und aufgeraut/rau, sowie zur Gesamtverteilung (Gesamtsituation ohne Berücksichtigung des Rindentypus). Aufgeraute und rauere Rinde sind zusammengefasst. Verglichen ist die Besetzung der Strömungsfeldbereiche innerhalb des Geschlechts (\mathbf{df} innerhalb $\sigma\sigma$ und $\varphi\varphi$: glatt $\mathbf{df} = 1$; rau $\mathbf{df} = 2$; Umschlag $\mathbf{df} = 1$; gesamt $\mathbf{df} = 2$), sowie beider Geschlechter ($\sigma\sigma$ vs. $\varphi\varphi$) (\mathbf{df} $\sigma\sigma$ vs. $\varphi\varphi$: glatt $\mathbf{df} = 1$; rau $\mathbf{df} = 2$; Umschlag $\mathbf{df} = 1$; gesamt $\mathbf{df} = 2$). Angegeben ist die Individuenzahl im jeweiligen Bereich und der χ^2_Σ -Wert mit Signifikanzniveau. Signifikante Werte sind hervorgehoben. Mit dem Index (t) sind Frostspanner gekennzeichnet, die in einem mit Wirbeln durchsetzten Bereich sitzen. (φ_A Ablöswinkel) (S. 63)

TABELLE 5.13 Daten zur Weibchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.12. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test für glatte Rinde wurde incl. Strauch durchgeführt. Die Aufteilung der 0° -Position ist als In-

dex (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$) (S. 65)

TABELLE 5.14 F-Test zur Expositionsverteilung der Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 61$) und Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) im Strömungsfeld auf den Rindentypen glatt und aufgeraut/rau gesamt (0° - 360°), sowie an der linken und rechten Stammseite (jeweils 0° - 180°). Aufgeraute und rauere Rinde sind zusammengefasst. Der F-Test für glatte Rinde wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der $0^{\circ}/180^{\circ}$ -Positionen ist als Index ($\sigma:\varphi$) beim F-Wert angegeben. (σ_G Anordnung der Männchen am gesamten Baumstamm, σ_L Anordnung der Männchen an der linken Baumstammseite, σ_R Anordnung der Männchen an der rechten Baumstammseite, φ_G Anordnung der Weibchen am gesamten Baumstamm, φ_L Anordnung der Weibchen an der linken Baumstammseite, φ_R Anordnung der Weibchen an der rechten Baumstammseite, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, ** $p < 0,01$) (S. 65)

TABELLE 5.15 Daten zur Männchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.13. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Sträucher durchgeführt. Die Aufteilung der 180° -Positionen ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 67)

TABELLE 5.16 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Männchen an Positionen vor, im Bereich und nach der Grenzschichtablösung (φ_A) mit zunehmender Windgeschwindigkeit [m/s]. Verglichen sind die besetzten Bereiche innerhalb der c -Klassen ($df = 1$) und bezüglich aller c -Klassen ($df = 6$) (gesamt). Angegeben ist die Individuenzahl in der verhältnismäßigen Position zu φ_A bei vorherrschender Windgeschwindigkeit, die χ^2_{Σ} -Werte mit Signifikanzniveau des Vergleichs innerhalb der Klassen, sowie der χ^2_{Σ} -Wert mit Signifikanzniveau für den Gesamtvergleich. Signifikante Werte sind hervorgehoben. (φ_A Ablöswinkel, c Windgeschwindigkeit) (S. 67)

TABELLE 5.17 Daten zur Weibchen-Expositionsverteilung aus Abb. 5.14. Angegeben sind die Summenwinkel, die kritische Vektorlänge und der Vergleich des linken und rechten Halbkreises (jeweils 0° - 180°) mittels F-Test. Für den Vergleich des linken und rechten Halbkreises, wurden die Werte der Einzelwinkel absolut gesetzt. Der F-Test wurde incl. Strauch durchgeführt. Die Aufteilung der 0° -Position ist als Index (L:R) beim F-Wert angegeben. (α_{VL} Summenvektor des linken Halbkreises, α_{VR} Summenvektor des rechten Halbkreises, a_{VL} kritische Vektorlänge des linken Summenvektors, a_{VR} kritische Vektorlänge des rechten Summenvektors, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, $F_{L/R}$ Vergleich des linken und rechten Halbkreises mittels F-Test, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 69)

TABELLE 5.18 χ^2 -Test zur Verteilung der Frostspanner Weibchen an Positionen vor, im Bereich und nach der Grenzschichtablösung (φ_A) mit zunehmender Windgeschwindigkeit [m/s]. Verglichen sind die besetzten Bereiche innerhalb der c -Klassen ($df = 1$) und bezüglich aller c -Klassen ($df = 4$) (gesamt). Angegeben ist die Individuenzahl in der verhältnismäßigen Position zu φ_A bei vorherrschender Windgeschwindigkeit, die χ^2_{Σ} -Werte mit Signifikanzniveau des Vergleichs innerhalb der Klassen, sowie der χ^2_{Σ} -Wert mit Signifikanzniveau für den Gesamtvergleich. Signifikante Werte sind hervorgehoben. (φ_A Ablöswinkel, c Windgeschwindigkeit) (S. 69)

TABELLE 5.19 F-Test zur Expositionsverteilung von Frostspanner Männchen ($n_{\sigma} = 61$) und Weibchen ($n_{\varphi} = 15$) an Baumstämmen gesamt (0° - 360°), sowie an der linken und rechten Stammseite nach Windgeschwindigkeit [m/s]. Die Aufteilung der $0^{\circ}/180^{\circ}$ -Positionen ist als Index ($\sigma:\varphi$) beim F-Wert angegeben. (σ_G Anordnung der Männchen am gesamten Baumstamm, σ_L Anordnung der Männchen an der linken Baumstammseite, σ_R Anordnung der Männchen an der rechten Baumstammseite, φ_G Anordnung der Weibchen am gesamten Baumstamm, φ_L Anordnung der Weibchen an der linken Baumstammseite, φ_R Anordnung der Weibchen an der rechten Baumstammseite, c Windgeschwindigkeit, df_1 / df_2 Freiheitsgrade der F-Verteilung, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$) (S. 69)

TABELLE A Werte der laminaren und turbulenten Grenzschichtdicke bei gegebenem Stammdurchmesser [cm] und vorherrschender Windgeschwindigkeit [m/s]. Beide Grenzschichtdicken sind für 90° berechnet (vgl. auch Tabelle B in der die turbulente Grenzschichtdicke für 140° berechnet ist). Der linke Wert in den Spalten gibt die Dicke der laminaren [mm] und der rechte Wert die Dicke der turbulente Grenzschicht [mm] an. (c Windgeschwindigkeit, L Stammdurchmesser) (S. 97)

TABELLE B Werte der laminaren und turbulenten Grenzschichtdicke bei gegebenem Stammdurchmesser [cm] und vorherrschender Windgeschwindigkeit [m/s]. Die laminare Grenzschichtdicke ist für 90° und die turbulente für 140° berechnet. Der linke Wert in den Spalten gibt die Dicke der laminaren [mm] und der rechte Wert die Dicke der turbulente Grenzschicht [mm] an. (c Windgeschwindigkeit, L Stammdurchmesser) (S. 98)

Anhang

A. Abbildungen und Tabellen

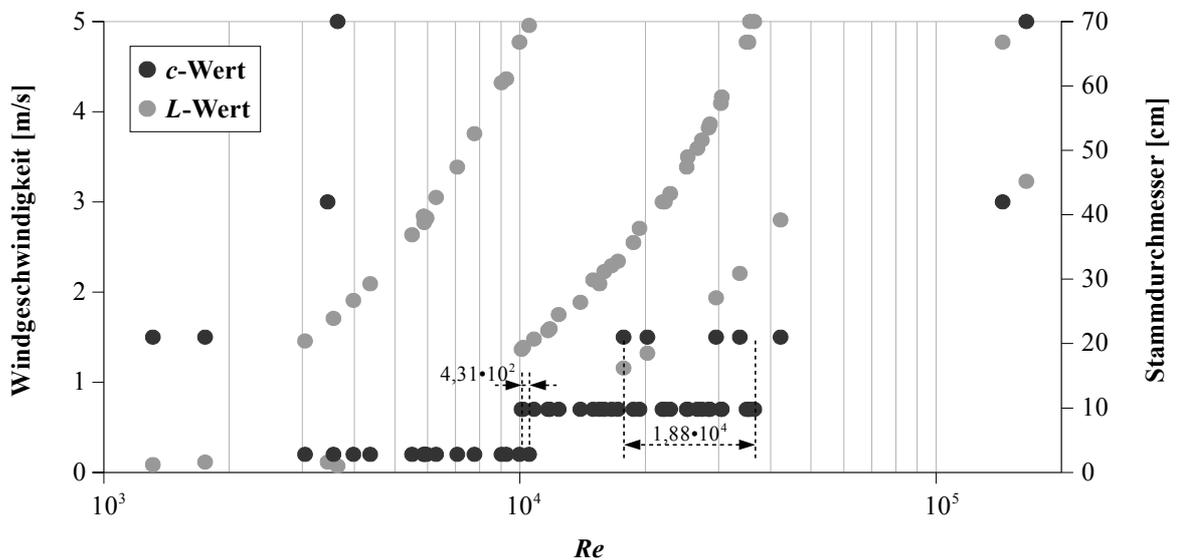


ABBILDUNG A Verteilung der Forstspanner Männchen im Re -Bereich. Auf der primären Ordinate (links) ist die Windgeschwindigkeit [m/s] (c -Wert) aufgetragen und auf der sekundären Ordinate (rechts) der Stammdurchmesser [cm] (L -Wert), welche jeweils durch Graustufen kenntlich gemacht sind. Eingezeichnet ist die zunehmende Überlappung des Re -Bereichs (gestrichelte Linien) mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Die Abszisse ist logarithmisch skaliert. (c Windgeschwindigkeit, L Stammdurchmesser, Re Reynolds-Zahl)

TABELLE A Werte der laminaren und turbulenten Grenzschichtdicke bei gegebenem Stammdurchmesser [cm] und vorherrschender Windgeschwindigkeit [m/s]. Beide Grenzschichtdicken sind für 90° berechnet (vgl. auch Tabelle B in der die turbulente Grenzschichtdicke für 140° berechnet ist). Der linke Wert in den Spalten gibt die Dicke der laminaren [mm] und der rechte Wert die Dicke der turbulente Grenzschicht [mm] an. (c Windgeschwindigkeit, L Stammdurchmesser)

L [cm]	c [m/s]				
	0,2	0,5	0,7	1	2
10	11,5 / 7,1	7,3 / 5,9	6,2 / 5,5	5,1 / 5,1	3,6 / 4,5
20	16,3 / 12,3	10,3 / 10,3	8,7 / 9,6	7,3 / 8,9	5,1 / 7,8
30	19,9 / 17,1	12,6 / 14,2	10,7 / 13,3	8,9 / 12,4	6,3 / 10,8
40	23,0 / 21,5	14,6 / 17,9	12,3 / 16,7	10,3 / 15,6	7,3 / 13,5
50	25,7 / 25,7	16,3 / 21,4	13,8 / 20,0	11,5 / 18,6	8,1 / 16,2
60	28,2 / 29,7	17,8 / 24,7	15,1 / 23,1	12,6 / 21,5	8,9 / 18,7
70	30,5 / 33,6	19,3 / 28,0	16,3 / 26,1	13,6 / 24,3	9,6 / 21,2

TABELLE B Werte der laminaren und turbulenten Grenzschichtdicke bei gegebenem Stammdurchmesser [cm] und vorherrschender Windgeschwindigkeit [m/s]. Die laminare Grenzschichtdicke ist für 90° und die turbulente für 140° berechnet. Der linke Wert in den Spalten gibt die Dicke der laminaren [mm] und der rechte Wert die Dicke der turbulente Grenzschicht [mm] an. (*c* Windgeschwindigkeit, *L* Stammdurchmesser)

<i>L</i> [cm]	<i>c</i> [m/s]				
	0,2	0,5	0,7	1	2
10	11,5 / 10,1	7,3 / 8,4	6,2 / 7,8	5,1 / 7,3	3,6 / 6,4
20	16,3 / 17,6	10,3 / 14,6	8,7 / 13,7	7,3 / 12,7	5,1 / 11,1
30	19,9 / 24,3	12,6 / 20,2	10,7 / 18,9	8,9 / 17,6	6,3 / 15,3
40	23,0 / 30,6	14,6 / 25,5	12,3 / 23,8	10,3 / 22,2	7,3 / 19,3
50	25,7 / 36,5	16,3 / 30,4	13,8 / 28,4	11,5 / 26,5	8,1 / 23,1
60	28,2 / 42,3	17,8 / 35,2	15,1 / 32,9	12,6 / 30,6	8,9 / 26,7
70	30,5 / 47,8	19,3 / 39,8	16,3 / 37,2	13,6 / 34,7	9,6 / 30,2

B. Abstract

As in all Lepidoptera, in winter moth (*Operophtera brumata*) chemical communication by pheromones is very important for the directed detection of a sex partner. From dusk, the brachypterous females sitting on tree trunks emit a pheromone, which causes the receiving winged males to fly upwind in the direction of the emitting source and mate with the female. Visual stimuli are not relevant for copulation. The male recognizes the female only by its attractants. Due reduced sucking mouthparts, winter moth are unable to feed and are therefore dependent on their energy reserves from the larval stage. Therefore energetic investment is optimized by both sexes by exploiting wind situation and flow conditions around tree trunks. Males preferably sit on the leeward side of tree trunks, on which reverse airflow causes the highest pheromone concentration in the area. However, females preferably sit on the windward side of tree trunks, on which an accelerated airflow distributes their pheromones over large areas. At this, parameters such as trunk diameter, bark type and wind speed, as well as Reynolds number and boundary layer separation are of importance. Furthermore, pheromone perception in males is optimized in the vertical level, by sitting in the same heights on tree trunks as females. Thus, males can save their energy reserves for necessary flight and multiple copulation and females for crawling necessary distances from the ground to the tree crowns and for laying eggs.

C. Lebenslauf

Johannes Grill

Marktstraße 23
A-2831 Warth (NÖ)

johannes.grill@gmail.com



Geburtsdatum	16.01.1983	
Geburtsort	Wiener Neustadt (NÖ)	
Staatsbürgerschaft	Österreich	
Eltern	Vater	Josef Grill
	Mutter	Johanna Grill, geb. Reismüller
Familienstand	ledig	

Ausbildung	2002	Matura am Bundesrealgymnasium in Wiener Neustadt
	2002 - 2013	Diplomstudium Biologie/Zoologie an der Uni Wien
	2007 - 2008	Zivildienst im Rehabilitationszentrum Hohegg
	2010 - 2012	Teilstudium Agrarwissenschaften an der BOKU Wien
	2010 - 2013	Teilstudien Technische Physik, Technische Chemie, Medizinische Informatik, Verfahrenstechnik an der TU Wien

Sprachkenntnisse	Deutsch (Muttersprache), Englisch	