

Olfaktorische Habitatfindung ausgewählter
Macrolepidopteren (Abendpfauenaug *Smerinthus*
ocellatus L. und Großer Gabelschwanz *Cerura vinula* L.)
an Salweide (*Salix caprea* L.) und Zitterpappel (*Populus*
tremula L.) in Waldmantelgesellschaften.

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Marta Paczkowska
geboren in Warschau

Göttingen, 10.01.2012

1. Gutachterin / 1. Gutachter: Prof. Dr. Stefan Schütz

2. Gutachterin / 2. Gutachter: Prof. Dr. Achim Dohrenbusch

Tag der mündlichen Prüfung: 28.02.2012

DANKSAGUNG

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation so kräftig unterstützt haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Stefan Schütz für viele Ideen, Diskussionen und konstruktive Kritik. Auch für sein Vertrauen, Verständnis und das sehr familiengerechte Arbeitsklima in seiner Abteilung möchte ich mich bedanken.

Diese Arbeit wäre sicher nicht zustande gekommen ohne Dr. Kai Földner, der bei mir das Interesse für das Thema geweckt hat. Dafür möchte ich mich bedanken.

Bei der Durchführung der Arbeit war ich ebenfalls auf die Hilfe von mehreren Personen angewiesen. An erster Stelle möchte ich Dr. Bernhard Weissbecker erwähnen. Danke für die Hilfe bei vielen Computer-Problemen so wie für die technische Unterstützung im Labor. Auch für die Einführung in das Geo-Caching und einige nette Cache-Touren möchte ich mich bedanken.

Im Labor wurde ich tagtäglich von den technischen Assistenten Kira Duntemann, Sara Nicke und Ulrike Eisenwiener unterstützt. Dafür einen herzlichen Dank. An Sigrid Warzecha richte ich einen besonderen Dank für viele hilfreiche Tipps zur Raupenzucht und für ihre Zuchtbetreuung.

Weiterhin bedanke ich mich bei Christine Rachow für die gute Zusammenarbeit im Rahmen Ihrer Bachelor- und Masterarbeit. Auch für Ihre persönliche Unterstützung wie Kinderbetreuung und Hundesitting, sowie für viele gemeinsame entspannende Aktivitäten möchte ich mich bedanken.

An die Mitarbeiter der Fakultät für Physik richte ich einen Dank für Fertigung der REM Aufnahmen.

Ich bedanke mich auch beim Forstamt Göttingen für Rücksicht bei den Freilandarbeiten auf dem Kerstlingeröder Feld.

Ohne die Bischöfische Studienförderung Cusanuswerk hätte diese Arbeit nicht durchgeführt werden können. Danke, dass ich bei den „Cusanern“ aufgenommen wurde und dass ich in dieser besonderen Gesellschaft bleiben darf.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinem lieben Ehemann Sebastian bedanken. Ohne Dich hätte ich es nie geschafft! Für viele Stunden Fachdiskussionen und Korrekturlesen sowie für die Kraft die Du mir gegeben hast –Danke!

Diese Arbeit möchte ich meinen lieben Kinder Isabella und Oliver widmen. Die beiden Sonnenscheine haben mir immer den Ausgleich gegeben und zeigten mir, was das wichtigste im Leben ist.



INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|--|-----|
| I. | Einleitung | 5 |
| II. | The „Length of branches with leaves (LbT)“ as a scale for leaf mass and leaf area (Die „Länge der beblätterten Triebe (LbT)“ als Maßstab für Blattmasse und Blattfläche.) | 11 |
| III. | VOC Emission der Salweide (<i>Salix caprea</i> L.) und Zitterpappel (<i>Populus tremula</i> L.). | 15 |
| IV. | Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand (The role of the poplar’s volatiles for the butterflies of the forest margin”) | 85 |
| V. | Der Große Gabelschwanz <i>Cerura vinula</i> L.- expositionsbedingte Larvalentwicklung und olfaktorische Habitatfindung. Untersuchungen an Salweide (<i>Salix caprea</i> L.) und Zitterpappel. | 91 |
| VI. | Abendpfauenauge <i>Smerinthus ocellatus</i> L.-expositionsbedingte Larvalentwicklung olfaktorische Wahrnehmung und Verhalten, Untersuchungen an Salweide (<i>Salix caprea</i> L.) und Zitterpappel (<i>Populus tremula</i> L.)...... | 161 |
| VII. | Zusammenfassende Diskussion | 219 |
| VIII. | Abstract | 247 |
| IX. | Veröffentlichungen | 251 |



Kapitel I:

Einleitung

Der Wald hat seit Anfang der menschlichen Kultur eine wichtige Bedeutung. Er bot Schutz, Nahrung und den Rohstoff Holz. Die Rolle des Waldes wandelt sich mit der Zeit. Neue Funktionen wie Luftreinigung, Erholung und Biodiversitätserhaltung nehmen an Bedeutung zu, während Schutz und Ernährung eher abnehmen. Der Rohstoff Holz wird aber nach wie vor nicht nur als Baumaterial sondern auch als nachhaltiger Energiestoff sehr geschätzt. Deshalb konzentrieren sich die meisten Forstwissenschaftler auf die eigentlichen holzerzeugenden Bestände. Naturnahe Mischbestände bieten vielfältige Lebensräume mit hoher Biodiversität. Die Waldränder jedoch, wo sich Waldbestände und Offenland begegnen, übertreffen diese deutlich. Die Rolle des Waldrandes wurde immer mehr geschätzt und mehrere Autoren haben diese Habitate untersucht (Aichmüller, 1991; Kögel et al., 1993; Kuster, 1995; Tidow et al., 1997). Die bisher für Unkraut gehaltenen Weichholzarten Salweide und Zitterpappel wurden als ökologisch wertvolle Nischen angesehen.

Man hat aber auch festgestellt, dass nicht jeder Waldrand dem anderem gleich ist, denn ob sonnig oder schattig-, nord- oder süd- exponiert, verändern sich die mikroklimatischen Bedingungen. Diese Bedingungen haben insbesondere Einfluss auf die Emissionen von Duftstoffen, die in dieser Arbeit schwerpunktmäßig untersucht wurden. Duftstoffe können zur Differenzierung mikroklimatischer Verhältnisse dienlich sein. Hier spielt die Intensität des Geruchs eine entscheidende Rolle. Die Intensität ergibt sich aus der Entfernung zur Geruchsquelle, Windrichtung, Windstärke, Lufttemperatur und Feuchte und vor allem aus der Menge des emittierten Stoffes. Die hauptsächlichen Geruchssender sind bei den Bäumen die Blätter. Aber gerade die Blattmenge bzw. Blattfläche oder Blattmasse ist bei stehenden Bäumen schwierig zu ermitteln. Die Variabilität der Baumkronenstruktur am Waldrand erschwert jegliche auf Baumhöhe und Kronendurchmesser basierende Schätzungsverfahren. Ein relativ leichtes Verfahren ist die Messung der Länge der beblätterten Triebe (LbT). Es ermöglicht eine verletzungsfreie freilandtaugliche Schätzung der Blattmasse und Blattfläche (s. Kapitel II). Die Kenntnisse über vorhandene Blattmasse bzw. Blattfläche ermöglicht eine Abschätzung der Duftquellenstärke.

Allerdings ist die Natur in vielen Erscheinungen un stetig und so sind es auch die Duftmuster der Pflanzen. Saison, Tageszeit und Exposition der Blätter haben Einfluss auf die Emission

von Duftstoffen (Forster et al., 2008). Die Unterschiede zwischen Tag und Nacht werden vor allem auf Photosynthese und Transpiration zurückgeführt (De Moraes et al., 2001; Pare and Tumlinson, 1999). Weitere Variabilitäten im Duftmuster sind häufig auf sich ändernde physiologische Prozesse, wie z.B. Atmung, Stoffwechsel und Photosynthese zurückzuführen. Da die VOC Emission die Kondition der Pflanzen widerspiegelt (Baldwin et al., 2006; Paczkowska et al., 2006 bzw. Kapitel IV), haben Stressfaktoren wie Wasser- und Salzgehalt im Boden, mechanische Verletzungen oder Herbivorenfraß Einfluss auf die chemischen Prozesse in der Pflanze (De Moraes et al., 1998; Schütz et al., 1997). Bei diesen chemischen Prozessen entstehen viele flüchtige Substanzen, die eine chemoökologische Bedeutung haben können (s. Kapitel III).

Einige von Bäumen emittierte Duftstoffe werden immer wieder in chemoökologischem Kontext betrachtet. Hierzu gehören z.B. (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, Methylsalicylat, Nonanal und Decanal (Chen and Fadamiro, 2007; Deng et al., 2004; Fraser et al., 2003; Hu et al., 2009; Johne et al., 2008). Methylsalicylat wird nicht nur von vielen Insektenarten wahrgenommen, sondern auch die Pflanzen selber nehmen geringe Konzentrationen dieses Stoffes in der Luft wahr und warnen sich gegenseitig auf diesem Wege vor Stressfaktoren (Shulaev et al., 1997). Deswegen wurde diese Substanz in dieser Arbeit genauer untersucht (Kapitel III, V und VI). Die Rolle des Grünblattduftes (Z)-3-Hexen-1-yl-acetates wurde ebenfalls diskutiert (Kapitel III, IV, V und VI). Die Freisetzung dieses Stoffes ist abhängig von der Kondition der Pflanze (Paczkowska et al., 2006), wird häufig von Herbivorenfraß induziert (Chen and Fadamiro, 2007) und von sehr vielen Insektenarten wahrgenommen (Fernandez et al., 2007; Fraser et al., 2003). Die Bedeutung des Stoffes als verhaltensmodifizierende Substanz wird in dieser Arbeit untersucht. Diese Ergebnisse zeigen, dass der Insektengeruchssinn helfen kann, die chemische Habitatdifferenzierung aufzuklären. Dadurch, dass einige Pflanzen sich ähnlichen Bedingungen angepasst haben, sieht man auch Ähnlichkeiten in deren Duftmustern. Deswegen war es besonders wichtig zu wissen welche von den Substanzen von Insekten wahrgenommen werden und von ihnen als Entscheidungsgrundlage zur Habitatdifferenzierung, z.B. bei der Eiablage, benutzt werden können.

Waldränder dienen zahlreichen Insektenarten, unter anderem geschützten Arten wie z.B. dem Großen und Kleinen Schillerfalter (*Apatura iris*, *Apatura ilia*) oder dem Eisvogel (*Limenitis populi*), als Nahrungs- und Lebensraum. Die expositionsbedingten Lichtverhältnisse innerhalb der Waldränder spielen eine besondere Rolle in Bezug auf die Artendiversität insbesondere von Lepidopteren (Pausas and Austin, 2001). Die Freilandhebungen des Instituts für

Waldschutz (Georg-August Universität Göttingen) an Waldmantelgesellschaften im Solling ergaben im Zeitraum 1997-2003 umfangreiche Hinweise auf die Einnischung verschiedener Schmetterlingsarten in Abhängigkeit von Strukturparametern wie Sonnenexposition, Größe und sozialer Stellung der Weichhölzer (Damm, 2003). Auf der Basis dieser Untersuchungen wurden zwei Falterarten, das Abendpfaueauge *Smerinthus ocellatus* L. und der Große Gabelschwanz *Cerura vinula* L., für chemoökologische Studien ausgewählt. Damit sollen die Mechanismen der Habitat- und Wirtspflanzenfindung sowie des Eiablageverhaltens auf der Grundlage des für Insekten wichtigen Geruchssinns (Visser, 1983; Visser, 1986) erklärt werden. Da die beiden ausgewählten Arten in den gleichen Habitaten vorkommen aber trotzdem einige feine Anspruchsunterschiede zeigen waren sie ein gutes Paar um die Differenzierungen in der chemoökologischen Wahrnehmung dieser Habitate zu untersuchen. Das Abendpfaueauge tendiert zu eher feuchten, halbschattigen oder sonnigen Expositionen überwiegend an Weiden während der Große Gabelschwanz eine Vorliebe für sonnig exponierte Pappeln zeigt (Ebert et al., 1994; Weidemann and Köhler, 1996). Da die Fragestellung dieser Arbeit die Habitatfindung und das Eiablageverhalten betrifft, wurden in den EAG Messungen primär die weiblichen Falter untersucht. Ein Teil der wahrgenommenen Substanzen wurde in Verhaltensexperimenten getestet. Die Verhaltensversuche wurden an beiden Geschlechtern durchgeführt.

Da man bei Larven eine bessere ernährungsphysiologische Verwertung der Blätter von gestressten Bäumen vermutete, wurde diese Hypothese im Rahmen dieser Arbeit durch Larvalentwicklungsversuche im Freiland getestet (Kapitel V und VI). Die Hypothese basierte ursprünglich auf der Korrelation zwischen Stressereignissen (Trockenheit, Sturm usw.) und Insektenkalamitäten (Mattson and Addy, 1975; Port and Thompson, 1980; Stoszek et al., 1981). Jedoch konnten die Experimente von Thomas and Hodkinson, 1991 an Nachtfaltern diese Hypothese nicht eindeutig bestätigen. Unsere Freiland- und Laborversuche an Falterlarven nähern sich auch diesem Thema. Die Larvalentwicklung des Gabelschwanzes wurde schon in den '50 und '70 Jahren untersucht (Hintze-Podufal, 1970; Hintze, 1970; Templin, 1955). Hier wurde aber vor allem die Korrelation mit den Temperaturbedingungen, der Futtermittelverwertung und der wirtschaftlichen Bedeutung betrachtet. Bei den Abendpfaueaugen wurden auch die ernährungstechnischen Aspekte der Larvenentwicklung untersucht (Thomas and Hodkinson, 1991). Jedoch wurden bisher keine Studien über die olfaktorische Habitatfindung dieser Falter veröffentlicht.

Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Arbeit konnte ein weiterer Schritt auf dem Wege zu einem tieferen Verständnis zur Habitatfindung ökologisch wertvoller Insektenarten gemacht werden. Damit wurde eine Grundlage zur Ableitung praktischer Maßnahmen für die Erhaltung der Diversität in Waldmantelgesellschaften geschaffen.

Literatur:

- Aichmüller, R., 1991, Aufbau reich gegliederter Waldränder. Allgemeine Forst Zeitung, 46: 707-708.
- Baldwin, I.T., Halitschke, R., Paschold, A., von Dahl, C.C. and Preston, C.A., 2006, Volatile signaling in plant-plant interactions: "Talking trees" in the genomics era. Science, 311(5762): 812-815.
- Chen, L. and Fadamiro, H.Y., 2007, Differential electroantennogram response of females and males of two parasitoid species to host-related green leaf volatiles and inducible compounds. Bulletin of Entomological Research, 97(5): 515-522.
- Damm, M., 2003, Faunistische Erfassung phytophager Insekten an ausgewählten Waldaußen- und Waldinnenrändern des Sollings unter besonderer Berücksichtigung der Macrolepidoptera und von Waldrandstrukturen. Fakultät für Forstwissenschaft und Waldökologie, PhD. Georg-August-Universität, Göttingen, 182 pp.
- De Moraes, C.M., Lewis, W.J., Pare, P.W., Alborn, H.T. and Tumlinson, J.H., 1998, Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids. Nature, 393(6685): 570-573.
- De Moraes, C.M., Mescher, M.C. and Tumlinson, J.H., 2001, Caterpillar-induced nocturnal plant volatiles repel conspecific females. Nature, 410: 577-580.
- Deng, J.-y., Huang, Y.-p., Wei, H.-y. and Du, J.-w., 2004, EAG and behavioral responses of *Helicoverpa armigera* males to volatiles from poplar leaves and their combinations with sex pheromone. Journal of Zhejiang University Science, 5(12): 1577-1582.
- Ebert, G. et al., 1994, Die Schmetterlinge Baden-Württenbergs, 4. Eugen Ulmer, Stuttgart, 535 pp.
- Fernandez, P.C., Meiners, T., Bjorkman, C. and Hilker, M., 2007, Electrophysiological responses of the blue willow leaf beetle, *Phratora vulgatissima*, to volatiles of different *Salix viminalis* genotypes. Entomologia Experimentalis Et Applicata, 125: 157-164.
- Forster, N., Ulrichs, C., Zander, M., Katzel, R. and Mewis, I., 2008, Influence of the season on the salicylate and phenolic glycoside contents in the bark of *Salix daphnoides*, *Salix pentandra*, and *Salix purpurea*. Journal of Applied Botany and Food Quality-Angewandte Botanik, 82(1): 99-102.
- Fraser, A.M., Mechaber, W.L. and Hildebrand, J.G., 2003, Electroantennographic and behavioral responses of the sphinx moth *Manduca sexta* to host plant headspace volatiles. Journal of Chemical Ecology, 29(8): 1813-1833.
- Hintze-Podufal, C., 1970, Quantitative changes of defeacation during larval development of *Cerura vinula* L. (Lepidoptera). Oecologia, 5(4): 334-346.
- Hintze, C., 1970, Effect of temperature on larval development of *Cerura vinula* L. (Lepidoptera). Oecologia, 4(4): 374-380.
- Hu, Z.H., Shen, Y.B., Shen, F.Y., Luo, Y.Q. and Su, X.H., 2009, Evidence for the signaling role of methyl jasmonate, methyl salicylate and benzothiazole between poplar (*Populus simonii* x *P. pyramidalis* 'Opera 8277') cuttings. Trees-Structure and Function, 23(5): 1003-1011.
- Johne, A.B., Weissbecker, B. and Schutz, S., 2008, Approaching risk assessment of complex disease development in horse chestnut trees: a chemical ecologist's perspective. Journal of Applied Entomology, 132(5): 349-359.
- Kögel, K. et al., 1993, Aufbau reich gegliederter Waldränder- ein E+E-Vorhaben. Natur und Landschaft, 68: 386-394.
- Kuster, A., 1995, Anlage und Pflege von stufigen Waldränder. Wald und Holz, 76: 14-19.
- Mattson, W.J. and Addy, N.D., 1975, Phytophagous Insects as Regulators of Forest Primary Production. Science, 190(4214): 515-522.
- Paczkowska, M. et al., 2006, Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand. Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent., 13: 213-217.

- Pare, P.W. et al., 2005, Elicitors and priming agents initiate plant defense responses. *Photosynthesis Research*, 85(2): 149-159.
- Pare, P.W. and Tumlinson, J.H., 1999, Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiology*, 121(2): 325-331.
- Pausas, J.G. and Austin, M.P., 2001, Patterns of plant species richness in relation to different environments: An appraisal. *Journal of Vegetation Science* 12: 153-166.
- Port, G.R. and Thompson, J.R., 1980, Outbreaks of insect herbivores on plants along motorways in the United Kingdom. *Journal of Applied Ecology*, 17(3): 649-656.
- Schütz, S., Weissbecker, B., Klein, A. and Hummel, H.E., 1997, Host plant selection of the Colorado potato beetle as influenced by damage induced volatiles of the potato plant. *Naturwissenschaften*, 84(5): 212-217.
- Shulaev, V., Silverman, P. and Raskin, I., 1997, Airborne signalling by methyl salicylate in plant pathogen resistance. *Nature*, 385(6618): 718-721.
- Stoszek, K.J., Mika, P.G., Moore, J.A. and Osborne, H.L., 1981, Relationships of Douglas-fir tussock moth defoliation to site and stand characteristics in Northern Idaho Forest Science, 27(3): 431-442.
- Templin, E., 1955, Der Große Gabelschwanz (*Dicranula vinula* L.). Institut für Forstwissenschaften Eberswalde, Merkblatt 19. Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin.
- Thomas, A.T. and Hodkinson, I.D., 1991, Nitrogen water-stress and the feeding efficiency of lepidopteran herbivores. *Journal of Applied Ecology*, 28(2): 703-720.
- Tidow, S., Schütz, M. and Krüsi, B.O., 1997, Probleme bei der Bewertung und Pflege von Waldränder. *Inf. Bl. d. Forsch. Bereiches Landschaft WSL*, 33.
- Turlings, T.C.J., Alborn, H.T., Loughrin, J.H. and Tumlinson, J.H., 2000, Volicitin, an elicitor of maize volatiles in oral secretion of *Spodoptera exigua*: Isolation and bioactivity. *Journal of Chemical Ecology*, 26(1): 189-202.
- Visser, J.H., 1983, Differential sensory perceptions of plant-compounds by insects. *ACS Symposium Series*, 208: 215-230.
- Visser, J.H., 1986, Host odor perception in phytophagous insects. *Annual Review of Entomology*, 31: 121-144.
- Weidemann, H.J. and Köhler, J., 1996, *Nachtfalter, Spinner und Schwärmer*. Naturbuch Verlag, Augsburg.

Kapitel II:

The „Length of branches with leaves (LbT)“ as a scale for leaf mass and leaf area

Marta Paczkowska¹, Kai Földner², Sebastian Paczkowski¹ & Stefan Schütz¹

¹ Institute of Forest Zoology and Forest Conservation, Georg-August-University of Göttingen,

² Naturkundemuseum Ottoneum in Kassel

Abstract: Die „Länge der beblätterten Triebe (LbT)“ als Maßstab für Blattmasse und Blattfläche.

Zu den Schwierigkeiten bei der Einschätzung der Bedeutung von Daten aus der Erfassung von phytophagen Insekten im Kronenraum gehört die Quantifizierung der als Nahrung nutzbaren Blattmasse. Viele gängige Parameter zur Beschreibung der Baumkrone sind hier ungeeignet. Der Parameter LbT bietet eine sinnvolle Vereinfachung der Datenaufnahme. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Blattmasse und Blattfläche pro Meter LbT für die Baumarten Zitterpappel (*Populus tremula*), Salweide (*Salix caprea*), Birke (*Betula pendula*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus* sp.) bestimmt. In Bezug auf die Blattmasse und die Blattfläche pro Meter LbT wurden signifikante Unterschiede zwischen den Baumarten nachgewiesen. Die so aus dem LbT-Wert berechneten Blattmassen oder Blattflächen sind mit den mittels destruktiver Verfahren ermittelten Werten konsistent und ermöglichen eine unkompliziertere und präzisere Zuordnung von Phytophagenfunden zu verfügbarem Lebensraum und Nahrungsangebot.

Key words: leaf mass, leaf area, length of branches with leaves, herbivores

M. Paczkowska, Institute of Forest Zoology and Forest Conservation,
Georg-August-University of Göttingen, Büsingenweg 3, 37077 Göttingen;
E-Mail: mpaczko@gwdg.de

Introduction

In order to quantify the food supply for phytophagous insects, common parameters like the height of a tree or crown measures like length, width or volume are not satisfactory, as they are only weakly correlated to the individual leaf mass of a tree. To determine the leaf mass more precisely, the length of branches with leaves (LbT) was developed (FÖLDNER & DAMM 2004) especially for trees with reachable branches. In this study the LbT was correlated to the tree species-specific leaf area and leaf mass for applying it to faunistic questions. By quantifying the consumable biomass in this way, one can estimate the nutritional potential of a habitat more exactly and therefore, calculate the maximum number of individuals supported by it. Counting the number of individuals found in a habitat, one can display the density of phytophags as a percentage of the maximum number as well. This density then is a correlation of individuals per m² leaves for instance in addition to the finding-quotient ($N/mLbT \times 100$) (FÖLDNER & DAMM 2004). Furthermore, the area of the leaf surface and the stomata density are correlated to the emission rate of volatile organic compounds (VOCs) (NIINEMETS & REICHSTEIN 2003, NIINEMETS & al. 2004). Some VOCs transport information which triggers the behavior of insects, for example the orientation towards their host plant. Therefore, the exact quantification of the leaf area of a tree enables the extrapolation of the quantities found in a locally measured volatile sample towards an emission rate of the whole tree. Hence the LbT method complements to already existing methods like the LAI-index (Leaf Area Index) (WATSON 1947) as it specifies the leaf area data for small trees with reachable branches. The LAI calculates the m² leaf mass per m² ground by optical measurement (CHEN & al. 1997; BRÉDA 2003) and is useful for acquiring larger scale data like the leaf area of stands or even for continents (SCURLOCK & al. 2001). For microscale conditions a more precise approach, like the LbT method, is necessary.

In this study the correlation of LbT with leaf area and leaf mass is determined for birch (*Betula pendula*), willow (*Salix caprea*) and aspen (*Populus tremula*) as pioneer trees and for beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus* sp.) as typical trees for an advanced of phase of succession.

Material and methods

Trees

The sampled trees were located at the FFH area Kerstlingeröder Feld, Forstamt Herberhausen, Lower Saxony. In August 2003, the following tree species were examined: aspen (*Populus tremula*), willow (*Salix caprea*), birch (*Betula pendula*), beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus* sp.). Ten trees per species (4-10 years old; 1.5-2.5m height) were taken from forest margin sites. On each tree the length of branches with leaves (LbT) was measured and for the leaves with leaf stalks the fresh weight was determined. For determination of the moisture content 30 leaves of each species were weighted, dried for 4 hours at 60°C and weighted again. The numbers of leaves on ten branches of each species were counted. Random samples of ten leaves per species were taken to measure only width (aspen, birch, beech) or only length (oak) or width and length (willow). The leaf area was determined by using the program WinDias. With this data regression curves were designed to correlate easy evaluated measures of leaf samples like length or width with the size of leaf areas. The data for long and short shoots of the willow were evaluated separately.

Insects

Twenty caterpillars of *Cerura vinula* L. 1758 (Lepidoptera, Notodontidae) and *Smerinthus ocellatus* (L. 1758) (Lepidoptera, Sphingidae) were separately reared in plastic boxes and fed with fresh leaves every two days. Ten larvae received willow leaves and 10 aspen leaves. The leaves were weighted before feeding them to the caterpillars and the remaining leaves were dried for 4 hours at 60°C and weighted as well. The fresh leaf mass of the remaining leaves was calculated on the basis of moisture content. By subtracting it from the weight before feeding the amount of leaf mass consumed by the caterpillars was determined.

Statistical analysis

The data sets were analyzed for normal distribution with the Shapiro-Wilks-test ($P \leq 0.05$) and tested for analysis of variance with ANOVA. The homogeneity of the variance was evaluated by using the Levene's test ($p < 0.05$). For homogenous data the Tukey HSD test (honest significant difference) was applied. Inhomogeneous data were log-transformed, if the data were still inhomogenous the Games-Howell test was used.

Results

For all tree species tested we found a strong correlation of width (birch, aspen, beech), length (oak), width and length (willow) with the area of leaves ($R^2=0,95-0,99$). In Figure 1, the most important relations between the LbT and other parameters for each data set are presented.

The amount of fresh leaf mass ingested by *Cerura vinula* showed significant differences between *S. caprea* (18,4g; n=6) and *P. tremula* (10,6g; n=3). *Smerinthus ocellatus* needed 10,7g of *S. caprea* (n=10) and 7,7g of *P. tremula* (n=1). Determination of significance was impossible because of a high mortality rate for *S. ocellatus* on *P. tremula*.

Discussion

The leaf mass of a tree depends on many factors such as temperature, latitude or ozone concentration (BUSSOTTI & al., 2005). Several authors investigated correlations of the morphological characteristics of leaves to stand attributes, position of the crown and light exposure (JENTYS-SZAFEROWA 1937; TRUCHANOWICZ 1955; SYTNIK & al. 1978; KAPPEL & FLORE 1983; MANDRE & al. 1998; KREMER & al. 2002; GRUBER & al. 2004; KOVAČIĆ & NIKOLIĆ 2005; WAJDA 2007). According to these studies morphological characteristics of leaves show significant regional differences. The LbT has to be re-calibrated for every regional examination.

Another aspect to be considered when interpreting the data of this study is the crown density. It displays the vitality of young trees (GRUBER 2004). With the LbT method only healthy trees or trees that loose leaves from the basal end of the shoots can be evaluated correctly. A scattered pattern of leaf loss distorts the results. But the LbT method is feasible to quantify the crown growth or estimate the loss of selected trees by phytophagous insects in long term studies.

In order to evaluate the consistency of the LbT method it was compared with the LAI method (leaf area index). The results were similar: for birch the leaf area calculated with the LbT method was $0,08\text{m}^2 \pm 0,03$ per meter LbT and $0,082\text{m}^2$ per meter LbT for the LAI method (BRĚDA 2003). In comparison with the LAI

method the LbT method is useful for faunistic evaluation on small and asymmetric crowns in complex structured vegetation like forest margins. Here the LbT method as a good compromise between justifiable effort and satisfying accuracy, and it is much more precise than the LAI method.

Many aspects consider the relevance of leaf mass and area on a tree, for instance the determination of nutrition capacity and species density. According to this study a caterpillar of *S. ocellatus* needs 10,7g of willow leaves for its development which is equivalent to 54cm of LbT. A willow tree with 2m LbT therefore offers nutrition for a maximum of four caterpillars of that species. The record of one caterpillar on that tree is 25% of the potential species density. In addition to volatile sampling the knowledge of the leaf area could enable a determination of the emission rate per area, which could be used to estimate the signal range of ecological relevant volatile substances (SCHÜTZ & al. 1999).

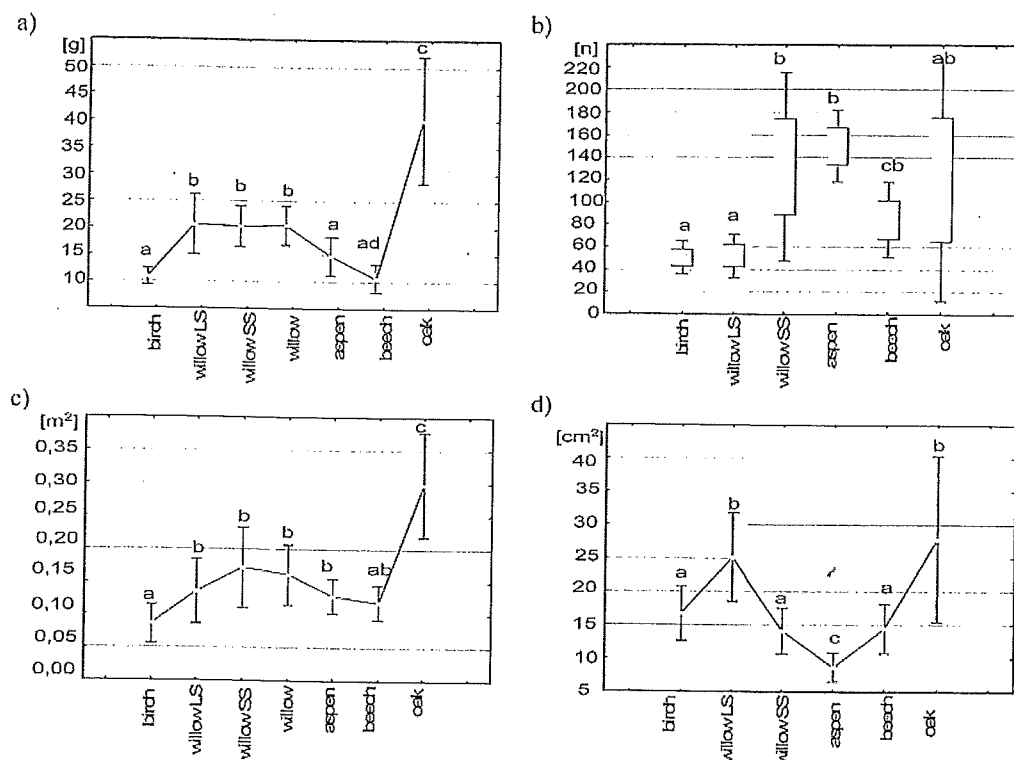


Fig. 1. Relations between the LbT (length of branches with leaves) and other leaf parameters of different tree species (mean \pm SD).

- a) Mass of leaves per meter of LbT,
 b) Number of leaves per meter of LbT, (Games-Howell-Test),
 c) Single leaf area for each species,
 d) Total leaf area per meter of LbT.

Means with the same letters are not significantly different (Tukey HSD test, $P > 0.05$); willowLS-long shoots, willowSS- short shoots.

Summary

Studies on insect biodiversity often require an assessment of available resources in the examined habitat. Leaf mass and leaf area of host plants are particularly important parameter for herbivorous insects. However, most available methods for the description of the crown of a tree are not suitable for assessing its nutritional resources. The parameter LbT (length of branches with leaves) combines fine scale information about crown structure and a meaningful simplification of data acquisition. In our studies the leaf mass and leaf area per

meter of LbT were determined for five tree species: aspen tree (*Populus tremula*), willow (*Salix caprea*), birch (*Betula pendula*), beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus* sp.). The weight of fresh leaves and their leaf area were determined and correlated to dry leaf matter. The leaf mass and the leaf area per meter LbT showed significant differences between the tree species. Leaf mass and leaf area values derived from non-destructive LbT measurements are consistent with values obtained by other methods (LAI). Thus, LbT derived leaf mass and leaf area are quickly determined values integrating fine scale information on crown geometry, thereby providing an improved basis for interpretation of population data on herbivorous insects.

Literatur

- BREDA, N.J.J. (2003): Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. – *Journal of Experimental Botany*, **54** (392): 2403-2417.
- FÜLDNER, K. & DAMM, M. (2004): „Die Länge der beblätterten Triebe (LbT)“ als Vergleichsmaßstab zur Erfassung phytophager Insekten an unterschiedlich dimensionierten Gehölzen. – *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* **175** (12): 234-238.
- CHEN, J. M. P. M., RICH, S. T., GOWER, J. M., NORMAN & PLUMMER, S. (1997): Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. – *J. Geophys. Res.*, **102**(D24): 29429–29443.
- GRUBER, F., MANN, T.E., KUHR, M. & EICHORN, J. (2004): Kronenwachstum von Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.) in Abhängigkeit von der Witterung auf einem kalkbeeinflussten Basaltstandort Ziehrenberg. – *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* **175**(4/5): 70-77.
- GRUBER, F. (2004): Vitalität der Buche anhand des „Blattverlustes“ falsch bewertet. – *AFZ-Der Wald* **6**, 320-322.
- JENTYS-SZAFEROWA, J. (1939): Z badań biometrycznych nad zbiorowym gatunkiem *Betula alba* L. – *Rozprawy i sprawozdania*, IBL Seria A nr 26.
- KAPPEL, F. & FLORE, J.A. (1983): Effect of shade on photosynthesis, specific leaf weight, chlorophyll content of leaves, and morphology of young peach trees. – *J. Am. Soc. Hort. Sci.* **108**: 541-544.
- KOVACIC, S. & NIKOLIC, T. (2005): Relations between *Betula pendula* Roth. (Betulaceae) leaf morphology and environmental factors in five regions of Croatia. – *Acta Biol. Cracov Bot.* **47** (2): 7-13.
- KREMER, A., DUPOUEY, J.L., DEANS, J.D., COTTRELL, J., CSAIKL, U., FINKELDEY, R., & al. (2002): Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercus petraea* is stable across western European mixed oak stands. – *Ann. Forest Sci.* **59**: 777–787.
- MANDRE, M., TULLUS, H. & TAMM, Ü. (1998): The partitioning of carbohydrates and the biomass of leaves in *Populus tremula* L. canopy. – *Trees* **12**: 160-166.
- NIINEMETS, U., LORETO, F. & REICHSTEIN, M. (2004): Physiological and physicochemical controls on foliar volatile organic compound emissions. – *Trends Plant Sci.* **9** (4): 180-186.
- NIINEMETS, U. & REICHSTEIN, M. (2003): Controls on the emission of plant volatiles through stomata: differential sensitivity of emission rates to stomatal closure explained. – *J. Geophys. Res. – Atmos.* **108**: doi: 10.1029/2002/JD002626.
- SCHÜTZ, S., WEISSBECKER, B., HUMMEL, H.E., APEL, K.-H., SCHMITZ & H., BLECKMANN, H. (1999): Insect Antennae as a Smoke Detector. – *Nature* **398**: 298-299.
- SCURLOCK, J. M. O., ASNER, G. P. & GOWER, S. T. (2001): Global Leaf Area Index Data from Field Measurements, 1932-2000. Data set. Available on-line [<http://www.daac.ornl.gov>] from the Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.
- SYTNIK, K.M., MUSTANENKO, L.I., BOGDANOVA, T.L. (1978): Leaf physiology. – *Naukova Dumka*, Kiev.
- TRUCHANOWICZ, J. (1955): Różnice w kształcie liści drzew z dolnej środkowej i górnej części korony. – *Rocz. Sekc. Dendr.* **10** 121-163.
- WAJDA, T. (2007): Zmienność morfologiczna liści brzozy brodawkowej (*Betula pendula* Roth.) w Polsce. – *Sywan* Nr 3: 3-10.
- WATSON, D.J. (1947): Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. – *Ann. Bot.* **11**: 41-76.

Kapitel III:

VOC Emissionen der Salweide (*Salix caprea* L.) und der Zitterpappel (*Populus tremula* L.).

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | Einleitung | 15 |
| 2 | Material und Methoden | 18 |
| 2.1 | Bäume..... | 18 |
| 2.1.1 | Versuchsfläche Kerstlingeröder Feld | 18 |
| 2.1.1.1 | Die Lage | 18 |
| 2.1.1.2 | Geologie und Boden..... | 19 |
| 2.1.1.3 | Klima..... | 19 |
| 2.1.1.4 | Nutzungsgeschichte..... | 19 |
| 2.1.1.5 | Versuchsbäume | 19 |
| 2.1.2 | Versuchsaufbau im Gewächshaus | 21 |
| 2.1.3 | Duftprobennahme | 22 |
| 2.1.3.1 | Gewächshaus..... | 24 |
| 2.1.3.2 | Freiland | 24 |
| 2.1.3.3 | GC-MS Analyse..... | 25 |
| 2.1.3.4 | Statistische Analysen | 26 |
| 3 | Ergebnisse | 29 |
| 3.1 | Freiland..... | 29 |
| 3.1.1 | Saisonale Änderungen der Duftkomponenten | 29 |
| 3.1.2 | Tagesgang der Volatilenemissionen | 30 |
| 3.2 | Gewächshaus | 32 |
| 3.2.1 | Quantität | 37 |
| 4 | Diskussion | 48 |
| 4.1 | Gewächshaus | 48 |
| 4.2 | Freiland..... | 54 |
| 5 | Zusammenfassung..... | 58 |
| 6 | Anhang | 60 |

1 Einleitung

Die Pflanzen neigen dazu ihre Umgebung mit Duftstoffen zu füllen. Schon im Altertum war bekannt, dass sowohl die Blüten als auch die vegetativen Pflanzenteile markante Düfte emittieren. Die Entdeckung des gasförmigen Phytohormons Ethylen hat Forscher auf die Idee gebracht, dass einige von den pflanzlichen Düften, die nicht von Menschen wahrgenommen werden, eine wichtige physiologische Rolle spielen können. Aktuell sind über 1.000 organische Verbindungen bekannt, die von Pflanzen emittiert werden. Am häufigsten wurden Blütenvolatile analysiert (Knudsen et al., 1993). In den letzten 20 Jahren ist das Wissen über das Auftreten und die Verbreitung von Pflanzenvolatilem, dank der Anwendung von Gaschromatographie und Massenspektrometrie, sehr erweitert worden. Außer einer hohen

Diversität der Duftmuster wurde auch mehrfach nachgewiesen, dass Herbivorenfraß diese Duftmuster verändern kann und zwar nicht nur am Ort der Verletzung sondern auch in der ganzen Pflanze (Pare and Tumlinson, 1999; Schütz, 2001).

In diesem Kapitel werden Duftmuster von zwei Baumarten, die in ähnlichen oder gleichen Habitaten vorkommen, analysiert. Die Salweide *Salix caprea* L. und die Zitterpappel *Populus tremula* L. gehören zur Familie *Salicaceae* (Weidengewächse). Beide werden auch als Pionierbaumarten und Weichholzarten bezeichnet. Oft findet man die beiden Arten zusammen in einem Habitat z.B. in Waldmantelgesellschaften.

Die Salweide (*Salix caprea*) gedeiht auf frischen, nährstoffreichen Standorten. Im Gegensatz zu vielen verwandten *Salix* Arten kommt sie kaum auf Auen und Sümpfen vor. Als Pionierpflanze wächst sie auf Kahlschlagflecken, Schutthalden und Brachflächen auf steinigem und lehmigen Rohböden. Sie ist eine Kennart der Vorwaldgesellschaften des *Sambuco-Salicion capreae* und leitet dort neben der Birke die erste Phase der natürlichen Waldentwicklung ein. Die Blüten der Salweide werden durch Insekten bestäubt. Die Samen breiten sich über große Entfernungen durch den Wind aus. Die Keimfähigkeit ist bereits direkt nach der Reife gegeben, verliert sich aber schnell. Salweiden lassen sich, anders als die meisten anderen Weidenarten, kaum durch Sprossstecklinge vermehren. Die Kätzchen der Salweide stellen die erste wichtige Bienennahrung im Jahr dar. Auch frühfliegende Falterarten wie Zitronenfalter (*Gonepteryx rhamni*), Kleiner Fuchs (*Aglaia urticae*) und Tagpfauenauge (*Inachis io*) nehmen im Frühjahr den nahrhaften Nektar auf. Von den Blättern der Salweide ernähren sich viele Käferarten der artenreichen Familie der Blattkäfer (Chrysomelidae). Der Moschusbock (*Aromia moschata*) ernährt sich vom Saft der Salweide. Nach der Eiche beherbergt die Salweide die größte Anzahl verschiedener Schmetterlingsraupenarten. Unterschiedliche Autoren schätzen, dass sie von 60 bis über 100 Arten besiedelt wird (Damm, 2003). Unter anderem ist sie eine Futterpflanze für die Schmetterlingsraupen des Trauermantels (*Nymphalis antiopa*), des Großen Fuchses (*Nymphalis polychloros*), des Großen Schillerfalters (*Apatura iris*), des Braunen Bären (*Arctia caja*), des Großen Gabelschwanzes (*Cerura vinula*) und des Abendpfauenauges (*Smerinthus ocellatus*). Die Raupe des Russischen Bären (*Euplagia quadripunctaria*) sucht vor ihrer Überwinterung die Blätter der Salweide (*Salix caprea*) auf. Auch die Raupe des vom Aussterben bedrohten Kleinen Maivogels (*Euphydryas maturna*) trifft man nach der Überwinterung dort an. Dem Wild dient die Salweide als Deckung und zur Wildäsung. Trotz all dieser ökologisch positiven Eigenschaften wurde die Salweide (*Salix caprea*) jahrelang

insbesondere an Wegesrändern komplett zurückgeschnitten. Heute werden Salweiden (*Salix caprea*) häufiger als wichtige Habitatbäume anerkannt und stehen gelassen (Leder, 1993).

Die Zitterpappel (*Populus tremula*), auch Espe genannt, gilt als die in Mitteleuropa am häufigsten auftretende Pappelart. Sie ist eine der am schnellsten wachsenden Baumarten in unseren geographischen Breiten und eignet sich deswegen gut als Energieholz. Neben ihr findet man häufig noch zwei weitere Pappelarten: die Schwarz-Pappel (*Populus nigra*) und die Silber-Pappel (*Populus alba*). Aufgrund ihrer Lichtbedürftigkeit trifft man die Espe oft auf Kahlschlagflächen an. Die Zitterpappel tritt häufig in Vergesellschaftung mit Salweiden (*Salix caprea*), Weißbirken (*Betula pendula*), Eichen (*Quercus* sp.) und Besenginster (*Cytisus scoparius*) auf. Sie besiedelt lichte Wälder, Waldränder, Steinhalden und Hecken. Als Pionierbaumart ist sie auch auf Brachflächen und Kahlschlägen zu finden. An die Bodenqualität stellt sie keine hohen Ansprüche. Zitterpappel bevorzugt jedoch lockere, humusreiche, frische bis feuchte, nährstoff- und basenreiche Sand-, Lehm- und Lössböden. Sie gedeiht sowohl auf kalkarmen als auch auf kalkreichen Standorten gleich gut. Als Lichtbaumart meidet sie zu schattige Wuchsplätze.

Beide Baumarten werden von vielen Insektenarten besiedelt. Die Untersuchungen im Zeitraum 1999-2003 ergaben insgesamt 67 Großschmetterlingsarten an beiden Baumarten. An der Salweide (*Salix caprea*) fanden sich 60 Arten und an der Zitterpappel (*Populus tremula*) 40 Arten (Damm, 2003). Alle diese Schmetterlingsarten brauchen eine zuverlässige Strategie um ihre Wirtspflanze zu finden. Für die Orientierung nutzen sie vor allem den olfaktorischen Sinn (Renwick, 1989). Deswegen ist eine genaue Analyse des Baumduftes für das Verständnis dieser komplexen Insekt-Pflanze Interaktionen von großer Bedeutung.

Die Grünblattdüfte werden von den meisten Pflanzenarten freigesetzt und werden von vielen Insektenarten wahrgenommen. Die Unterscheidung zwischen Wirts- und Nichtwirtspflanze erfolgt häufig mittels Kombinationen aus vielen Duftsignalen die entweder gleichzeitig oder nacheinander wahrgenommen werden (Bruce et al., 2005). Selten gibt es ein artspezifisches Kairomon, das allein ausreichend für die Wirtserkennung ist (Bruce et al., 2005). Deswegen ist der Wirtsfindungsmechanismus der Insekten oft kompliziert und schwierig zu erforschen. Der erste Schritt ist herauszufinden, welche Duftstoffe von den Wirtspflanzen der untersuchten Falter emittiert werden. In diesem Kapitel wurden die Informationen über die Duftpalette der Zitterpappel (*Populus tremula*) und der Salweide (*Salix caprea*) sowie deren Variabilität gesammelt. Dabei sollen folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Salweide (*Salix caprea*) und Zitterpappel (*Populus tremula*) emittieren unterschiedliche Duftkomponenten, die über den Geruchssinn von Insekten wahrgenommen werden können;
2. Die Duftmuster ändern sich im Laufe der Vegetationsperiode von Frühjahr bis zum Spätsommer;
3. Die Duftmuster sind unterschiedlich zur verschiedenen Tageszeiten (morgens, mittags, abends);
4. Die Unterschiede im Duftmuster sind nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ;
5. Die Sonnenexposition und die Schattenexposition beeinflussen die Duftmuster der Zitterpappel und der Salweide.

2 Material und Methoden

2.1 Bäume

2.1.1 Versuchsfläche Kerstlingeröder Feld

2.1.1.1 Die Lage

Alle Freilandversuche wurden auf dem Kerstlingeröder Feld in der Nähe von Göttingen (Süd-niedersachsen) durchgeführt. Diese 196ha große Fläche ist ein Teil des Naturschutzgebietes Nr. 138 „Stadtwald Göttingen und Kerstlingeröder Feld“ und gleichzeitig Teil des Fauna- Flora- Habitat (FFH-) Gebietes „Göttinger Wald“. Somit ist es ein Bestandteil des europäischen Schutzgebietsystems Natura 2000 (NLWKN). Rund 1,5km östlich der Stadt Göttingen, mit einer maximalen Nord-Süd Ausdehnung von 1500m und einer Ost-Westausdehnung von bis zu 1300m, liegt das Kerstlingeröder Feld als Offenlandbereich inmitten des Göttinger Waldes. Der in der Nordhälfte gelegene Sauberg bildet den höchsten Punkt des auf 320 bis 390m ü. NN gelegenen Gebietes (Meineke et al., 1993). Rund 83ha der Fläche ist von Wald bedeckt, 56ha sind landwirtschaftliche Streuobstwiesen und 58ha sind Sukzessionsflächen, das heißt Übergangsformen zwischen offener Landschaft und Wald. Die so genannte „Zickenpumpe“ ist das einzige Gewässer bzw. Feuchtbiotop, das jedoch phasenweise trocken fällt.

2.1.1.2 Geologie und Boden

Ausgangsgestein des Kerstlingeröder Feldes ist der Mittlere Muschelkalk. Der Sauberg befindet sich mit seinen Trochitenkalkschichten auf Oberem Muschelkalk. Auf den Bereichen des Mittleren Muschelkalkes bildeten sich Braunerde- Bodentypen (Rendzina, Pararendzina) aus (Meineke et al., 1993). Alle Versuchsbäume bis auf 2 Zitterpappeln (Nr. 31 und 32) befinden sich auf geringmächtiger Rendzina. Die Bäume 31 und 32 befinden sich auf Pararendzina sehr nah am Übergang von diesen beiden Bodentypen. Rendzinen weisen zwar mit Mull eine fruchtbare Humusform auf, jedoch sind diese Bodentypen auf festem Carbonatgestein häufig von Flachgründigkeit und insbesondere an Südhängen von Trockenheit betroffen (Scheffer and Schachtschabel, 2001).

2.1.1.3 Klima

Das Gebiet befindet sich im Übergangsbereich von einem subozeanischen zu einem subkontinental geprägten kühl- gemäßigten Klima in submontaner Lage und ist kühler und niederschlagsreicher als die Göttinger Ebene. Mit ca. 710mm ist der Niederschlag um ca. 60mm höher als im nahe gelegenen Göttingen. Während der Vegetationsperiode fallen 50% des Jahresniederschlags, wobei das Maximum im Juni liegt. Bei einer Jahrestemperatur von 7,5°C ist das Habitat rund 1,2°C kühler als Göttingen (Schipka, 2003).

2.1.1.4 Nutzungsgeschichte

Etwa 60 Jahre lang (bis 1992) fand das Kerstlingeröder Feld als Truppenübungsplatz zunächst für die Reichswehr, die Britische Rheinarmee und schließlich für die Bundeswehr Verwendung. In der Zeit ist ein sehr dichtes Wegenetz (15km) mit breit angelegten Schotterstraßen und Betonplatten an den Kreuzungspunkten entstanden (Rutzen and Földner, 2002). Dieses dichte Wegenetz bot eine große Auswahl an unterschiedlich exponierten Waldrändern mit Weichholzarten. Aus diesem Grund war das Kerstlingeröder Feld ein geeignetes Forschungsgebiet. Im Jahr 2001 hat die Stadt Göttingen das Gebiet gekauft und unter die Kontrolle des Stadtforstamtes Göttingen gestellt. 2007 wurde das Kerstlingeröder Feld zusammen mit dem Göttinger Wald zum Naturschutzgebiet (FFH) ausgewiesen.

2.1.1.5 Versuchsbäume

Auf dem Kerstlingeröder Feld wurden 32 Versuchsbäume in Wuchshöhen von 1,5m bis 2,5m ausgewählt. Die 16 Salweiden und 16 Zitterpappeln standen in sonniger oder schattiger Exposition am Waldrand. Als sonnig wurden die Standorte eingestuft, bei denen innerhalb der

Vegetationsperiode (April bis Oktober) die mittlere potentielle Sonnenscheindauer pro Tag, gemessen mit dem Horizontoskop (Schütz and Brang, 1995), (s.Abbildung 2.1) mindestens sechs Stunden betrug. Als schattig exponiert galten die Standorte, die während der Vegetationsperiode unter vier Stunden potentieller Sonnenscheindauer am Tag erhielten. Das Luftbild zeigt das dichte Wegenetz und die Standorte der Versuchsbäume (Abbildung 2.2).



Abbildung 2.1. Horizontoskop der für die Bestimmung der potenziellen Sonnenscheindauer benutzt wurde. Photoquelle: http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/wsl_horizontoskop_DE

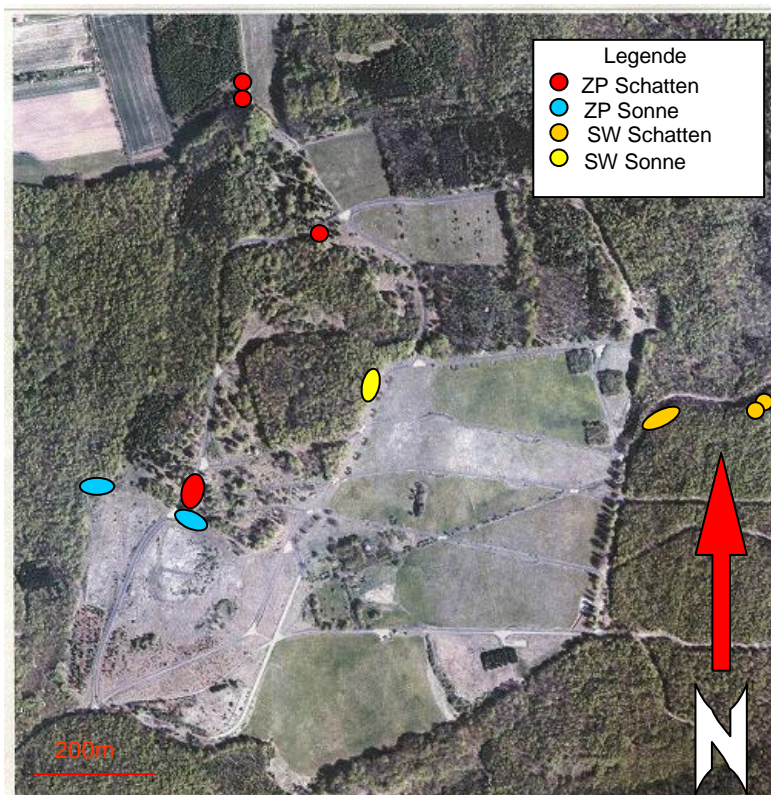


Abbildung 2.2. Luftbild vom Kerstlingeröder Feld mit markierten Versuchsbäumen. ZP-Zitterpappel, SW-Salweide

2.1.2 Versuchsaufbau im Gewächshaus

20 Zitterpappeln und 20 Salweiden wurden in eine Gewächshauskammer gestellt. Die Zitterpappeln waren Vollgeschwister und stammen aus einer gezielten Kreuzung von Zitterpappel (*Populus tremula*) Geismar 7 ♀ und Geismar 5 ♂ aus dem Institut für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung der Universität Göttingen. Die Salweiden waren wild angeflogene Sämlinge aus der Versuchsfläche am Büsgeninstitut der Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 2. Bei den ersten Aufnahmen waren die Salweiden 40-50cm hoch. Alle Pappeln waren bei den ersten Aufnahmen 7 Jahre alt und 150-200cm hoch. Die Blattmassen der Zitterpappeln und der Salweiden waren trotz der Größenunterschiede vergleichbar. Die Pflanzen standen in 12-Liter Kunststofföpfen mit Frühstorfer Erde, Typ T25, Archut. Die Anordnung der Bäume im Gewächshaus zeigt Abbildung 2.3. Alle Bäume wurden in Abständen von drei Tagen mit je zwei Litern pro Pflanze gegossen. Vor dem Einbringen in das Gewächshaus wurden alle Pflanzen mit dem systemischen Insektizid Confidor WG70 0,035% und teilsystemischen Fungizid Flint 0,02% behandelt. Die Gewächshauskammer wurde mit 1% Vircon S desinfiziert. Die Bäume wurden Anfang März ins Gewächshaus gestellt. Bis Mai wurden sie weder umgestellt noch beprobt, damit sie sich an die neuen Bedingungen gewöhnen und mögliche Nebenwirkungen der Pestizide ausklingen konnten. In der Kammer wurden künstlich die Lichtbedingungen Sonne und Schatten simuliert. Die Sonnen-Pflanzen standen etwa 1m vom Fenster entfernt und wurden zusätzlich mit vier Lampen Fa. Philips IP65 mit Weißlichtglühbirnen Master HPI-T Plus 400 Watt, 230V beleuchtet. Die Schatten-Pflanzen standen etwa 6m vom Fenster entfernt und waren durch die Schattierung sowie durch die Wände des Gewächshauses beschattet. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 2.3. Die Helligkeit wurde mit dem Luxmeter gemessen und betrug auf der Sonnenseite 7000-10000Lux und auf der Schattenseite 100-150Lux.

Die Temperatur betrug zwischen 15°C nachts bis 30°C tagsüber (der Alarmwert von 35°C wurde nie überschritten). Die Luftfeuchte betrug zwischen 30% RH und 60% RH bei Alarmwerten von min 23% RH und max 80% RH.

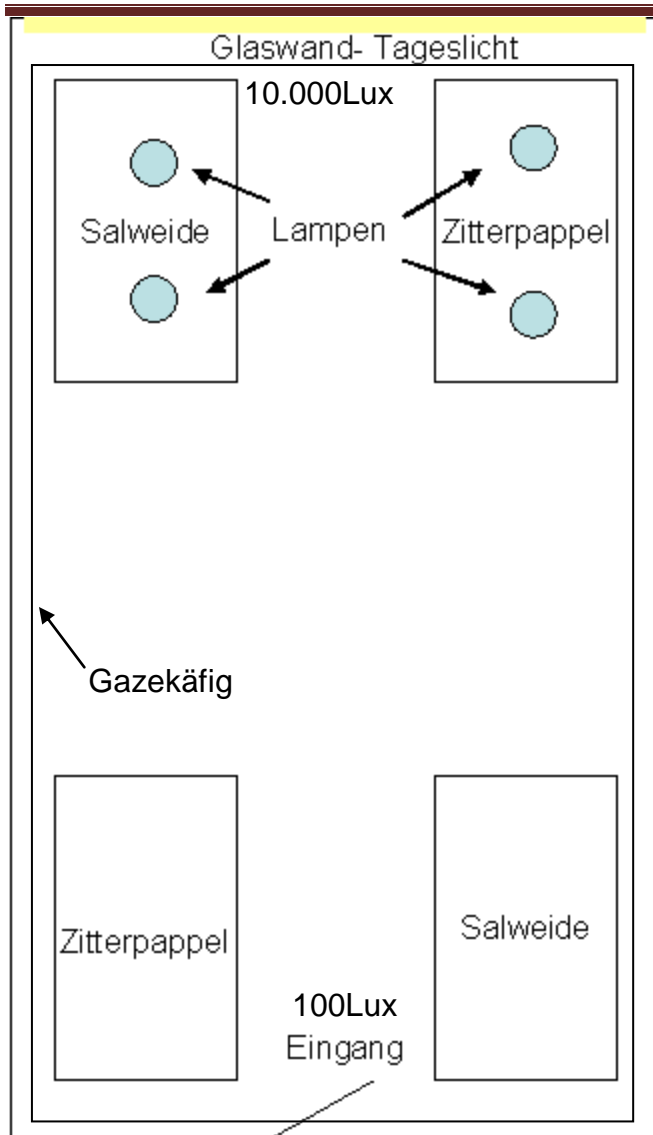


Abbildung 2.3. Die Anordnung der Versuchsbäume im Gewächshaus.

2.1.3 Duftprobennahme

Die Duftproben sind auf dem Kerstlingeröder Feld (Freiland) und im Gewächshaus mit dem Closed-Loop-Stripping-Analysis-System (CLSA) (Boland et al., 1984) in CLSA Röhren (1,5mg Aktivkohle, CLSA-Filter, Fa. Daumazan sur Arize, Frankreich) mit einem 6V Akku und Bratschläuchen (Confresco Frischhalteprodukte, Minden, Deutschland) genommen worden. Bratschläuche waren für die Probennahme sehr gut geeignet, weil sie keine Weichmacher ausdünsten, duftneutral, gut abdichtbar und hitzebeständig sind. Außerdem sind sie kostengünstig und können als Einwegmaterial benutzt werden. Bei der Duftprobennahme wurden vorher ausgeheizte (20Min bei 80°C) 40cm lange Bratschläuche mit einem Umfang von 60cm über die Zweige der ausgewählten Bäume gestülpt und abgedichtet. Die Pumpen (Fa. Fürgut, Tannheim) wurden von Akkus (6V) mit Strom versorgt und saugten über zwei

Stunden die Luft aus dem Bratschlauch mit einer durchschnittlichen Saugleistung von 36l/h. Abweichend vom klassischem CLSA System wurde die Luft aus der Pumpe nach außen geblasen, um die Kontaminationen der Probe mit den Duftstoffen aus dem Pumpenmechanismus zu vermeiden.

Bei diesem Vorgehen dringen geringe Mengen der Umgebungsluft in den Bratschlauch ein. Deshalb wurde ein Molekularsieb (0,4nm Fa. Merk) als Filter für die eindringende Luft eingeführt.



Abbildung 2.4. Duftprobennahme an einer Salweide im Freiland.

Die Duftprobenahmen erfolgten zur Hauptflugzeit der Falter zwischen 19.00 und 21.00 Uhr. Die CLSA-Röhrchen wurden anschließend im Labor mit 75µl der Mischung *MeOH* und *CH₂Cl₂* im Verhältnis 1:2 eluiert (beides Suprasolv-Qualität, Fa. Merck/VWR, Darmstadt) wobei sich die Duftkomponenten im Eluat lösten. Danach wurde die Lösung in Spitzbodengläschen abgefüllt und bis zur Analyse bei -80°C tief gefroren.

2.1.3.1 Gewächshaus

Die Duftproben im Gewächshaus wurden Ende Juni 2007 und im Mai 2008, immer an zwei aufeinander folgenden Tagen, genommen. Während der Probenahme (von 19.00 bis 21.00 Uhr) betrug die Lufttemperatur zwischen 20° und 23°C und die relative Luftfeuchtigkeit betrug 40-60%. Es herrschten Langtagbedingungen.

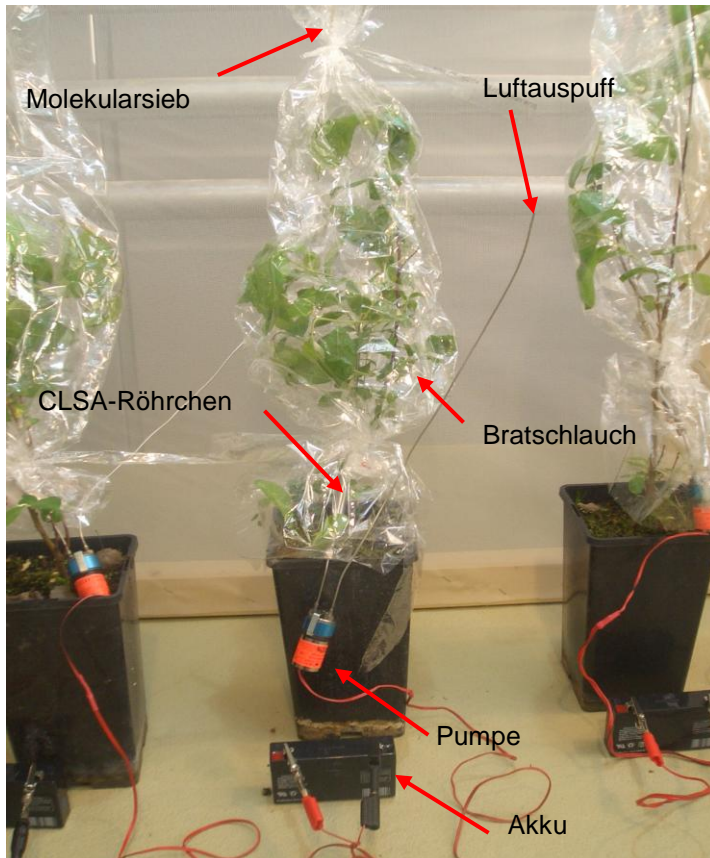


Abbildung 2.5. Duftprobennahme im Gewächshaus an Salweiden

2.1.3.2 Freiland

Jahresrhythmik

Die Saisonunterschiede der Duftspektren wurden im Jahr 2006 gemessen. Die gewählten Termine sollen den Saisonablauf widerspiegeln. Der erste Termin (Mai) richtete sich nach dem Beginn der Flugzeit der Falter. In der Natur fliegen Abendpfauenaugen und Gabelschwänze ab Mai bis etwa Ende Juli (Ebert et al., 1994). Es wurden 32 Versuchsbäume an sechs Terminen, immer an zwei aufeinander folgenden Tagen, beprobt. Die „Maimessungen“ wurden am 15. und 16. Mai bei den Lufttemperaturen 12,5°-22,5°C durchgeführt. Am 5. und 6. Juli wurden die „Juliduftproben“ genommen. An diesen beiden Sommertagen betrug die Temperatur zwischen 19°C und 31°C. Im August 2006 herrschten

ungünstige Wetterbedingungen, deswegen erfolgte die Probennahme erst am 30. und 31. August, bei relativ kalten Temperaturen (11°-16°C).

Tagesrhythmik

Für die Tagesablaufanalyse wurden die Duftproben an vier Terminen (im Juni und Juli) an 32 Versuchsbäumen (je 8 von jeder Expositionsvariante) genommen. Die Messungen wurden immer um 11.00, 15.00 und 19.00 Uhr gestartet und dauerten zwei Stunden. Bei den drei Folgeterminen wurden immer an den gleichen Trieben gemessen. Es wurde die CLSA Methode angewendet. Die Pumpen mit den Edelstahlkapillaren wurden an die 6V Akkus angeschlossen. Die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte wurden während der Duftprobennahme mit dem Datenlogger Fa. Hobo aufgenommen. Die Temperatur schwankte zwischen 14°C und 32°C.

2.1.3.3 GC-MS Analyse

Die Duftstoffgemische der Versuchsbäume wurden mit einem Gaschromatographen (6890N, Agilent Technologies, Santa Clara) auf der polaren Säule INNOWAX (Agilent Technologies 30m x 0,25mm ID und 0,25µm Filmdicke) in ihre Einzelkomponenten aufgetrennt. Zur Identifizierung der Substanzen kam ein gekoppeltes Quadrupol-Massenspektrometer (5973, Agilent Technologies) zum Einsatz. Es wurde 1µl des CLSA-Eluat in den Split/Splitlos-Injektor, der bei 250°C im Splitlosmodus betrieben wurde, injiziert und mittels des Temperaturprogramms Start: 50°C, Haltezeit 1,5Min, Rampe 7,5°C/Min, Endtemperatur 250°C, Haltezeit: 5Min, getrennt. Die gesamte Messdauer betrug 33,17 Min. Die getrennten Duftstoffe wandern mit dem Trägergas Helium (Reinheit: 99,999%) über die Säule bis zum Split (Graphpack 3D/2, Gerstel, Mühlem, Germany; 50:50), der sie zum Massenspektrometer und zu der Insektenantenne führt (Abbildung 2.6). Die Flussrate betrug 1,0l/min und die Temperatur der Transferline betrug 230°C. Mit der NIST Datenbank (National Institut for Standards & Technologies, 2003) im Programm Enhanced ChemStation version D.02.00.275 (Agilent Technologies) wurde der Vergleich der gemessenen Massenspektren zur Identifizierung der Substanzen durchgeführt. Die Richtigkeit der Identifizierungen wurde durch die Messung von authentischen Standards bestätigt. Die Standards wurden in der Konzentration 10^{-4} g/g im gleichen Lösungsmittelgemisch verdünnt, das zur Eluierung der Duftstoffe aus den CLSA-Röhrchen diente. Die Verdünnungen wurden in 2 Arbeitsschritten angefertigt. Zuerst wurden 1,98g Lösungsmittel (MeOH /CH₂Cl₂) mit 0,02g Reinsubstanz (meistens 99,9% Reinheit) gemischt und 2Min lang vor dem nächstem Arbeitsschritt gemixt

(Vortex). 0,02g der so entstandenen Lösung in der Konzentration 10^{-2} g/g wurden in ein weiteres Probenglas mit 1,98g Lösungsmittel pipettiert und erneut gemixt. Auf diesem Weg entstand die Lösung in der Konzentration 10^{-4} g/g.

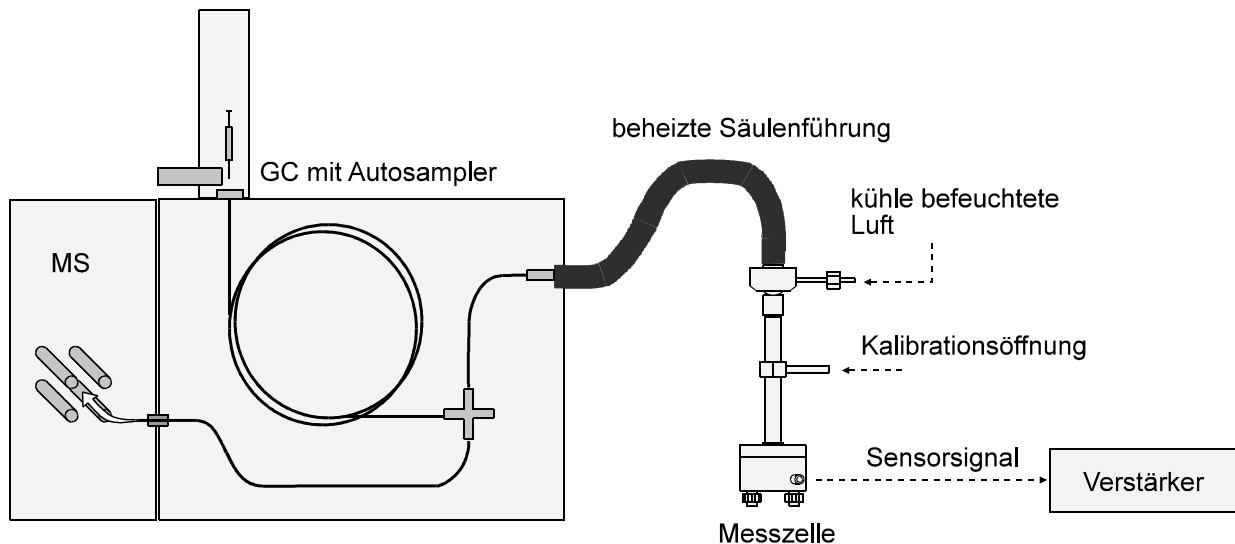


Abbildung 2.6. Schematische Darstellung des Gaschromatographs

Lösungsmittel pipettiert und erneut gemixt. Auf diesem Weg entstand die Lösung in Konzentration 10^{-4} .

2.1.3.4 Statistische Analysen

Eine exakte Zuordnung eines GC-Peaks zu einer chemischen Substanz ist nur nach einer Messung der Reinsubstanz möglich. Jedoch nicht alle Stoffe konnten auf diese Art identifiziert werden. Alle Duftkomponenten, die nicht mit Standardmessungen abgeglichen wurden, wurden mit den Retentionszeiten beschrieben. Die einzelnen Duftmuster wurden mit Hilfe von Diversitätsindizes analysiert. Bei einer Integration des Chromatogramms wurden die Peakflächen aus der Summe sämtlicher detektierter Ionen berechnet (Total Ion Count-TIC). Für die Integration galten für alle Proben feste Grenzparameter. Die Peakfläche von 10^6 wurde als kleinste quantifizierbare Einheit angenommen. Peaks mit TIC Fläche kleiner als 10^6 konnten in den meisten Messungen nicht zuverlässig identifiziert werden (Die Übereinstimmung mit der NIST Datenbankvorschlägen war $<60\%$). Die Anzahl der so erkannten Peaks entsprach der Alpha Diversität. Die Peakflächen von Peaks, die mit gleicher Retentionszeit in den Replikationen vorkommen, wurden aufsummiert und durch die kleinste Einheit geteilt. Auf diese Art berechnete man die Abundanz dieser Substanz innerhalb der Replikationen. Auf dieser Basis wurden folgende Diversitätsindizes berechnet.

Der **Shannon-Wiener Index** (H_s) ist eine mathematische Größe, die in der Biometrie für die Beschreibung der Diversität (vgl. Biodiversität) eingesetzt wird. Dieser Index ist ein Maß für die Mannigfaltigkeit der Volatile. Er berücksichtigt sowohl die Anzahl unterschiedlicher Datenkategorien (z.B. genetische Diversität, Artenzahl, Duftdiversität) als auch die Abundanz (n_i -Anzahl der Individuen/Art bzw. Quantität des Duftstoffes). Der Shannon-Wiener Index wird häufig in populationsökologischen Untersuchungen benutzt um Biodiversitätsdaten zu vergleichen. Jedoch ist ein kalkulierter Index für sich allein genommen ein abstrakter Wert, der erst im Vergleich, z.B. dem Vergleich der Artenvielfalt mehrerer Biotope, oder der Duftvielfalt von mehreren Baumarten, an Bedeutung gewinnt.

$$H_s = -\sum p_i \times \ln p_i$$

$$p_i = n_i / N$$

n_i - Abundanz der einzelnen Duftstoffe

N - Summe aller n_i

Die **Evenness** (E) ist ein standardisierter Shannon-Index und ermöglicht die Vergleichbarkeit von Datenpools mit unterschiedlicher Kategorienzahl. Evenness beschreibt wie gleichmäßig die Arten (Volatile) in der Gesamtpopulation im Vergleich zur maximal gleichmäßigen Verteilung H_{max} verteilt sind. Ein geringer Wert der Evenness würde bedeuten, dass wenige volatile Substanzen das Duftmuster dominieren.

$$E = H_s / H_{max} \times 100\%$$

H_s - Shannon-Wiener Index

$$H_{max} = \ln(N)$$

N - Anzahl Duftstoffe

Der **Simpson's Index für Diversität** (S) gibt die Wahrscheinlichkeit an mit der zwei willkürlich herausgegriffene Individuen in einem Habitat verschiedenen Arten angehören. Er wird in der Ökologie häufig verwendet, um die Biodiversität in einem bestimmten Habitat zu quantifizieren. Er berücksichtigt die Artenzahl (N) und die relative Häufigkeit (n_i). Dieser Index kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je größer die Zahl ist, desto diverser ist das

Habitat bzw. das Duftmuster. Den Wert „0“ würde man nur dann erreichen, wenn in einem Habitat nur eine Art vorkommt, bzw. wenn nur ein Duft im Duftspektrum zu finden wäre.

$$S=1-D$$

$$D=\sum n_i (n_i - 1)/N(N-1)$$

n_i - Abundanz der einzelnen Duftstoffe

N - Summe aller n_i

Die Beta-Diversität dient dem Vergleich der Biodiversität zwischen verschiedenen Ökosystemen. Je weniger Arten die Lebensräume (bei gegebener Alpha-Diversität) gemeinsam haben, desto größer ist die Beta-Diversität. Sind alle lokalen Lebensgemeinschaften an allen lokalen Punkten identisch, wird die Beta-Diversität minimal. Haben sie nicht eine einzige Art gemeinsam, wird sie maximal. Die Beta-Diversität ist besonders bei der Betrachtung der Auswirkung von Variationen in den Lebensbedingungen (z.B. Habitatgradienten wie Temperatur- oder Feuchtegradienten bzw. bei saisonbedingten Änderungen der Duftemissionen) relevant.

Die Einführung der Beta-Diversität als Messgröße soll vor allem dazu dienen, lokale und regionale Effekte auseinanderzuhalten. So kann eine Lebensgemeinschaft lokal aus sehr vielen Arten bestehen, also eine hohe Alpha-Diversität besitzen, regional aber uniform sein, so dass dieselbe artenreiche Lebensgemeinschaft in derselben Zusammensetzung überall auftritt. Im Gegensatz dazu kann die Lebensgemeinschaft an allen untersuchten Orten eher artenarm sein (geringe Alpha-Diversität), regional aber äußerst verschieden. Bei den eigenen Versuchen war die Beta-Diversität ein Maß für die Ähnlichkeit bei einem Vergleich von Duftmustern. Hohe Alpha- und hohe Beta-Diversität müssen also nicht miteinander zusammenhängen.

Der Sørensen Index (G_s) ist eine einfache Größe, die zum Vergleich von zwei Artenlisten bzw. Volatilenlisten geeignet ist. Dieser Index drückt aus wie ähnlich die zwei Listen sind, ohne auf die Abundanz einzelnen Arten oder Volatilen Rücksicht zu nehmen. Hohe Werte deuten auf große Ähnlichkeiten hin. Ohne überlappende Arten würde man auf den Wert 0% kommen.

$$G_s=2C/(A+B)\times 100\%$$

A- Anzahl der Peaks in Probe 1

B- Anzahl der Peaks in Probe 2

C- Anzahl der Peaks die in beiden Proben vorkommen.

Freilandmessungen aus dem Jahr 2006 dienten als Vorversuche und konnten wegen nicht ausgereifter Methodik und unerwarteten Wetterereignissen nicht quantitativ ausgewertet werden. Jedoch konnte die Anwesenheit unterschiedlicher Duftstoffe beobachtet werden. Auf der Basis der Retentionszeiten wurden Alpha- und Beta-Diversität bestimmt. Die Beta-Diversität wurde durch den Sörensen-Index beschrieben und für die Analyse der saisonbedingten Änderungen der Duftmuster verwendet. Die Duftmuster der Mai-, Juli- und Augustproben wurden miteinander verglichen.

Quantitative Analyse

Für die quantitative Analyse wurden aufgrund der chemoökologischen Vorversuche 16 elektrophysiologisch aktive Stoffe ausgewählt. Diese wurden quantitativ mit Single Ion Analyse ausgewertet. Es wurden die Kruskal-Wallis-Anova und der Mann-Whitney U-Test verwendet um das Signifikanzniveau der Unterschiede zu berechnen.

3 Ergebnisse

3.1 Freiland

3.1.1 Saisonale Änderungen der Duftkomponenten

Die 32 Versuchsbäume wurden an 3 Terminen (Mai, Juni und August) beprobt. Ähnlich wie bei den Gewächshausproben wurden für alle Volatile die Diversitätsindizes (Alpha- und Beta-Diversität) berechnet. Die Tabelle 3.1 zeigt die Alpha-Diversität der Duftspektren innerhalb einer Vegetationsperiode. Die Freilandduftproben waren quantitativ sehr unterschiedlich, deswegen wurde in diesem Fall auf eine Quantifizierung verzichtet. Für die Auswertung wurden Duftpeaks berücksichtigt, die bei mindestens 40% der Proben nachgewiesen werden konnten.

In Tabelle 3.2 wurden der Übersichtlichkeit halber nur Werte für die Paare, die sich nur in einem Parameter (Baumart, Exposition, Monat) unterscheiden, gezeigt. Es zeigte sich, dass es eine große Anzahl Duftstoffe gibt, die nur in einem Monat vorkommen. Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 berücksichtigen alle Duftstoffe die anhand von Retentionszeiten beschrieben

wurden. Eine vollständige Liste mit den Substanzidentifikationen aus der Nist Datenbank befindet sich im Anhang (Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2). In Tabelle 3.2 sieht man bei beiden Baumarten und beiden Expositionen geringe Sörensenindizes zwischen Augustmessungen und den beiden anderen Monaten. Das heißt, dass die Duftmuster vom Spätsommer deutlich anders als die vom Frühjahr und vom Hochsommer sind. Die Sörensenindizes zwischen den anderen Monaten sind auch relativ gering und überschreiten nicht 0,7 was auf deutliche Unterschiede hinweist. Die geringsten Unterschiede beobachtet man zwischen Salweide Sonne und Salweide Schatten (0,6-0,7). Bei den Zitterpappeln sind die Sörensenindizes auf Expositionsebene etwas geringen (0,5). Das bedeutet, dass etwa die Hälfte der Volatilen identisch ist. Ähnliche Sörensenindizes (0,4-0,6) wurden auf Artebene in der gleichen Exposition berechnet (ZPSo/SWSo und ZPSch/SWSch). Die Hypothese, dass die Duftmuster sich im Laufe der Vegetationsperiode verändern, konnte somit bestätigt werden. Diese Tatsache beschränkte weitere Probennahmen auf die Zeit der Flugaktivität der Falter.

Tabelle 3.1. Anzahl der Peaks der Duftspektren während der Vegetationsperiode.

| SW So | | | SW Sch | | | ZP So | | | ZP Sch | | |
|-------|------|--------|--------|------|--------|-------|------|--------|--------|------|--------|
| Mai | Juli | August | Mai | Juli | August | Mai | Juli | August | Mai | Juli | August |
| 30 | 51 | 68 | 51 | 43 | 67 | 37 | 50 | 62 | 49 | 40 | 44 |

Tabelle 3.2. Beta-Diversität der Freilandduftspektren im Saisonverlauf, ausgedrückt durch den Sörensen Index for Similarity.

| | | SW So | | | SW Sch | | | ZP So | | | ZP Sch | | |
|--------|------|-------|-----|------|--------|-----|------|-------|-----|------|--------|-----|------|
| | | V | VII | VIII | V | VII | VIII | V | VII | VIII | V | VII | VIII |
| SW So | V | | 0,4 | 0,2 | 0,7 | | | 0,4 | | | | | |
| | VII | 0,4 | | 0,2 | | 0,6 | | | 0,5 | | | | |
| | VIII | 0,2 | 0,2 | | | | 0,7 | | | 0,5 | | | |
| SW Sch | V | 0,7 | | | | 0,5 | 0,2 | | | | 0,6 | | |
| | VII | | 0,6 | | 0,5 | | 0,2 | | | | | 0,6 | |
| | VIII | | | 0,7 | 0,2 | 0,2 | | | | | | | 0,4 |
| ZP So | V | 0,4 | | | | | | | 0,5 | 0,2 | 0,5 | | |
| | VII | | 0,5 | | | | | 0,5 | | 0,2 | | 0,5 | |
| | VIII | | | 0,5 | | | | 0,2 | 0,2 | | | | 0,5 |
| ZP Sch | V | | | | 0,6 | | | 0,5 | | | | 0,6 | 0,2 |
| | VII | | | | | 0,6 | | | 0,5 | | 0,6 | | 0,2 |
| | VIII | | | | | | 0,4 | | | 0,5 | 0,2 | 0,2 | |

3.1.2 Tagesgang der Volatilenemissionen

Für dieses Experiment wurden je 8 Versuchsbäume 3-mal am Tag beprobt. Die Messungen erfolgten um 11.00, 15.00 und um 19.00 Uhr für jeweils 2 Stunden. Die Hypothese, dass das Duftstoffmuster sich im Laufe des Tages ändert, wurde überprüft. Wenn man die Anzahl der notierten Duftstoffe betrachtet (s. Tabelle 3.3) stellt man eine geringere Anzahl an Volatilen

in den Abendstunden (C) fest. Weiterhin wurde die Beta-Diversität anhand der Sørensen Indizes analysiert (Tabelle 3.4). Diese zeigten extreme Unterschiede zwischen den Abendaufnahmen und den anderen Aufnahmezeiten. Hier war der Sørensen Index extrem niedrig was auf geringe Überlappungen hindeutet. Die geringsten Unterschiede wurden bei den sonnigen Expositionen zwischen Aufnahmen um 11Uhr und um 15Uhr festgestellt.

Für die Duftstoffe, die bei über 40% der Duftproben vorkamen, wurde die relative Quantität verglichen. Es wurde festgestellt, dass β -Caryophyllen in späteren Stunden vermehrt emittiert wird. Der Anteil von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat im Duftmuster variiert sehr stark. Die Abbildung 3.1 zeigt in welchen Proportionen die ausgewählten Stoffe bzw. Stoffgruppen freigesetzt werden. Man erkennt hier eine hohe Variabilität und einige artspezifische Duftstoffe. Es fällt auf, dass Isoprenderivate nur bei der Salweide und β -Caryophyllen überwiegend bei der Zitterpappel vorkommen. Der 100%ige Anteil des (Z)-3-Hexen-1-yl-acetats im Duftspektrum der Salweide im Schatten lässt sich mit der sehr geringen n-Zahl erklären. Diese n-Zahl entstand wegen vielen Ausfällen und misslungenen Duftproben trotz 8-maliger Wiederholung.

Tabelle 3.3. Alpha Diversität der Duftspektren in den Freilandproben (n zwischen 2 und 8)

| | A (11:00-13:00) | B (15:00-17:00) | C (19:00-21:00) |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SW So | 19 | 29 | 22 |
| SW Sch | 11 | 17 | 3 |
| ZP So | 28 | 22 | 11 |
| ZP Sch | 24 | 25 | 14 |

Tabelle 3.4. Beta-Diversität der Freilandduftspektren zu verschiedenen Tageszeiten, ausgedrückt durch den Sørensen Index for Similarity. Aufnahmezeiten waren A 11.00-13.00Uhr, B 15.00-17.00Uhr, C 19.00-21.00Uhr

| | | SW So | | | SW Sch | | | ZP So | | | ZP Sch | | |
|--------|---|-------|-----|-----|--------|-----|-----|-------|-----|-----|--------|-----|-----|
| | | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| SW So | A | | 0,6 | 0,5 | | | | | | | | | |
| | B | 0,6 | | 0,5 | | | | | | | | | |
| | C | 0,5 | 0,5 | | | | | | | | | | |
| SW Sch | A | | | | | 0,4 | 0,4 | | | | | | |
| | B | | | | 0,4 | | 0,3 | | | | | | |
| | C | | | | 0,4 | 0,3 | | | | | | | |
| ZP So | A | | | | | | | | 0,6 | 0,2 | | | |
| | B | | | | | | | 0,6 | | 0,2 | | | |
| | C | | | | | | | 0,2 | 0,2 | | | | |
| ZP Sch | A | | | | | | | | | | | 0,5 | 0,4 |
| | B | | | | | | | | | | 0,5 | | 0,4 |
| | C | | | | | | | | | | 0,4 | 0,4 | |

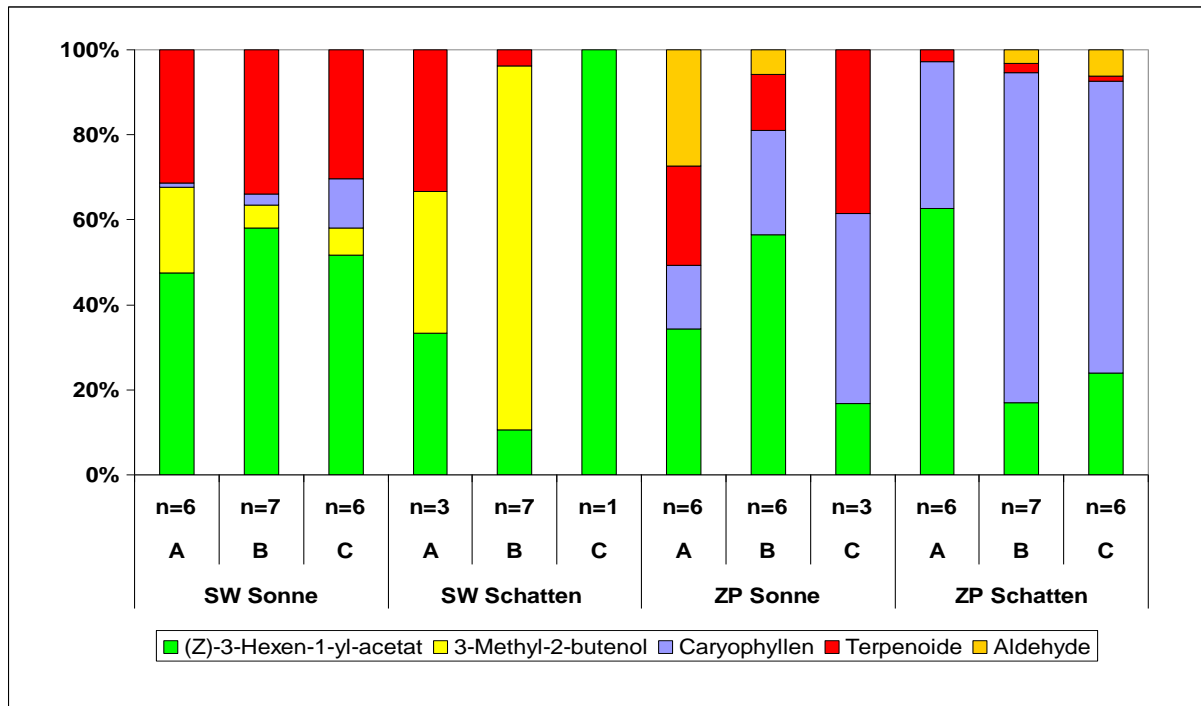


Abbildung 3.1. Prozentanteil der Stoffgruppen in den Duftspektren der drei Messzeiten. SW=Salweide, ZP=Zitterpappel; Messzeiten: A=11.00-13.00Uhr, B=15.00-17.00Uhr, C=19.00-21.00Uhr. Die Gruppe der Terpenoide besteht aus Germacren D, 1,3,8-p-Menthatrien, .alpha Farnesen, .alpha Cubeben und Copaen. Die Gruppe der Aldehyde besteht aus Nonanal und Decanal.

Die Unterschiede im Tagesverlauf waren fast so deutlich wie im Jahresverlauf, deswegen wurden weitere Aufnahmen nur während der Aktivitätszeit der Falter (19.00-21.00 Uhr) durchgeführt.

3.2 Gewächshaus

Die Duftproben wurden im Gewächshaus im Juni 2007 und im Mai 2008 in der Zeit zwischen 19.00 und 21.00 Uhr genommen. Zehn Salweiden und zehn Zitterpappeln wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.9. In beiden Versuchsjahren wurden die gleichen Bäume in der gleichen Gewächshauskammer beprobt. Die Saisonunterschiede machten sich hier deutlich an der Emissionsintensität bemerkbar. Im Juni 2007 waren die Emissionen deutlich geringer als im Mai 2008. Aus diesem Grund wurden beide Versuche separat ausgewertet. Nicht alle Duftkomponenten konnten sicher identifiziert werden. Für einen Vergleich der Volatilenmuster wurden Diversitätsindizes berechnet. Diese sind in Tabelle 3.7 und Tabelle 3.8 dargestellt. Für einen zusätzlichen Überblick über die Beta-Diversität wurden auch Tabelle 3.5 und 3.6 erstellt. Hier wurden die Duftproben sowohl auf Artebene (Beta 1) als auch auf Expositionsebene (Beta 2) verglichen. Bei gleichen Grenzparametern wurde im Jahr 2007 eine deutlich geringere Anzahl an Peaks gefunden. Im Jahr 2007 wurden im Gewächshaus 41 und im Jahr 2008 insgesamt 66 Duftpeaks gefunden. Im Jahr 2007 wurden

11 Stoffe sowohl bei den Zitterpappeln als auch bei den Salweiden gefunden. Im Jahr 2008 waren es 19 gemeinsame Duftstoffe (Tabelle 3.5 und Tabelle 3.6). Die Alpha-Diversität der Volatile war bei den Zitterpappeln höher als bei den Salweiden. Die Beta-Diversität auf der Artebene zeigte in beiden Versuchsjahren ähnliche Werte (0,45-0,47) was bedeutet, dass fast die Hälfte der Duftstoffe überlappend waren und der Rest artspezifisch war. Die Beta-Diversität (Sörensenindex) auf Expositionsebene war bei den Zitterpappeln ähnlich hoch wie auf Artebene (etwa 0,5). Fast die Hälfte der Peaks war expositionsabhängig. Bei den Salweiden war die Beta-Diversität auf Expositionsebene in beiden Versuchsjahren sehr unterschiedlich. Im Jahr 2007 betrug sie 0,36 und deutete somit auf eine geringe Überlappung zwischen den Duftspektren von Salweide Sonne und Salweide Schatten hin. In der folgenden Vegetationsperiode wurden keine nur für die sonnige Exposition typischen Peaks gefunden. Hier war die Überlappung der Duftspektren sehr hoch (Sörensenindex 0,88).

Tabelle 3.5. Die Anzahl der Volatile, die im Jahr 2007 in den Gewächshausmessungen gefunden wurden

| Salweide / Zitterpappel | | | Salweide | | | Zitterpappel | | |
|-------------------------|--------------|------------------|--------------------|-----------|--------------|--------------------|-----------|--------------|
| Beide Baumarten | nur Salweide | nur Zitterpappel | Beide Expositionen | nur Sonne | nur Schatten | Beide Expositionen | nur Sonne | nur Schatten |
| 11 | 15 | 15 | 6 | 8 | 13 | 11 | 3 | 13 |

Tabelle 3.6. Die Anzahl, der Volatile die im Jahr 2008 in den Gewächshausmessungen gefunden wurden

| Salweide / Zitterpappel | | | Salweide | | | Zitterpappel | | |
|-------------------------|--------------|------------------|--------------------|-----------|--------------|--------------------|-----------|--------------|
| Beide Baumarten | nur Salweide | nur Zitterpappel | Beide Expositionen | nur Sonne | nur Schatten | Beide Expositionen | nur Sonne | nur Schatten |
| 19 | 10 | 37 | 23 | 0 | 6 | 22 | 28 | 6 |

Die Evenness-Werte lagen zwischen 44,5 und 76,7 und deuteten damit auf eine gleichmäßige quantitative Verteilung innerhalb der Volatilspektren hin. Die Düfte waren nicht von wenigen Substanzen dominiert, sondern waren aus ähnlichen Mengen vieler Einzelsubstanzen zusammengesetzt. Im Jahr 2007 wurden bei Salweide Sonne und im Jahr 2008 bei Salweide Schatten maximale Evenness-Werte notiert. Eine minimale Evenness lag im Jahr 2007 bei Zitterpappel Sonne und in Jahr 2008 bei Zitterpappel Schatten vor. Generell waren Evenness-Werte bei den Salweiden höher als bei den Zitterpappeln.

Der Simpson Index, der gleichzeitig die absolute Peakanzahl und die jeweiligen Peakflächen berücksichtigt, war immer sehr hoch (etwa 0,80). Dieser Index sagt aus, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit zwei willkürlich herausgegriffene Peaks zwei unterschiedliche Substanzen sind. Im Jahr 2007 bei Zitterpappel Sonne ist die Wahrscheinlichkeit am

geringsten (0,44). Dies ergibt sich aus relativ geringer Peakanzahl (14) und der starken quantitativen Dominanz des (Z)-3-Hexen-1-yl-acetats im Duftspektrum (s. Anhang Tabelle 6.1).

17 von den sicher identifizierten Stoffen konnten in beiden Versuchsjahren an Zitterpappel und an den Salweiden nachgewiesen werden (s. Tabelle 3.9 fette Schrift). Nur alpha Farnesen wurde in beiden Versuchsjahren nur bei den Pappeln gefunden. Man konnte beobachten, dass im Mai 2008 die Bäume während der gleichen Messzeit größere Mengen von Duftstoffen als im Juni des Vorjahres abgegeben haben, obwohl die Raumlufttemperatur in der Gewächshauskammer während der Messzeit ähnlich war (20-23°C). Die minimalen Duftstoffmengen, die in den sämtlichen Tabellen auftauchen, entsprechen etwa der Konzentration 10^{-7} (0,1 ng/mg). In beiden Versuchsjahren wurden viele Stoffe, deren Identifizierung unsicher war, notiert. Oft waren es sogar artspezifische Substanzen.

Tabelle 3.7. Diversitätsindizes der Volatile im Gewächshaus im Jahr 2007

| | Alpha-Diversität | Beta 1 (Artebene) Sörensen Index | Beta 2 (Exposition) Sörensen Index | Evenness | Simpson Index |
|-----------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------|---------------|
| Salweide Sonne | 13 | 0,47 | 0,36 | 76,7 | 0,82 |
| Salweide Schatten | 18 | | | 64,2 | 0,76 |
| Zitterpappel Sonne | 14 | | 0,57 | 44,5 | 0,44 |
| Zitterpappel Schatten | 24 | | | 70,7 | 0,84 |

Tabelle 3.8. Diversitätsindizes der Volatile im Gewächshaus im Jahr 2008

| | Alpha-Diversität | Beta 1 (Artebene) Sörensen Index | Beta 2 (Exposition) Sörensen Index | Evenness | Simpson Index |
|-----------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------|---------------|
| Salweide Sonne | 23 | 0,45 | 0,88 | 69,6 | 0,81 |
| Salweide Schatten | 29 | | | 75,9 | 0,85 |
| Zitterpappel Sonne | 50 | | 0,56 | 63,6 | 0,87 |
| Zitterpappel Schatten | 28 | | | 51,6 | 0,67 |

In der Tabelle 3.10 und Tabelle 3.11 sind nur sicher identifizierte Duftstoffe dargestellt. Eine Tabelle mit Duftstoffen die nur anhand von Nist-Datenbank Vorschlägen entstand, befindet sich im Anhang (Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2).

Im nächsten Schritt wurden die Antennen von *Smerinthus ocellatus* und von *Cerura vinula* als Informationsfilter genutzt, um die weiteren quantitativen Analysen auf die elektrophysiologisch aktiven Stoffe zu konzentrieren. Unter den elektrophysiologisch aktiven Substanzen waren sowohl baumartenspezifische als auch von beiden Baumarten emittierte Grünblattdüfte wie (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und (Z)-3-Hexen-1-ol.

Tabelle 3.9. Volatile aus den Gewächshausproben, die mit authentischen Standards identifiziert wurden. Fett markiert sind Stoffe die in beiden Versuchsjahren nachgewiesen wurden. Orange markierte finden sich nur bei der Salweide, grün markierte nur bei der Zitterpappel. Mittlere Peakfläche: „+“ von 9×10^5 bis 2×10^7 (klein); „++“ von 2×10^7 bis 6×10^7 (mittel); „+++“ von 6×10^7 bis 8×10^7 (groß); „++++“ $> 1 \times 10^8$ (sehr groß).

| Stoffname | CAS | Mittlere Peakfläche | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|------|
| | | 2007 | 2008 |
| <i>Oxylipine</i> | | | |
| Hexan-1-ol | 000111-27-3 | + | 0 |
| (E)-2-Hexen-1-ol | 000928-95-0 | + | 0 |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | 000928-96-1 | + | + |
| Hexylacetat | 000142-92-7 | + | + |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | ++ | ++++ |
| (Z)-3-Hexenyl isovalerat | 035154-45-1 | 0 | + |
| (Z)-3-Hexenylbutyrat | 016491-36-4 | + | + |
| Octanal | 000124-13-0 | + | 0 |
| Nonanal | 000124-19-6 | + | + |
| Decanal | 000112-31-2 | + | + |
| <i>aromatische Verbindungen</i> | | | |
| p-Xylol | 000106-42-3 | + | 0 |
| 1,2,3-Trimethyl-benzol | 000526-73-8 | + | + |
| 1,2,4-Trimethyl-benzol | 000095-63-6 | + | 0 |
| 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 000620-14-4 | + | + |
| Phenol | 000108-95-2 | + | 0 |
| Benzylalkohol | 000100-51-6 | + | + |
| Benzaldehyd | 000100-52-7 | + | + |
| Methylsalicylat | 000119-36-8 | + | +++ |
| <i>Alkane</i> | | | |
| Hexadecan | 000544-76-3 | + | 0 |
| Heptadecan | 000629-78-7 | + | 0 |
| Octadecan | 000593-45-3 | + | 0 |
| Heneicosan | 000629-94-7 | ++ | 0 |
| <i>Terpenoide</i> | | | |
| 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | + | + |

| | | | |
|---|--------------------|---|----|
| 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | 000078-70-6 | + | + |
| (E)-6,10-Dimethyl-5,9-undecadien-2-on (geranyl acetone) | 003796-70-1 | + | 0 |
| α-Farnesen | 000502-61-4 | + | + |
| Trans-Caryophyllen | 000087-44-5 | 0 | + |
| <i>Weichmacherderivate</i> | | | |
| 2-Ethyl-1-hexanol | 000104-76-7 | + | + |
| <i>Zuckerderivate</i> | | | |
| 1-Methoxy-2-propanol | 000107-98-2 | + | ++ |
| <i>Fettsäurederivate</i> | | | |
| Methylpalmitat | 000112-39-0 | + | + |
| Methylstearat | 000112-61-8 | + | + |

Tabelle 3.10. Volatile aus der Spurenanalyse von Salweiden und Zitterpappeln aus dem Gewächshaus im Jahr 2007, die mit authentischen Standards bestätigt worden sind. Mittlere Peakfläche [TIC]: „+“ von 10^5 bis 2×10^7 (klein); „++“ von 2×10^7 bis 6×10^7 (mittel); „+++“ von 6×10^7 bis 8×10^7 (groß); „++++“ $> 1 \times 10^8$ (sehr groß).

| Nr. | RZ | Stoffname | CAS | Mittlere Peakfläche |
|-----|--------|---------------------------------------|-------------|---------------------|
| 1 | 7,554 | 1-Methoxy-2-propan-1-ol | 000107-98-2 | + |
| 2 | 8,265 | p-Xylol | 000106-42-3 | + |
| 3 | 9,007 | 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 000620-14-4 | + |
| 4 | 9,679 | 1,2,4-Trimethyl-benzol | 000095-63-6 | + |
| 5 | 9,794 | Hexylacetat | 000142-92-7 | + |
| 6 | 10,031 | 1,2,3-Trimethyl-benzol | 000526-73-8 | + |
| 7 | 10,158 | Octanal | 000124-13-0 | + |
| 8 | 10,616 | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | ++ |
| 9 | 11,014 | 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | + |
| 10 | 11,141 | Hexan-1-ol | 000111-27-3 | + |
| 11 | 11,732 | (Z)-3-Hexen-1-ol | 000928-96-1 | + |
| 12 | 12,038 | Nonanal | 000124-19-6 | + |
| 13 | 12,068 | (E)-2-Hexen-1-ol | 000928-95-0 | + |
| 14 | 13,122 | (Z)-3-Hexenyl-butanoat | 016491-36-4 | + |
| 15 | 13,476 | 2-Ethyl-1-hexanol | 000104-76-7 | + |
| 16 | 13,832 | Decanal | 000112-31-2 | + |
| 17 | 14,304 | Benzaldehyd | 000100-52-7 | + |
| 18 | 14,462 | 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol | 000078-70-6 | + |
| 19 | 15,469 | Hexadecan | 000544-76-3 | + |
| 20 | 17,032 | Heptadecan | 000629-78-7 | + |
| 21 | 17,745 | alpha.-Farnesen | 000502-61-4 | + |
| 22 | 18,278 | Methylsalicylat | 000119-36-8 | + |
| 23 | 18,515 | Octadecan | 000593-45-3 | + |
| 24 | 19,248 | (E)-6,10-Dimethyl-5,9-undecadien-2-on | 003796-70-1 | + |
| 25 | 19,49 | Benzylalkohol | 000100-51-6 | + |
| 26 | 21,23 | Phenol | 000108-95-2 | + |
| 27 | 23,979 | Methylpalmitat | 000112-39-0 | + |
| 28 | 26,391 | Methylstearat | 000112-61-8 | + |
| 29 | 28,679 | Heneicosan | 000629-94-7 | ++ |

Tabelle 3.11. Volatile aus der Spurenanalyse von Salweiden und Zitterpappeln im Gewächshaus im Jahr 2008 die mit authentischen Standards bestätigt worden sind. Mittlere Peakfläche [TIC]: „+“ von 10^5 bis 2×10^7 (klein); „++“ von 2×10^7 bis 6×10^7 (mittel); „+++“ von 6×10^7 bis 8×10^7 (groß); „++++“ $> 1 \times 10^8$ (sehr groß).

| Nr. | RZ | Stoffname | CAS | Mittlere Peakfläche |
|-----|--------|---|-------------|---------------------|
| 1 | 7,829 | 1-Methoxy-2-propan-1-ol | 000107-98-2 | ++ |
| 2 | 9,274 | 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 000620-14-4 | + |
| 3 | 10,007 | Hexylacetat | 000142-92-7 | + |
| 4 | 10,771 | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | ++++ |
| 5 | 11,158 | 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | + |
| 6 | 11,802 | (Z)-3-Hexen-1-ol | 000928-96-1 | + |
| 7 | 12,105 | Nonanal | 000124-19-6 | + |
| 8 | 13,181 | (Z)-3-Hexenylbutyrat | 016491-36-4 | + |
| 9 | 13,399 | (Z)-3-Hexenyl-isovalerat | 035154-45-1 | + |
| 10 | 13,89 | Decanal | 000112-31-2 | + |
| 11 | 14,491 | 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | 000078-70-6 | + |
| 12 | 15,68 | Caryophyllen | 000087-44-5 | + |
| 13 | 17,772 | α -Farnesen | 000502-61-4 | + |
| 14 | 18,315 | Methylsalicylat | 000119-36-8 | +++ |
| 15 | 19,528 | Benzylalkohol | 000100-51-6 | + |
| 16 | 24,004 | Methylpalmitat | 000112-39-0 | + |
| 17 | 26,438 | Methylstearat | 000112-61-8 | + |

3.2.1 Quantität

Für die quantitative Auswertung wurden 16 Duftstoffe, die in den Vorversuchen elektrophysiologische Aktivität zeigten, ausgewählt. Die Abbildung 3.2 gibt einen Überblick über die quantitativen Verhältnisse der Volatilen in exemplarischen Messungen aus dem Jahr 2008.

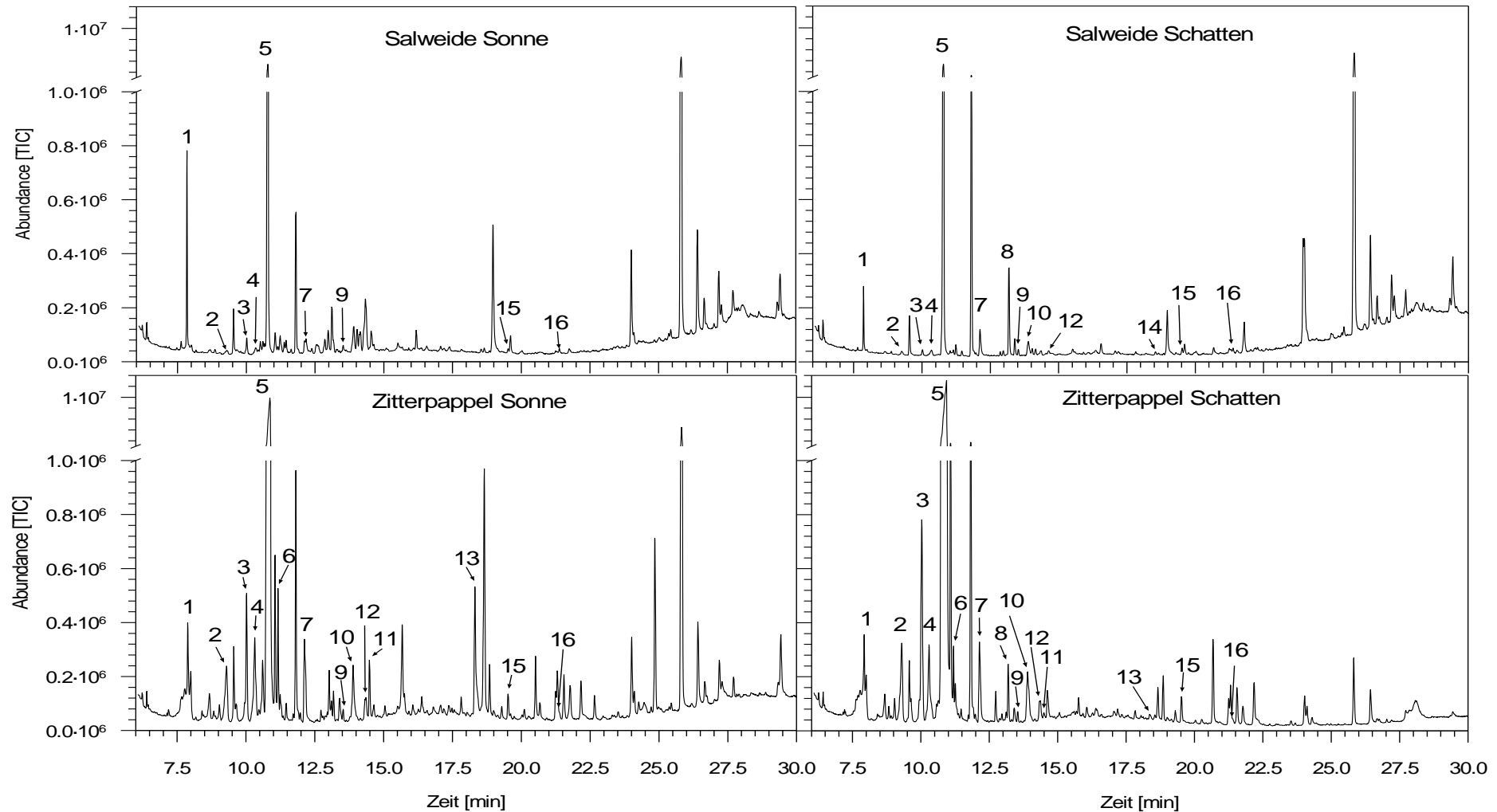


Abbildung 3.2. Representative Duftspektren der Bäume aus dem Gewächshaus (2008). Die markierten Substanzen waren elektrophysiologisch aktiv und wurden quantitativ ausgewertet [1]: 1-Methoxy-2-propan-1-ol, [2]: 1-Ethyl-3-methyl-benzol, [3]: Hexylacetat [4]: 1,2,4-Trimethyl-benzol [5]: (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat [6]: 6-Methyl-5-hepten-2-on [7]: Nonanal [8]: (Z)-3-Hexenylbutyrat [9]: 2-Ethyl-1-hexanol [10]: Decanal [11]: 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) [12]: Benzaldehyd [13]: Methylsalicylat [14]: Octadecan [15]: Benzylalkohol [16]: Methyltetradecanoat

Die quantitative Auswertung wurde sowohl für die Gewächshausproben von 2007 als auch von 2008 durchgeführt (Tabelle 3.12). Die letzte Substanz (16) Methyltetradecanoat war bei der Messung der Duftdiversität in den meisten Proben unterhalb der Grenze zuverlässiger Quantifizierung, wurde aber wegen den auffälligen Antennenreaktionen trotzdem quantitativ ausgewertet. Die Daten vom Jahr 2007 und vom Jahr 2008 waren signifikant unterschiedlich (U-Test), deswegen war eine separate Auswertung notwendig. Die Ergebnisse der quantitativen Auswertung sind in Tabelle 3.12 sowie in Abbildung 3.3 bis 3.9 dargestellt. Bei vielen Duftstoffen konnte man höhere Emissionsraten im Jahr 2008 feststellen. In diesem Jahr wurden bei 13 von 16 Stoffen quantitativ statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Expositionsvarianten festgestellt (Tabelle 3.12). Im Jahr 2007 waren die Zitterpappelemissionen von (Z)-3-Hexen-1-yl butyrat, Hexylacetat, Methylsalicylat und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat höher als bei den Salweiden (Abbildung 3.3). Im Jahr 2008 wurden sogar sechs Substanzen in größerer Menge von Zitterpappeln als von Salweiden emittiert. Es waren Hexylacetat, Benzylaldehyd, 6-Methyl-5-hepten-2-on, Nonanal, 1,2,4-Trimethylbenzol und Decanal. Die Emissionen von Methyltetradecanoat und 1-Methoxy-2-propanol waren signifikant niedriger als bei den Salweiden (Abbildung 3.4).

Tabelle 3.12. Signifikanzniveau nach Kruskal-Wallis ANOVA zwischen den Expositionen (Sonne/Schatten) und Baumarten (Salweide/Zitterpappel) für elektrophysiologisch aktive Duftstoffe. Die Reihenfolge ergibt sich aus der Retentionzeit. x= die gefundene Menge erlaubte keine statistische Analyse

| Nr. | Stoffname | CAS | Kruskal-Wallis-ANOVA 2007 | | Kruskal-Wallis-ANOVA 2008 | |
|-----|---|-------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | | | H | p | H | p |
| 1 | 1-Methoxy-2-propanol | 000107-98-2 | 6,050 | 0,109 | 7,420 | 0,059 |
| 2 | 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 000620-14-4 | 4,000 | 0,261 | 12,120 | 0,007** |
| 3 | Hexylacetat | 000142-92-7 | 7,244 | 0,064 | 15,000 | 0,002** |
| 4 | 1,2,4-Trimethyl-benzol | 000095-63-6 | 4,028 | 0,258 | 13,514 | 0,003** |
| 5 | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | 7,371 | 0,060 | 13,514 | 0,003** |
| 6 | 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | 3,398 | 0,334 | 12,993 | 0,004** |
| 7 | Nonanal | 000124-19-6 | 3,067 | 0,381 | 9,651 | 0,021* |
| 8 | (Z)-3-Hexenylbutyrat | 016491-36-4 | 11,205 | 0,010* | 10,257 | 0,016* |
| 9 | 2-Ethyl-1-hexanol | 000104-76-7 | 0,611 | 0,893 | 3,960 | 0,265 |
| 10 | Decanal | 003856-25-5 | 4,457 | 0,216 | 11,906 | 0,007** |
| 11 | 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | 000078-70-6 | 14,091 | 0,002** | 14,735 | 0,002** |
| 12 | Benzaldehyd | 000100-52-7 | 10,096 | 0,017* | 14,451 | 0,002** |
| 13 | Methylsalicylat | 000119-36-8 | 6,222 | 0,101 | 16,106 | 0,001** |
| 14 | Octadecan | 000593-45-3 | x | x | x | x |
| 15 | Benzylalkohol | 000100-51-6 | 6,874 | 0,076 | 15,571 | 0,001** |
| 16 | Methyltetradecanoat | 124-10-7 | 3,247 | 0,355 | 9,445 | 0,023* |

Tabelle 3.13. Quantitative Unterschiede auf Art- und Expositionsebene zwischen den Varianten. Mann-Whitney U-Test

| Stoff Name | CAS | RZ | Ion | 2007 | | | 2008 | | |
|---|-------------|--------|-----|-------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|
| | | | | SW/ZP | SW So/Sch | ZP So/Sch | SW/ZP | SW So/Sch | ZP So/Sch |
| 1-Methoxy-2-propanol | 000107-98-2 | 7,9 | 45 | | | | * | | |
| 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 000620-14-4 | 9,1 | 105 | | | | | | * |
| 1,2,4-Trimethyl-benzol | 000095-63-6 | 10,28 | 105 | | | | ** | | |
| Hexylacetat | 000142-92-7 | 10,01 | 43 | * | | | *** | | |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | 10,7 | 67 | * | | | | | * |
| 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | 11,024 | 55 | | | | *** | | |
| Nonanal | 000124-19-6 | 12,12 | 57 | | | | ** | | |
| (Z)-3-Hexenylbutyrat | 016491-36-4 | 13,17 | 67 | ** | | | | | * |
| 2-Ethyl-1-hexanol | 000104-76-7 | 13,5 | 83 | | | | | | |
| Decanal | 003856-25-5 | 13,8 | 41 | | | | ** | | |
| 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | 000078-70-6 | 14,44 | 71 | ** | | | | | * |
| Benzaldehyd | 000100-52-7 | 14,36 | 77 | | | | *** | | |
| Methylsalicylat | 000119-36-8 | 18,24 | 120 | * | | | | | ** |
| Octadekan | 000593-45-3 | 18,5 | 57 | | | | | | |
| Benzylalkohol | 000100-51-6 | 19,45 | 79 | | * | | | * | |
| Methyltetradekanoat | 124-10-7 | 21,391 | 74 | | | | ** | | |

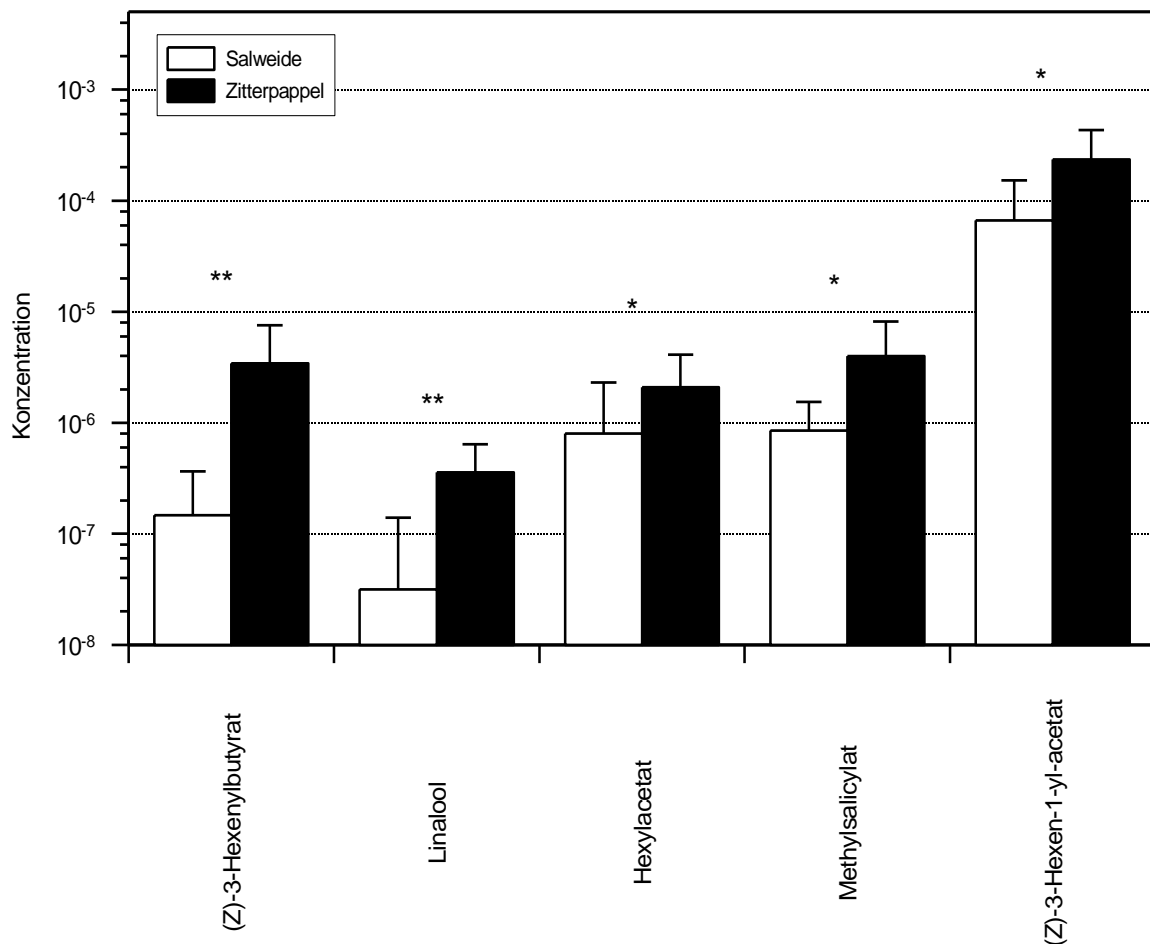


Abbildung 3.3. Alle Duftstoffe die im Jahr 2007 einen signifikanten Unterschied zwischen den Baumarten zeigten. Mann-Whitney U-Test. MW+SA. Konzentration in g/g in *MeOH/CH₃CL₂* 1:2

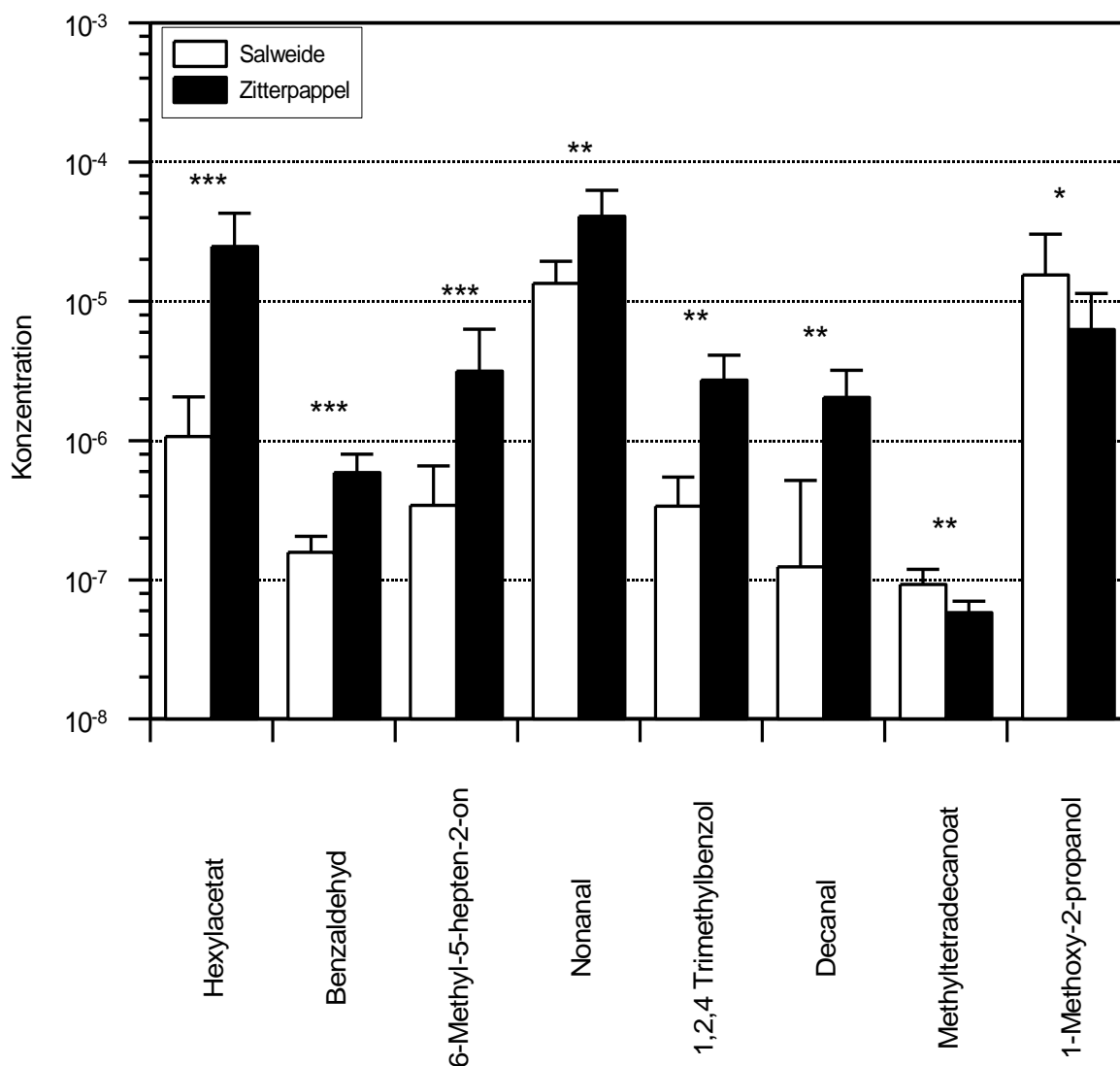


Abbildung 3.4. Alle Duftstoffe die im Jahr 2008 einen signifikanten Unterschied zwischen den Baumarten ausmachten. Mann-Whitney U-Test. MW+SA. Konzentration in g/g in *MeOH/CH₃CL₂* 1:2.

In den weiteren quantitativen Analysen konnte man bei 5 Stoffen (Methylsalicylat, Linalool, (Z)-3-Hexen-1-yl butyrat, 1-Ethyl-3-methyl-benzol und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat) (Abbildung 3.6) zwischen den unterschiedlich exponierten Zitterpappeln und bei einem Stoff (Benzylalkohol) (Abbildung 3.5) zwischen den unterschiedlich exponierten Salweiden statistisch signifikante Unterschiede nachweisen. Aufgrund höherer Emissionsraten waren diese Unterschiede fast ausschließlich im Jahr 2008 statistisch signifikant. Nur bei Benzylalkohol waren die Unterschiede auch im Jahr 2007 signifikant.

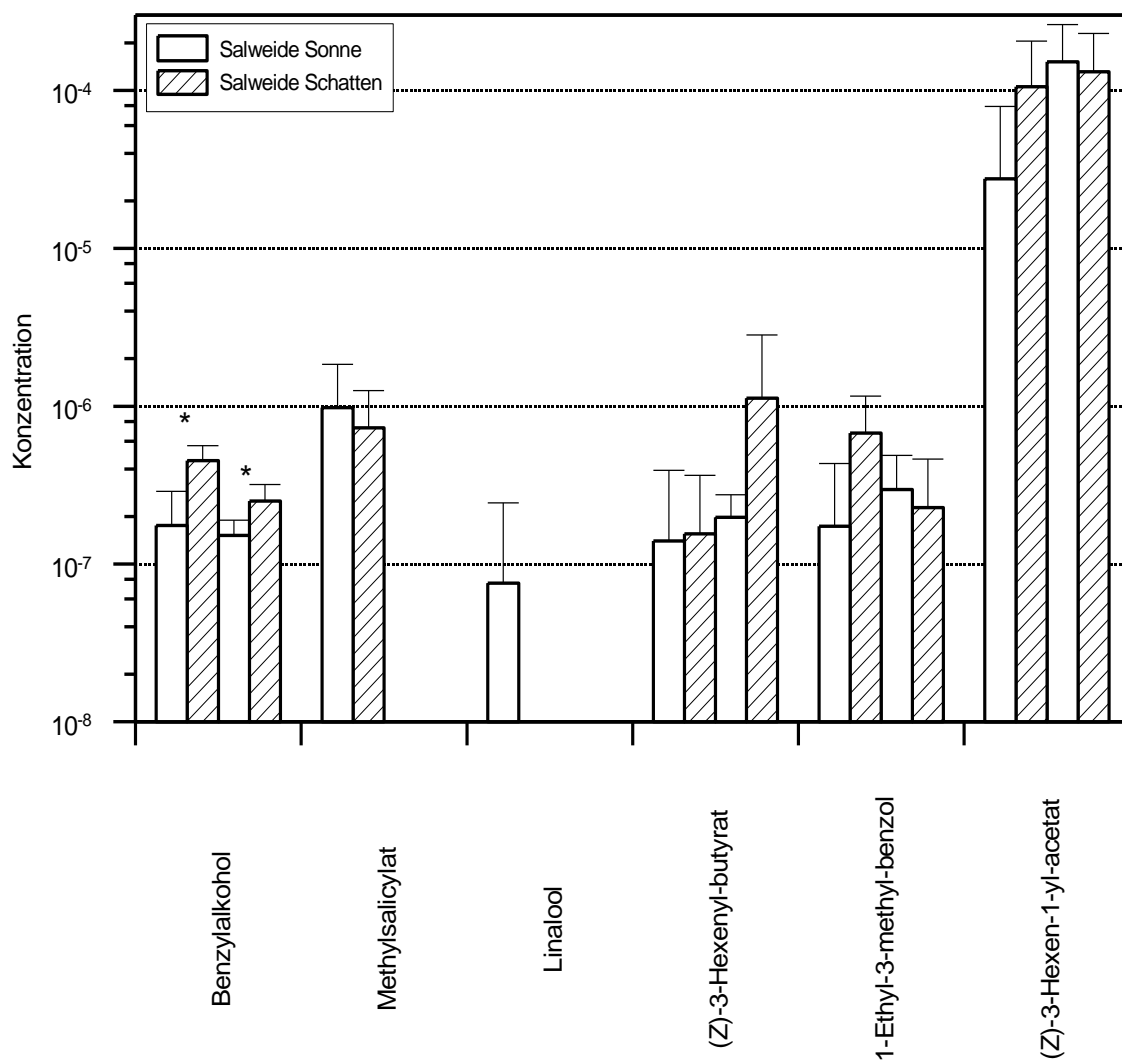


Abbildung 3.5. Konzentration der Duftstoffe in Duftspektren der Salweiden in Versuchsjahren 2007 und 2008. Substanzen deren Emission expositionsabhängig war. Mann-Whitney U-Test. MW+SA. Konzentration in g/g in MeOH/CH₂Cl₂ 1:2.

Bei den Zitterpappeln waren die Emissionen von Methylsalicylat und Linalool in der sonnigen Exposition höher als in der schattigen Exposition. Wiederum emittierten die Bäume im Schatten mehr von (Z)-3-Hexenyl-butyrat, 1-Ethyl-3-methyl-benzol und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat (Abbildung 3.6).

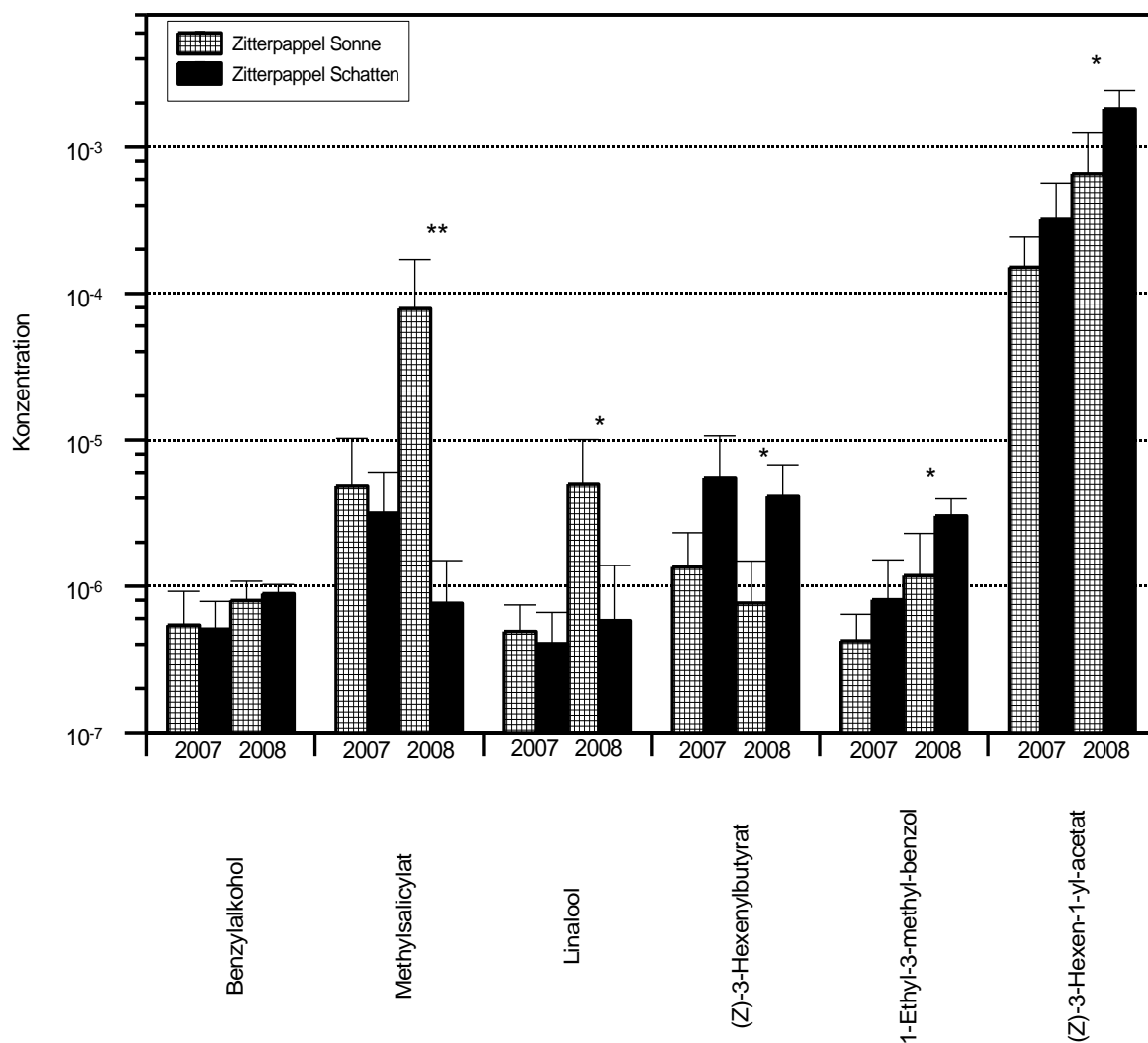


Abbildung 3.6. Konzentration der Duftstoffe in Duftspektren der Zitterpappel in Versuchsjahren 2007 und 2008. Substanzen deren Emission expositionsabhängig war. Mann-Whitney U-Test. MW+SA. Konzentration in g/g in $MeOH/CH_2Cl_2$ 1:2.

Vier Substanzen wurden ausgewählt, um sie in separaten Diagrammen zu präsentieren. Methylsalicylat und Linalool zeigten sehr ähnliches Emissionsverhalten, aber die Bäume emittierten deutlich größere Mengen Methylsalicylat als Linalool (Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8). Bei beiden Stoffen wurde im Mai 2008 keine Emission bei den Salweiden notiert und die quantitativen Unterschiede zwischen den unterschiedlich exponierten Zitterpappeln waren statistisch signifikant. In beiden Versuchsjahren und bei beiden Substanzen waren die Emissionen der Zitterpappel signifikant höher als bei den Salweiden.

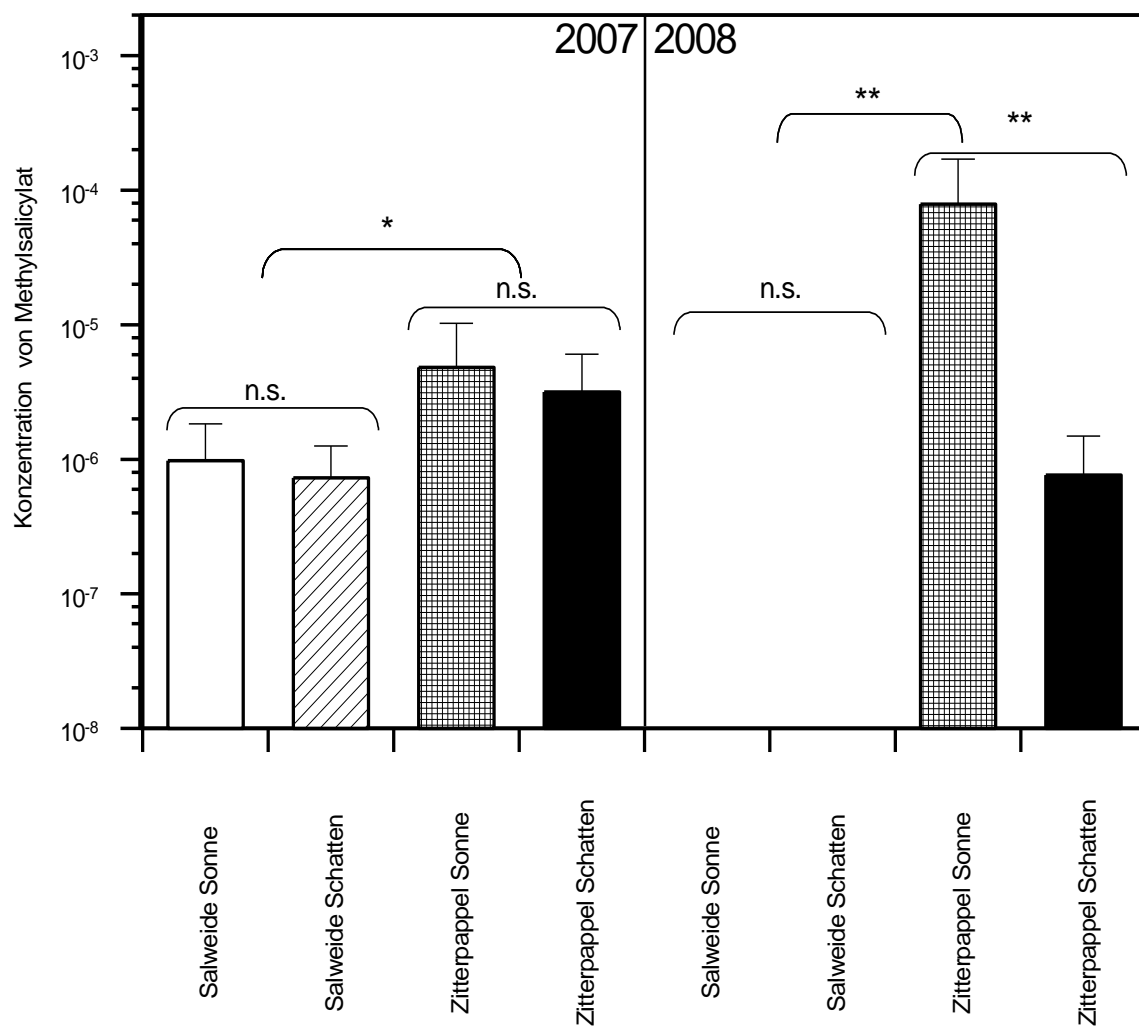


Abbildung 3.7. Quantitative Auswertung von Methylsalicylat. Mann-Whitney U-Test. MW+SA. . . Konzentration in g/g in $MeOH/CH_3CL_2$ 1:2.

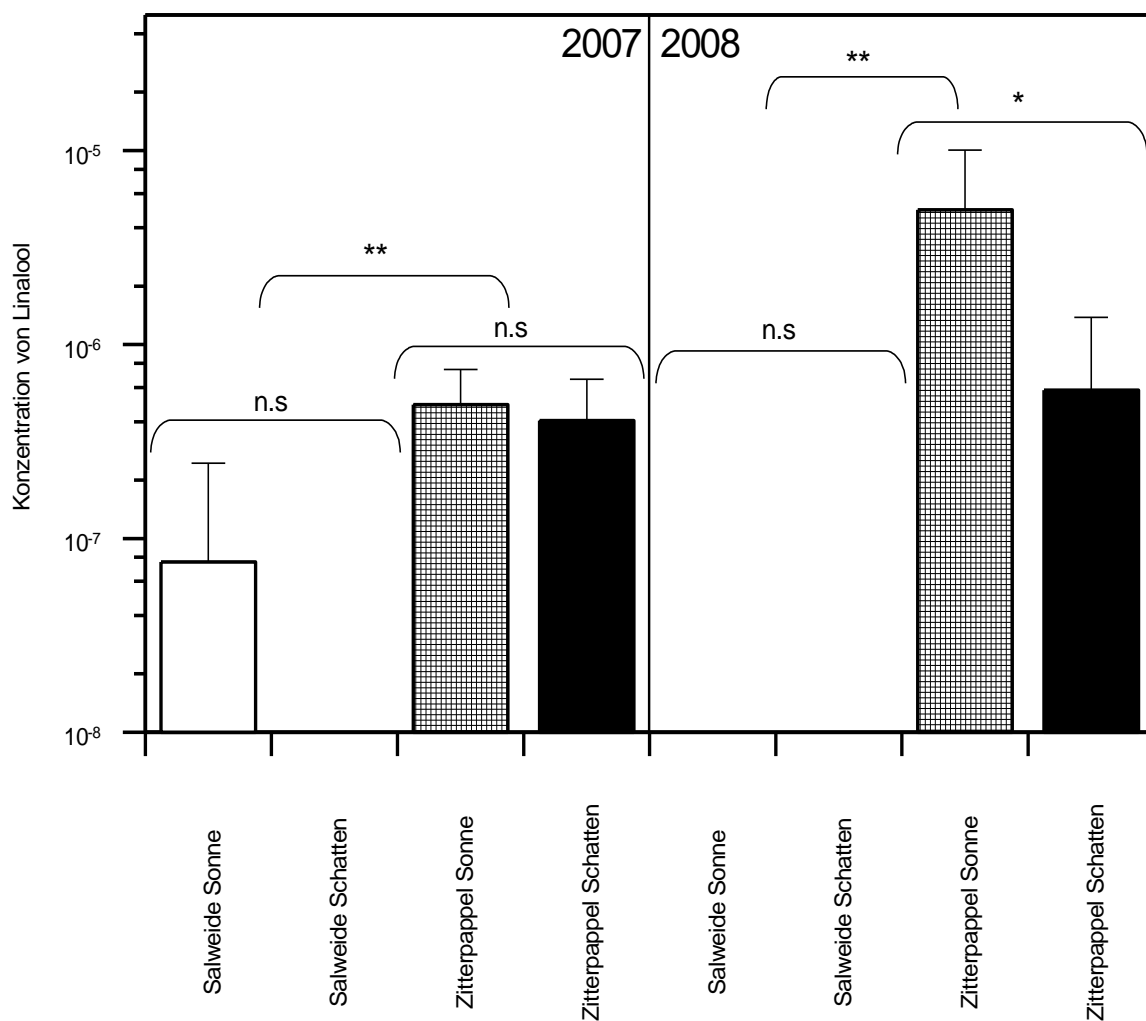


Abbildung 3.8. Quantitative Auswertung von Linalool. Mann-Whitney U-Test. $MW \pm SA$. . Konzentration in g/g in $MeOH/CH_3CL_2$ 1:2.

(Z)-3-Hexen-1-yl-acetat gehört zu den dominierenden Substanzen in Duftspektrum der Salweiden und Zitterpappeln. Dieser Duftstoff wird auch von vielen anderen Pflanzen emittiert und von vielen Insekten gerochen. Es wurden auch hier signifikante Unterschiede in der Emissionsmenge auf der Artebene festgestellt. Im Jahr 2007 konnte man auch expositionsbedingte Unterschiede bei den Zitterpappeln feststellen (Abbildung 3.9).

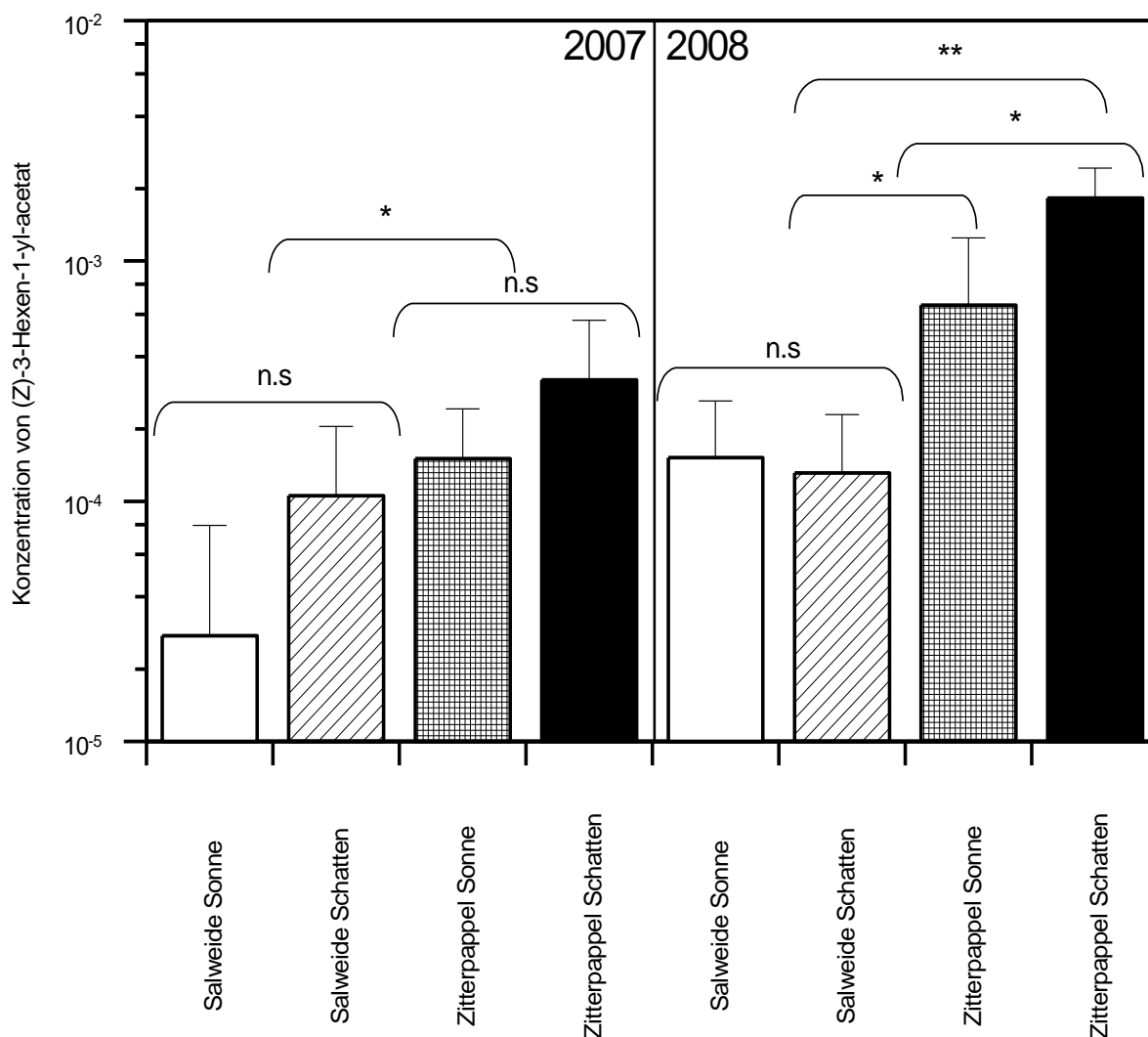


Abbildung 3.9. Quantitative Auswertung von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. Mann-Whitney U-Test, MW±SA. Konzentration in g/g in $MeOH/CH_3CL_2$ 1:2.

Die Analysen mit ANOVA beleuchten alle Gruppen gleichzeitig und manchmal werden feine Unterschiede in der Gesamtmasse unsichtbar. Erst die paarweisen Vergleiche mit dem Mann-Whitney U-Test zeigen auch die schwächeren Effekte. Dies wurde am Beispiel des Benzylalkohols beobachtet. In diesem Fall deutete die Kruskal-Wallis-Anova im Jahr 2007 auf keine Signifikanz, während im Jahr 2008 der gleiche Test hohe Signifikanz zeigte. Die genaue Analyse mit dem U-Test zeigte ähnliche Konstellation der Emissionen in den beiden Versuchsjahren und fast identische Signifikanzen zwischen den einzelnen Datensätzen. Die Salweiden emittierten signifikant weniger Benzylalkohol als die Zitterpappeln. Trotz der geringeren Emission dieses Stoffes konnte man auch bei den Salweiden die sonnige von der schattigen Exposition unterscheiden (Abbildung 3.10).

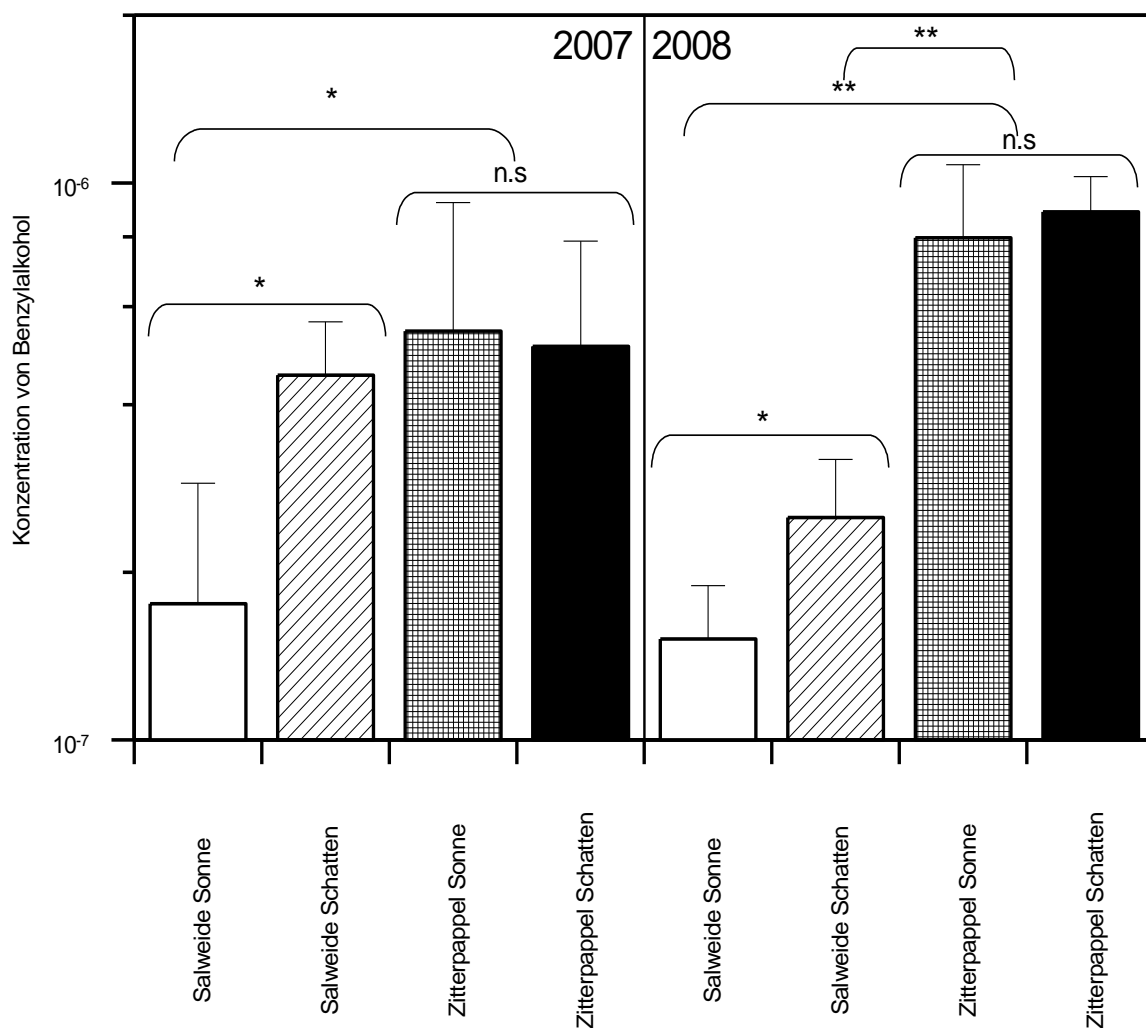


Abbildung 3.10. Quantitative Auswertung von Benzylalkohol. Mann-Whitney U-Test, $MW \pm SA$. Konzentration in g/g in $MeOH/CH_3CL_2$ 1:2.

4 Diskussion

4.1 Gewächshaus

Die Duftstoffemission ist ein sehr dynamischer Prozess. Die Blätter entwickeln sich, altern, photosynthetisieren, transpirieren und atmen. Mit jedem dieser Prozesse sind chemische Reaktionen verbunden. Diese Reaktionen beeinflussen auch die VOC Emissionen. Der Vergleich zwischen den Messungen vom Jahr 2007 und 2008 zeigt deutliche Unterschiede. Die oben genannten Prozesse verlaufen parallel und es ist sehr schwer innerhalb von zwei Vegetationsperioden die Bäume in der gleichen Entwicklungsphase zu beproben. Diese Tatsache erklärt einige Unterschiede zwischen Ergebnissen aus dem Jahr 2007 und 2008.

Das Sonnenlicht ist für die Photosynthese, also für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen notwendig. Jedoch genau so wie bei vielen anderen abiotischen Parametern gibt es ein Optimum, bei dem die Pflanzen sich am besten entwickeln. Zu wenig Sonnenlicht hemmt

die Photosynthese und das damit verbundenen Sinken der Temperatur verlangsamt die Entwicklung. Aber auch ein Übermaß an Sonnenlicht kann schädlich oder sogar gefährlich sein. Zu hohe Sonnenstrahlung erhöht die Temperatur und führt zum Hitzestress. Bei hoher Temperatur steigt auch der Wasserbedarf und bei nicht ausreichendem Wasserangebot entsteht Trockenstress. Es ist bekannt, dass Pflanzen sich gegen diesen Stress wehren können. Eine mögliche Strategie ist hier die Emission von Isoprenen und Monoterpenen (Loreto et al., 1998). Die Reaktionen der Pflanzen auf Hitzestress kann man in verschiedenen zeitlichen Größenordnungen betrachten. Als erste werden schon nach wenigen Sekunden die Isoprene emittiert, Monoterpen- und Aldehydemissionen ändern sich Stunden bis Tagen nach dem Stressereignis und als langfristige Reaktion des gesamten Ökosystems findet eine Veränderung der Artenstruktur statt (Lerdau and Gray, 2003).

Die Duftmuster der Pflanze sind nicht nur artspezifisch sondern auch von vielen anderen Faktoren abhängig. Hier spielt das Alter (Visser, 1976) und die Fitness der Pflanze (Paczkowska et al., 2006) eine wichtige Rolle. Intakte Blätter geben andere Volatile als die beschädigten ab (Fernandez et al., 2007; Ping et al., 2001). Außerdem ist die Art der Verletzung (mechanisch oder biotisch) (De Moraes et al., 2001; Schütz et al., 1997; Turlings et al., 1990) und die Zeit nach der Verletzung nicht ohne Bedeutung (McCall et al., 1994; Ruther, 2000; Schütz et al., 1997). Die Duftproben von Salweiden und von Zitterpappeln wurden von den intakten Trieben an lebendigen Pflanzen genommen. Im Gegensatz zum Freiland konnten die Pflanzen im Gewächshaus vor dem Insektenbefall geschützt werden. Die Analyse der Duftstoffe wurde in mehreren Stufen durchgeführt. Die ersten Aussagen über Duftdiversität und die Analyse der Diversitätsindizes bezogen sich auf Stoffe die in höherer Konzentration als 10^{-7} g/g vorkamen.

Erst nach der Einschaltung der Insektenantennen als Informationsfilter konnte man entscheiden welche Substanzen von besonderem Interesse sind. Diese wurden nicht nur sicher mit den authentischen Standards identifiziert sondern auch quantitativ ausgewertet.

Bei den Analysen der Blattdüfte sind vor allem die Grünblattdüfte (Hexylacetat; (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat; (Z)-3-Hexen-1-ol, (Z)-3-Hexenylbutyrat) von besonderem Interesse. Diese C₆-Verbindungen (Alkohole und Ester) sind bei vielen Pflanzenarten nachgewiesen worden. Sie werden sowohl von krautigen Pflanzen (z.B. von der Kartoffelpflanze) (Visser and Ave, 1978) als auch von Bäumen und Büschen emittiert (Fernandez et al., 2007; Johne et al., 2006b). Die meisten C₆-Verbindungen (Hexenale und Hexenole) werden vermehrt am Ort der

Verletzung bzw. des Insektenfraßes emittiert (Schütz et al., 1997). Aber (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wird ebenfalls von den intakten Pflanzenteilen freigesetzt (Pare and Tumlinson, 1999). (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Linalool, Caryophyllen, α -Farnesen, Germacren D und Methylsalicylat wurden auch in Apfelbaumblättern verschiedener Zuchtformen identifiziert (Loughrin et al., 1996). Es sind also keine artspezifischen Substanzen.

Nonanal wurde von den Zitterpappeln in größeren Mengen als von den Salweiden abgegeben. Im Jahr 2008 wurden generell höhere Emissionen notiert und in diesem Jahr waren auch die Artunterschiede in der Nonanal-Emission hoch signifikant. Im Jahr 2007 waren die Pappellemissionen ebenfalls tendenziell höher als bei den Salweiden, es zeigten sich aber keine signifikanten Unterschiede mehr. **Nonanal** deutet auf einen Stress in den Pflanzenzellen hin (Schütz, 2001) und wird auch von Pilz befallenen Pflanzen emittiert (Johne et al., 2006a) oder bei Verbräunung, wie sie z.B. vom Larvenfraß verursacht wird, freigesetzt (Johne et al., 2006b) und gilt als Seneszenzmarker.

Ein weiterer Stoff, der in höherer Abundanz bei den Zitterpappeln gefunden wurde, ist **Linalool**. Er gehört zu den Monoterpenoiden und wurde bei den Salweiden auch nach einer gezielten Single Ion Suche im Jahr 2008 nicht gefunden und im Jahr 2007 nur in sehr geringer Abundanz bei den Salweiden in sonniger Exposition identifiziert. In den Pappelduftproben wurden deutliche Linalool-Peaks identifiziert. Vor allem im Jahr 2008 wurden an den sonnenexponierten Zitterpappeln hohe Konzentrationen von diesem Stoff notiert, während von den schattenexponierten Zitterpappeln signifikant weniger Linalool emittiert wurde. Linalool gehört zu den sog. Blütenduftstoffen und wurde in den Blütenduftproben von Weiden (Tollsten and Knudsen, 1992), aber nicht in den Blätterduftproben (Fernandez et al., 2007), gefunden. Bei den anderen Pappeln (*Populus nigra*) wurden ebenso in den Blattknospen geringe Mengen von Linalool gefunden (Jerkovic and Mastelic, 2003). Auch in den Pappelhybriden *Populus x euramerikana*, die eine wichtige Rolle als Plantagenpflanzen spielen, wurde der Blattduft Linalool entdeckt (Brilli et al., 2009). Nach diesem Stoff orientieren sich einige Blattschädlinge wie z.B. *Chrysomela populi* (Brilli et al., 2009). Die Emission von Linalool war in beiden Versuchsjahren ein signifikanter Parameter bei der Unterscheidung zwischen Salweide und Zitterpappel. Linalool wurde außerdem von den untersuchten Faltern wahrgenommen.

Trotz der festgestellten Variationen bei der Emission von Nonanal und Linalool kann eine definierte Mischung dieser Duftstoffe ein artspezifisches Duftbuket bilden. Insekten, die diese

Duftkomponenten wahrnehmen, gewinnen dadurch zahlreiche Informationen über ihre Umwelt. Eine breite Verwendung des Geruchssinns und die Fähigkeit der Wahrnehmung vieler Duftstoffe bietet den Insekten Flexibilität und ein gutes Anpassungsvermögen. Es ist sogar überlebenswichtig, die richtige Wirtspflanze trotz der vielfältigen und variablen Umgebungsgerüche zu finden. Das Duftspektrum von Pflanzen ändert sich, wenn das intakte Gewebe beschädigt wird (Fernandez et al., 2007; Ping et al., 2001). Zum Beispiel duften intakte Kartoffelpflanzen nach (Z)-3-Hexen-1-ol und (E)-2-Hexen-1-ol sowie nach Nonanal und 2-Phenylethanol. Nach der mechanischen Verletzung und nach dem Insektenfraß nimmt die Emission von (E)-2-Hexenal, (Z)-3-Hexen-1-ol und (E)-2-Hexen-1-ol aber mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu (Schütz et al., 1997). Die Emission von Nonanal steigt im Vergleich zu den unverletzten Pflanzen erst nach einem langen Käferfraß von über 12 Stunden an. 2-Phenylethanol und 4,8-Dimethyl-1,3(E),7-nonatrien wurden nur nach dem Käferfraß und nicht nach der mechanischen Verletzung abgegeben (Schütz et al., 1997). Weiterhin wurde am Beispiel der Tabakpflanze festgestellt, dass die Art des herbivoren Insektes die Duftemission der Pflanze beeinflusst (De Moraes et al., 2001). Derartige „insektenfraßspezifische“ Düfte wurden aber nicht in den untersuchten Pappeln und Weiden notiert, weil Insektenfraß bei der Probennahme gewiss ausgeschlossen wurde.

Ein weiterer wichtiger Stoff aus der GLV (Green Leaf Volatile) Gruppe ist (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. Es wurden nachgewiesen, dass bei den salzgestressten Pappeln (*Populus x canescens*) im Vergleich zu den Kontrollpflanzen geringere Mengen von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat emittiert werden (Paczkowska et al., 2006). Man kann sagen, dass fitte Pappeln viel (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat emittieren. Dieses Muster konnte man ebenfalls im Gewächshaus sehen (wenn man die Sonnenexposition als die ungünstigere betrachtet). Vor allem bei Zitterpappeln sah man in der schattigen Exposition signifikant höhere Emissionen von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat als in der sonnigen Exposition. (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat gehört auch zu den herbivorinduzierten Pflanzenvolatilen (HIPVs- Herbivore-induced plant volatile). Es wird von den Hybridpappeln (*Populus deltoides x nigra*) emittiert und sogar von den Bäumen detektiert und als Signal für Abwehrreaktionen oder auch als Ruf-Signal für „Feinde der Feinde“ also Parasitoide gebraucht (Frost et al., 2008b). Dieser „volatile Notruf“ funktioniert umso besser, je gesünder die Pflanzen sind. Wenn sie Wasserstress ausgesetzt sind, können sie weniger (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat produzieren (Paczkowska et al., 2006) also weniger effektiv die Parasitoide anlocken. Das könnte auch ein Grund sein warum einige Herbivoren die gestressten Pflanzen bevorzugen (Chararas et al., 1969). Die Pflanzen, die unter abiotischem

Stress stehen, z.B. Trockenheit oder Salzstress, sind leichtere „Beute“. Sie verbrauchen ihre Kräfte um die Stressperiode zu überstehen und können weniger Energie in Abwehrmechanismen gegen Insekten investieren.

Weiterhin gibt es volatile Substanzen deren Emission bei Trockenstress erhöht wird. Bei *Acer negundo* waren es Acetophenon, Butylalkohol, Pentylalkohol, (E)-2-Hexen-1-ol, (Z)-3-Hexen-1-ol, Pentanal, Pentancarbonsäure acid, Hexanol und Hexacarbonsäure (Hu et al., 2009a). Solche Substanzen sind von besonderem Interesse beim Untersuchen der Wirtspflanzenfindung herbivorer Insekten.

Im Gewächshaus wuchsen alle Pflanzen in der gleichen Gewächshauskammer und konnten frei von Schädlingen gehalten werden. Die nachgewiesenen Unterschiede können ausschließlich auf die unterschiedlichen Lichtverhältnisse zurückgeführt werden. Diese Lichtverhältnisse sollen die sonnige und die schattige Exposition nachahmen. Es wurde hier kein Trockenstress simuliert, weil alle Pflanzen in gleicher Weise gewässert wurden. Jedoch haben die „Sonnenpflanzen“ das verfügbare Wasser schneller verbraucht und konnten deswegen unter Trockenstress leiden. Die „Schattenpflanzen“ bekamen deutlich weniger Sonnenlicht und dementsprechend war deren Photosynthese weniger effektiv. Die Lufttemperatur war in der ganzen Kammer gleich.

Pflanzen können durch spezifische Duftemissionen miteinander kommunizieren und sich gegenseitig vor Gefahren warnen (Durner et al., 1997). Einer der Stoffe, der in diesem Prozess eine wichtige Rolle spielt, ist **Methylsalicylat**. Die Emissionsrate dieser Substanz war bei den Zitterpappeln in sonniger Exposition auffallend hoch. Methylsalicylat wird von vielen Pflanzenarten produziert wenn die Pflanze unter Stress steht. Sowohl abiotische Bedingungen, wie z.B. Salzstress (Paczkowska et al., 2006) und mechanische Verletzungen, (Hu et al., 2009b) als auch biotische Faktoren wie Pathogenbefall z.B. Virus- oder bakterielle Infektion (Shulaev et al., 1997) erhöhen die Emission von Methylsalicylat. Nach der Infektion wird Methylsalicylat aus Salicylsäure produziert und kann durch die Luft bis zu den nicht infizierten Pflanzenteilen oder sogar zu den Nachbarpflanzen übertragen werden (Durner et al., 1997). Diesen Effekt konnte man bei Tabakpflanzen nachweisen. Bei stark erhöhter Konzentration von Methylsalicylat wurden die Abwehrmechanismen der Pflanze aktiviert (Shulaev et al., 1997). Dank dieser Eigenschaft könnte Methylsalicylat ein wichtiges „Alarmpheromon“ sein, das die Abwehrkräfte noch vor dem Befall aktiviert. Bei den Stecklingen von *Populus simonii* x *P. pyramidalis* wurde nach der mechanischen Verletzung

auch eine erhöhte Emission von Methylsalicylat festgestellt (Hu et al., 2009b). An einer weiteren Pappelart, *Populus deltoides* x *nigra*, wurde festgestellt, dass auch zahlreiche Terpene (Germacren D, β -Caryophyllen, E- β -Ocimen α -Farnesen) Signale innerhalb einer verwundeten Pflanze übermitteln können (Frost et al., 2007). Bei den Zitterpappeln in sonniger Exposition im Gewächshaus wurden keine sichtbaren Infektionen oder Insektenbefall festgestellt. Die deutlich erhöhte Emission von Methylsalicylat kann auf möglichen Trockenstress bzw. Photostress zurückgeführt werden. Wie weit die volatilen Signale übertragen werden können (Frost et al., 2008a), ist noch nicht bekannt. Offenbar war die Entfernung im Gewächshaus (etwa 5m) zu groß (oder die Emission war zu niedrig), um die Pflanzen in der schattigen Exposition zu beeinflussen. Bei den Salweiden wurden nur sehr geringe Mengen von Methylsalicylat emittiert.

Wenn man von einem Pflanzenduft spricht, ist es notwendig diese Aussage zu präzisieren, da jede Pflanze aus mehreren Teilen und Organen besteht. Blätter, Blüten, Knospen, Wurzel, verholzte Triebe und Stämme emittieren unterschiedliche Düfte. Einige Duftstoffe z.B. Benzylalkohol, Benzaldehyd und Linalool werden als typische Blütendüfte bezeichnet. Eigene Duftproben wurden nur von den intakten Blättern an lebenden Pflanzen außerhalb der Blütezeit genommen. Trotzdem wurden in den Proben auch Duftstoffe, die andere Autoren in den Blütenproben von *Salix caprea* nachgewiesen haben, gefunden. Es waren 6-Methyl-5-hepten-2-on, Linalool, α -Farnesen, Methylsalicylat und Benzylalkohol (Tollsten and Knudsen, 1992). Meistens sind Düfte sehr komplex zusammengesetzte Mischungen. Zwei sehr unterschiedliche Duftproben können aus den gleichen Komponenten bestehen und allein der quantitative Vergleich, also der Anteil der einzelnen Duftkomponenten, kann den Unterschied ausmachen. In den Weiden- und Pappelblättern dominieren Grünblattdüfte, aber Blütenduftkomponenten sind auch vorhanden. Die typischen Blütenduftkomponenten können unter besonderen Umständen auch von den Blättern emittiert werden. Auch diese in relativ geringen Mengen anwesende Substanzen können wichtige Informationsquellen für Insekten sein.

Benzylalkohol und **Benzaldehyd** gehören zu den typischen Blütendüften und wurden bei vielen Pflanzengattungen (z.B: *Abelia*, *Castaneum*, *Convalaria*, *Gongora*, *Jasminum*, *Victoria*, *Ligustrum*) in den Blüten gefunden (Haynes et al., 1991; Honda et al., 1998; Knudsen et al., 1993). Benzaldehyd kann durch Oxidation des Benzylalkohols dank dem Enzym Dehydrogenase entstehen. Jedoch riechen nicht nur die Blüten nach Benzylalkohol

und Benzaldehyd, sondern auch die Blattknospen von *Populus nigra* (Jerkovic and Mastelic, 2003).

Es wurde jedoch auch die physiologische Bedeutung des Benzylalkohols in den induzierten Pflanzenfresserabwehrmechanismen nachgewiesen (Johne et al., 2006b). Die Kastanienminiermotte legte weniger Eier auf die Blätter die mehr Benzylalkohol emittierten (Johne et al., 2006b). Ein weiteres Beispiel zeigt, dass die Limabohnen (*Phaseolus lunatus*) diesen Stoff nach Insektenbefall freisetzte (Hopke et al., 1994). Die von den in dieser Arbeit freigesetzten Mengen des Benzaldehyds waren sehr gering. Jedoch lösten selbst solche geringe Mengen Duftstoffs bei den untersuchten Faltern elektrophysiologische Signale der Antennen aus. Deswegen wurden die Emissionen von Benzaldehyd genauer untersucht. Linalool und Benzaldehyd kamen in den Chromatogrammen sehr schnell hintereinander (Linalool nach 14,4Min und Benzaldehyd nach 14,5Min), weswegen die Zuordnung der Antennenreaktion zu einem der beiden Stoffe sehr schwierig war. Deswegen wurden beide Stoffe über Dosis-Antwort Kurven der Falter genau untersucht.

Benzaldehyd wurde sowohl in den Zitterpappeln als auch in den Salweiden gefunden. Im Jahr 2008 wurden signifikant größere Mengen bei den Zitterpappeln festgestellt (im Vorjahr waren die Unterschiede nicht signifikant aber trotzdem sah man höhere Emissionen bei den Pappeln). Die geringsten Mengen dieses Stoffs wurden von Salweiden in der sonnigen Exposition emittiert. In manchen Chromatogrammen aus dem Jahr 2008 und hier überwiegend bei den Pappeln waren die Peaks von Benzaldehyd und 2,3-Butanediol überlappt und konnten nicht automatisch identifiziert werden. Meistens konnten die Peaks aber mit der Ionextraktion zugeordnet und quantifiziert werden.

Linalool und α -Farnesen gehören zu den Terpenoiden und wurden in beiden Versuchsjahren überwiegend bei Zitterpappeln gefunden. Die Emission dieser Stoffe ist temperaturabhängig. Bei steigenden Temperaturen werden die Emissionen höher (Staudt et al., 2000). Beide Stoffe wurden bei stark verbräunten Kastanienblättern mit zusätzlich starkem Fraß durch Kastanienminiermottenlarven in signifikant höherem Mengen als bei Blätter mit geringer (<5%) Verbräunung gefunden (Johne et al., 2006b).

4.2 Freiland

Die meisten chemoökologischen Untersuchungen werden unter kontrollierten Labor- oder Gewächshausbedingungen durchgeführt. Die Messungen im Freiland sind nicht nur

schwieriger in der Durchführung sondern auch in der Interpretation. Die Umweltfaktoren, wie z.B. Temperatur, Feuchte und Wind, kann man nicht kontrollieren. Man kann diese Parameter dokumentieren, aber bei so hoher Duftdiversität und Variabilität bleibt am Ende die offene Frage welcher Faktor welchen Effekt verursachte. Jedoch lassen sich nicht alle Bedingungen im Labor nachahmen. Auch andere Autoren haben versucht außerhalb des Labors die Duftproben von den Bäumen zu nehmen. Die Eschen in der Arbeit von (Markovic and Norris, 1996) emittierten auch große Mengen von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, Linalool, Methylsalicylat und Farnesen. In diesem Fall wurden aber die Blätter von den Bäumen entfernt, was die Duftmuster mit Verletzungsvolatilen versehen hat. Es wurden auch Buchenblattvolatilen in den Buchenbeständen in der Schweiz analysiert (Tollsten and Muller, 1996). Hier waren die Quantitäten in den Duftmustern vor allem von Monoterpenen dominiert (88,2%). Die wichtigsten Bestandteile des Duftes waren Sabinen, β -Phellandren, Limonen, p-Cymen und Myrcen. Aber auch (Z)-3-Hexen-yl-acetat war in erheblichen Mengen (7,5%) bei den Buchenblättern vertreten (Tollsten and Muller, 1996). Diese Substanzen, sowie Linalool, Caryophyllen und alpha Farnesen, werden sowohl von Zitterpappeln als auch von Salweiden emittiert. In Buchenblätter waren die Abundanzen von Linalool, Caryophyllen und alpha Farnesen sehr gering (<1%) (Tollsten and Muller, 1996). Um die Habitatpräferenzen der Falter zu untersuchen war es wichtig, die Duftstoffemissionen von ausgewachsenen Bäumen und von intakten Blättern am Trieb in den natürlichen Habitaten zu messen. Im Freiland war es schwierig, unbeschädigte Triebe an lebendigen Bäumen zu finden. Es wurden möglichst unverletzte Triebe ausgewählt, doch konnte ein Befall an einem anderen Trieb am gleichen Baum und eine damit verbundene systemische Abwehrreaktion des Baumes nicht ausgeschlossen werden. Im Mai konnte man Triebe ohne jegliche Fraßspuren und Verletzungen beproben. Im August konnte man solche im Freiland nicht mehr finden und es mussten auch Blätter mit Verletzungen mitgemessen werden. Nur große Beschädigungen wie Gallen- oder Pilzbefall wurden gemieden.

Die Duftproben von den 32 Versuchsbäumen wurden an drei Messterminen innerhalb einer Vegetationsperiode genommen. Viele Pflanzen zeigen Saisonunterschiede in der Emission von volatilen Stoffen (Li et al., 2003; Zhang et al., 1999). Es wurde festgestellt, dass die Emission von Monoterpenen in Koniferen (*Pinus densiflora*) bei Temperaturzunahme exponentiell ansteigt und lichtabhängig ist (Yokouchi and Ambe, 1984). Die saisonbedingte Variation der Terpenenemission wurde bei Kiefern (*Pinus pinea*) (Staudt et al., 2000) und Fichten (*Picea glauca*) (Rudloff, 1972) so wie *Picea sitchensis* (Brooks et al., 1987)

gründlich untersucht. Es wurden auch qualitative saisonbedingte Unterschiede in der Zusammensetzung der Terpene festgestellt. Manche Stoffe wurden nur in der Vegetationsperiode emittiert und andere das ganze Jahr über (Staudt et al., 2000). Bei *Acer negundo* wurden innerhalb der Vegetationsperiode zwischen den Monaten Juli und August deutliche Unterschiede in der Emissionsrate der VOCs festgestellt (Li et al., 2003). Mehrmals wurden neben qualitativen auch quantitative Unterschiede, die für verschiedene Duftstoffe individuellen Verlauf zeigten, beobachtet (Li et al., 2003). Bei (Staudt et al., 2000) wurde das Maximum der totalen VOC Emissionen von Mitte Juni bis Mitte August notiert. Diese Studie wurde in einer Gewächshauskammer mit variablen Temperaturbedingungen durchgeführt. Die Ursachen der Duftunterschiede lagen außer in der Temperatur auch in Alterungsprozessen und Tageslängenänderungen begründet. Die Variation der Monoterpenmuster in der Fichte (*Picea sitchensis*) war während der Entwicklungszeit so groß, dass die Autoren empfehlen, für eine repräsentative Stoffverteilung die Duftproben erst nach dem 30. September, wenn die Bäume schon für die Winterruhe vorbereitet sind, zu nehmen (Brooks et al., 1987). In den untersuchten Salweiden und Zitterpappeln wurden deutliche Unterschiede im Laufe der Vegetationsperiode festgestellt. Diese Änderungen sind vor allem auf Alterungsprozesse und steigenden Insekten- und Pathogenbefall zurückzuführen. Im Freiland konnte man diese beiden Faktoren nicht ausschließen. Zwei elektrophysiologisch aktive Stoffe, 1-Methoxy-2-propanol und Hexylacetat, wurden nur in den Maiprobe gefunden. Die Quantitäten dieser beiden Duftstoffe weisen signifikante Unterschiede zwischen den Baumarten auf. Hexenylacetat kam in signifikant größeren Mengen bei den Zitterpappeln vor und 1-Methoxy-2-propan-1-ol kam in signifikant größeren Mengen bei den Salweiden vor. Vier weitere Stoffe, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Benzylalkohol und Methylsalicylat, wurden im Mai und im Juli, aber nicht im August, gefunden. Die Augustproben wurden bei relativ niedrigen Temperaturen (11-16°C) genommen, deswegen waren die Emissionsraten sehr gering. Das führte dazu, dass die Mengen der oben genannten Stoffe unterhalb der Nachweisgrenze lagen. In den Augustproben wurden relativ viele Substanzen im späten Retentionszeitbereich gefunden. Aber in diesem Zeitfenster zeigten die Falterantennen keine elektrophysiologischen Aktivitäten. Aus diesem Grund wurden diese Substanzen und deren Herkunft nicht genauer untersucht.

Die Emission von einigen Duftstoffen, u.a. (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und Linalool, ist von der aktuellen Intensität der Photosynthese abhängig. Tagsüber sind die Emissionen hoch, nachts deutlich geringer (Pare and Tumlinson, 1999). Bei der Tabakpflanze (*Nicotiana tabacum*)

wurden spezifische Tag- und Nachtvolatile festgestellt. Die von Herbivoren induzierten Duftmuster sind tags und nachts unterschiedlich, obwohl die Raupen sowohl tags als auch nachts fressen. (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexenyl-butyrat, (Z)-3-Hexenyl-isobutyrat, (Z)-3-Hexen-1-yl-tiglat wurden von der Tabakpflanze (*Nicotiana tabacum*) ausschließlich nachts emittiert (De Moraes et al., 2001). In eigenen Untersuchungen wurden weniger extreme Zeitfenster wie Tag und Nacht untersucht. Im Bezug auf die Ethologie der untersuchten Nachtfalter sollte in dieser Arbeit die Frage, ob der Abendduft dem Morgen- und Mittagsduft gleich ist, beantwortet werden. Dafür wurden drei Tageszeiten für die Duftprobennahme ausgewählt und die Duftproben miteinander verglichen. Sowohl die qualitative als auch die quantitative Zusammensetzung der Duftmuster war zu den drei Messzeiten unterschiedlich. In den Abendstunden stieg der Anteil des Caryophyllens. Der Anteil von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat war deutlich geringer als zwischen 11.00 und 13.00 Uhr. Eine tageszeitabhängige Variation der Terpenenemission wurde ebenfalls bei Kiefern (*Pinus pinea*) festgestellt (Staudt et al., 2000). Mit dem Tagesrhythmus der VOC- Emissionen bei *Acer negundo* hat sich eine chinesische Arbeitsgruppe beschäftigt (Li et al., 2003). In dieser Arbeit wurden Sämlinge unter Laborbedingungen beprobt. Es wurde nachgewiesen, dass die Emissionen der einzelnen Duftstoffe zu unterschiedlichen Zeiten ihre Maxima erreichen, dementsprechend ändern sich die prozentualen Anteile der Duftkomponenten im Duftspektrum. Der Anteil an (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat war bei *Acer negundo* in den frühen Morgenstunden (6.30 Uhr) am höchsten (Li et al., 2003). Bei den in dieser Arbeit untersuchten Pappeln konnte man ebenfalls in den Abendmessungen eine abfallende Tendenz des Anteils des (Z)-3-Hexen-1-yl-acetats feststellen. Bei *Acer negundo* war der Emissionsverlauf der Aldehyde sehr unregelmäßig, was dem Emissionsverlauf bei Pappeln ähnelt. Manche Stoffe (z.B. Nonanal und Hexanal) zeigten bei *Acer negundo* zwei Maxima und zwei Minima der Emission (Li et al., 2003). Die eigenen Messungen wurden allerdings im Freiland durchgeführt, deswegen ist die Variabilität der Duftmuster sehr hoch und die Interpretation der Ergebnisse dementsprechend schwierig.

Die Temperatur ist ein wichtiger Faktor, der viele physiologische Prozesse (z.B. Photosynthese, Atmung, Wachstum und Reifung) der Pflanze beeinflusst. Die Photosynthese und die Atmung sind mit der Duftemission eng verknüpft. Zusätzlich spielen auch die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Duftkomponenten (Siedepunkt, Dampfdruck und Molare Masse) eine wichtige Rolle. Die Emission von Terpenen (Linalool, Caryophyllen und Farnesen) ist bei vielen Pflanzen temperaturabhängig und nimmt bei hohen Temperaturen zu

(Pare and Tumlinson, 1999). Der Zusammenhang ist aber nicht linear. In den Untersuchungen an *Quercus ilex* wurde die maximalen Emissionen der abundantesten Monoterpene (α -Pinen, β -Pinen, Sabinen, Myrcen, (Z)- β -ocimen, (E)- β -ocimen, Limonen) bei 35°C gemessen. Bei 50°C waren die Emissionen sogar geringer als bei 30°C (Loreto et al., 1998). Im Freiland ist die Temperatur sehr variabel und kann hohe Tagesamplituden zeigen. So war es auch im Jahr 2006 während der Probennahmen im Freiland für diese Arbeit. Die Lufttemperatur betrug während der Messzeiten zwischen 14 und 33°C. Am wärmsten war es bei den Juliaufnahmen (20-30°C) und am kältesten im August (11-16°C). Dies macht sich in den Mengen der emittierten Terpenoide (Linalool und Caryophyllen) bemerkbar. Diese Duftstoffe wurden nur an den warmen Juli Tagen emittiert. An Buchen im Freiland wurde ebenfalls ein starker Einfluss der Temperatur auf die Emissionsraten festgestellt. Bei Temperaturen von 10-14°C waren die Emissionen der Hauptduftkomponenten Sabinen und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat um den Faktor 10 geringer als bei Temperaturen von 25-29°C (Tollsten and Muller, 1996). Es wurden auch deutlich mehr Substanzen an den warmen Tagen nachgewiesen. Ein ähnlicher Effekt wurde in eigenen Messungen beobachtet. Deswegen wurden in den Folgejahren keine Duftprobennahmen bei unter 16°C vorgenommen.

Vor allem im Freiland, wo man die Temperaturbedingungen nicht kontrollieren kann, ist es schwierig, die saisonbedingten und die tageszeitbedingten Unterschiede von den temperaturbedingten Unterschieden zu trennen.

5 Zusammenfassung

Die Duftzusammensetzung der Zitterpappel und der Salweide unterscheiden sich qualitativ. Die Diversitätsindizes deuten auf eine hohe Duftdiversität. Es wurde eine große qualitative und quantitative Variabilität der Duftmuster während mehreren Aufnahmejahren festgestellt.

Die Duftmuster verändern sich im Laufe der Vegetationsperiode. Die Alterungsprozesse der Blätter und zunehmender Insekten- und Pathogenbefall im Freiland führten zur Abnahme von Grünblattduftemissionen und zur Zunahme von schwerflüchtigen, langkettigen und zyklischen Substanzen. Zwei elektrophysiologisch aktive Stoffe, 2-Methoxy-propanol und Hexylacetat, wurden nur in den Maiprobe gefunden. Die Konzentrationen von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und (Z)-3-Hexen-1-ol waren in den Augustproben so gering, dass sie sich unterhalb der Nachweisgrenze befanden. Um möglichst viele für die Falter relevante Duftstoffe zu erfassen, richteten sich das Probennahmedatum und die Uhrzeit nach der Flugzeit der untersuchten Falter (Mai, 19.00-21.00Uhr).

Die Duftstoffemission variierte auch im Laufe des Tages. Die Emissionen von 11.00-13.00 Uhr waren anders als zwischen 19.00 und 21.00 Uhr. Drei elektrophysiologisch aktive Substanzen, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, Nonanal und Decanal, zeigten qualitative und quantitative Unterschiede in dem tageszeitbedingten Duftmuster.

Quantitative Analysen der Duftemission im Gewächshaus zeigten im Jahr 2007 fünf Duftstoffe die artspezifische Unterschiede ausmachten. Es waren (Z)-3-Hexenylbutyrat, Linalool, Hexylacetat, Methylsalicylat und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. Alle fünf Stoffe wurden in größeren Mengen bei den Zitterpappeln nachgewiesen (Abbildung 3.3). Im Jahr 2008 waren es acht Substanzen. Sechs davon (Hexylacetat, Benzaldehyd, 6-Methyl-5-hepten-on, Nonanal, 1,2,4-Trimethylbenzol und Decanal) wurden in größeren Mengen von den Zitterpappeln emittiert. Zwei weitere (Methyltetradecanoat und 1-Methoxy-2-propan-1-ol) wurden in höheren Abundanzen von den Salweiden freigesetzt (Abbildung 3.4).

Sechs der quantitativ untersuchten Duftstoffe zeigten statistisch signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlich exponierten Standorten. Bei den Zitterpappeln waren es fünf Stoffe (Methylsalicylat, Linalool, (Z)-3-Hexenylbutyrat, 1-Ethyl-3-methyl-benzol, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat). MeSa und Linalool wurden in größeren Mengen von sonnenexponierten Pflanzen emittiert. Die drei weiteren Substanzen wurden in größeren Mengen bei den Schattenpflanzen gefunden. Bei den Salweiden wurde nur Benzylalkohol in signifikant höheren Mengen von den Schattenpflanzen emittiert.

Nonanal wurde in höheren Mengen bei den Zitterpappeln abgegeben. Dieser Effekt war im Jahr 2008 statistisch signifikant. Die Zitterpappeln in der schattigen Exposition emittierten in beiden Versuchsjahren etwas mehr Nonanal als die in der sonnigen Exposition aber diese Unterschiede konnten nicht statistisch belegt werden. Die Emission von Nonanal deutet auf einen Stress in den Pflanzenzellen (Schütz, 2001) und kann emittiert werden wenn die Pflanze vom Pilz befallen ist (Johne et al., 2006a) oder bei einer Verbräunung die z.B. vom Larvenfraß verursacht wird (Johne et al., 2006b). In diesem Fall kann die Wahrnehmung des Nonanals für Insekten nützlich bei der Artunterscheidung zwischen Zitterpappeln und Salweiden sein.

Benzylalkohol wurde in signifikant höheren Konzentrationen von den Zitterpappeln abgegeben. Bei den Salweiden konnte man in beiden Versuchsjahren signifikant geringere Emissionen in der sonnigen Exposition feststellen. Benzylalkohol spielt eine wichtige Rolle

bei Pflanzenfresserabwehrmechanismen (Johns et al., 2006b) und wird auch nach Insektenbefall von Limabohnen (*Phaseolus lunatus*) emittiert (Hopke et al., 1994).

Die Emission von **Methylsalicylat** war bei den Zitterpappeln in sonniger Exposition auffallend hoch. Es wurde nachgewiesen, dass Methylsalicylat von gestressten Pflanzen produziert wird. Sowohl die abiotischen Bedingungen wie z.B. Salzstress (Paczkowska et al., 2006) als auch die biotischen Faktoren wie Pathogenbefall (Shulaev et al., 1997) erhöhen die Emission von Methylsalicylat. Dieser Stoff spielt auch eine wichtige Rolle bei der innerartlichen Kommunikation (Shulaev et al., 1997).

Die große Variabilität der pflanzlichen Duftmuster erfordert von den darauf angewiesenen herbivoren Insekten eine hohe Flexibilität in der Orientierung. Sie kann nur durch ein breites Spektrum der wahrgenommenen Duftstoffe gewährleistet werden. Die Wahrnehmung von komplexen Duftstoffzusammensetzungen kann die Insekten nicht nur zu der richtigen Wirtspflanze führen, sondern auch wichtige Informationen über den Standort, die Baumkondition und die Anwesenheit von Konkurrenten geben.

6 Anhang

Tabelle 6.1. Duftpeaks die im Jahr 2007 in Proben aus dem Gewächshaus gefunden wurden.

| Nr. | RZ | Stoffnamensidentifikation der Nist-Datenbank | CAS | % der Peak Fläche [TIC] |
|--------------------------|-------|---|-------------|-------------------------|
| Salweide Sonne | | | | |
| 1 | 7,79 | 3-Heptanone | 000106-35-4 | 1,6 |
| 2 | 9,56 | - | - | 1,3 |
| 3 | 10,10 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 | 1,1 |
| 4 | 10,63 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 12,1 |
| 5 | 10,83 | - | - | 0,8 |
| 6 | 11,71 | 3-Hexen-1-ol | 000544-12-7 | 4,0 |
| 7 | 13,19 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | 016491-36-4 | 1,2 |
| 8 | 13,48 | - | - | 2,9 |
| 9 | 15,78 | - | - | 2,4 |
| 10 | 25,84 | - | - | 20,2 |
| 11 | 27,13 | - | - | 23,2 |
| 12 | 28,01 | - | - | 3,2 |
| 13 | 29,77 | - | - | 26,0 |
| Salweide Schatten | | | | |
| 1 | 7,41 | - | - | 1,4 |
| 2 | 7,52 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 1,9 |
| 3 | 7,63 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 4,9 |
| 4 | 9,03 | - | - | 2,2 |
| 5 | 9,27 | - | - | 1,4 |
| 6 | 9,40 | Butanoic acid, 3-methyl-2-[(phenylmethoxy)imino]-, trimethylsilyl ester | 055520-96-2 | 1,3 |

| | | | | |
|------------------------------|-------|---|--------------|------|
| 7 | 10,08 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 | 1,1 |
| 8 | 10,37 | - | - | 2,1 |
| 9 | 10,62 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 3,4 |
| 10 | 11,01 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 000110-93-0 | 1,3 |
| 11 | 11,13 | - | - | 1,4 |
| 12 | 11,70 | 3-Hexen-1-ol | 000544-12-7 | 1,2 |
| 13 | 13,48 | cis-3-Hexenyl-.alpha.-methylbutyrate | 053398-85-9 | 3,2 |
| 14 | 13,83 | - | - | 1,7 |
| 15 | 14,31 | - | - | 2,8 |
| 16 | 16,15 | - | - | 1,0 |
| 17 | 25,79 | - | - | 3,0 |
| 18 | 30,38 | - | - | 64,8 |
| Zitterpappel Sonne | | | | |
| 1 | 7,60 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 2,5 |
| 2 | 8,99 | 2-Hexenal, (E)- | 006728-26-3 | 11,7 |
| 3 | 9,32 | Pentanoic acid, 2-[(phenylmethoxy)imino]-, trimethylsilyl ester | 055520-94-0 | 3,2 |
| 4 | 10,05 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 | 3,7 |
| 5 | 10,64 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 45,9 |
| 6 | 11,03 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 000110-93-0 | 3,0 |
| 8 | 11,70 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-96-1 | 3,0 |
| 9 | 12,08 | 2-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-94-9 | 7,4 |
| 10 | 13,14 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | 016491-36-4 | 2,6 |
| 11 | 13,36 | - | - | 2,9 |
| 12 | 17,75 | .alpha.-Farnesene | 000502-61-4 | 1,6 |
| 13 | 18,29 | Benzoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester | 000119-36-8 | 8,7 |
| 14 | 18,61 | Squalene | 007683-64-9 | 3,9 |
| Zitterpappel Schatten | | | | |
| 1 | 7,52 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 1,0 |
| 2 | 9,00 | Benzene, 1-ethyl-3-methyl- | 000620-14-4 | 0,7 |
| 3 | 9,36 | Butanoic acid, 3-methyl-2-[(phenylmethoxy)imino]-, trimethylsilyl ester | 055520-96-2 | 0,6 |
| 4 | 9,81 | Acetic acid, hexyl ester | 000142-92-7 | 0,4 |
| 5 | 10,06 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 | 0,8 |
| 6 | 10,41 | - | - | 0,8 |
| 7 | 10,65 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 4,3 |
| 8 | 10,72 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-- | 003681-71-8- | 32,1 |
| 9 | 10,91 | 2-Hexen-1-ol, acetate | 010094-40-3 | 0,4 |
| 10 | 11,02 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 000110-93-0 | 0,4 |
| 11 | 11,71 | 3-Hexen-1-ol | 000544-12-7 | 0,6 |
| 12 | 12,06 | - | - | 0,6 |
| 13 | 13,13 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | 016491-36-4 | 2,7 |
| 14 | 13,34 | cis-3-Hexenyl-.alpha.-methylbutyrate | 053398-85-9 | 0,4 |
| 15 | 13,84 | - | - | 0,6 |
| 16 | 18,28 | - | - | 0,7 |
| 17 | 18,60 | 3-Ethyl-1,5-octadiene | 1000114-87-7 | 0,4 |
| 18 | 21,24 | - | - | 0,4 |
| 19 | 22,95 | - | - | 0,4 |
| 20 | 25,98 | - | - | 1,8 |
| 21 | 27,68 | - | - | 16,8 |
| 22 | 28,00 | Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | 000103-23-1 | 3,0 |

| | | | | |
|----|-------|--|-------------|------|
| 23 | 31,87 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester | 004376-20-9 | 14,9 |
| 24 | 33,03 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester | 004376-20-9 | 15,2 |

Tabelle 6.2. Duftpeaks die im Jahr 2008 im Gewächshaus gefunden wurden.

| Nr | RZ | Stoffnamensidentifikation der Nist-Datenbank | CAS | % der Peak Fläche [TIC] |
|--------------------------|-------|---|--------------|-------------------------|
| Salweide Sonne | | | | |
| 1 | 7,84 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 3,4 |
| 2 | 9,54 | ? | | 0,9 |
| 3 | 10,77 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 4,7 |
| 4 | 11,80 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-96-1 | 3,3 |
| 5 | 12,11 | Nonanal | 000124-19-6 | 2,3 |
| 6 | 12,97 | Isooctanol | 026952-21-6 | 2,4 |
| 7 | 13,10 | 5-Tridecene, (Z)- | 025524-42-9 | 2,1 |
| 8 | 13,90 | 1-Hexene, 3-methyl- | 003404-61-3 | 3,7 |
| 9 | 14,03 | 2-Hexene, 2,5-dimethyl- | 003404-78-2 | 3,4 |
| 10 | 14,15 | 1-Silacyclo-3-pentene | 007049-25-4 | 3,7 |
| 11 | 14,33 | (S)-3-Ethyl-4-methylpentanol | 1000144-07-1 | 6,3 |
| 12 | 14,53 | 4-Undecene, 3-methyl-, (E)- | 074630-59-4 | 1,4 |
| 13 | 18,97 | Dodecanoic acid, 1-methylethyl ester | 010233-13-3 | 9,6 |
| 14 | 19,61 | | | 1,0 |
| 15 | 24,00 | Hexadecanoic acid, methyl ester | 000112-39-0 | 6,4 |
| 16 | 25,81 | Diethyl Phthalate | 000084-66-2 | 19,0 |
| 17 | 26,41 | Octadecanoic acid, methyl ester | 000112-61-8 | 4,4 |
| 18 | 26,66 | 9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)- | 001937-62-8 | 2,2 |
| 19 | 27,19 | 8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester | 056599-58-7 | 2,3 |
| 20 | 27,70 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl decyl ester | 000089-19-0 | 1,3 |
| 21 | 29,42 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl 2-methylpropyl ester | 017851-53-5 | 1,4 |
| 22 | 30,83 | Phenol, 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl- | 000119-47-1 | 12,8 |
| 23 | 31,11 | Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | 000103-23-1 | 1,7 |
| Salweide Schatten | | | | |
| 1 | 7,83 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 3,4 |
| 2 | 7,92 | | | 28,7 |
| 3 | 8,03 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 17,6 |
| 4 | 9,53 | ? | | 0,5 |
| 5 | 9,61 | Butanoic acid, 3-methyl-2-[(phenylmethoxy)imino]-, trimethylsilyl ester | 055520-96-2 | 0,8 |
| 6 | 10,77 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 2,6 |
| 7 | 11,80 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-96-1 | 2,1 |
| 8 | 12,12 | | | 1,0 |
| 9 | 12,98 | 1-Heptanol, 6-methyl- | 001653-40-3 | 2,8 |
| 10 | 13,12 | | | 1,2 |
| 11 | 13,91 | Acetic acid, trifluoro-, decyl ester | 000333-88-0 | 0,6 |
| 12 | 14,04 | 2-Pentene, 4-methyl-, (Z)- | 000691-38-3 | 0,4 |
| 13 | 14,16 | 2H-Pyran, 2-(tert-butylthio)tetrahydro- | 001927-53-3 | 0,4 |
| 14 | 14,34 | | | 4,0 |
| 15 | 14,55 | | | 0,5 |

| | | | | |
|---------------------------|-------|---|--------------|------|
| 16 | 18,98 | Dodecanoic acid, 1-methylethyl ester | 010233-13-3 | 0,9 |
| 17 | 19,62 | Propanoic acid, 2-methyl-, 1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl ester | 074381-40-1 | 1,0 |
| 18 | 21,79 | | | 0,6 |
| 19 | 23,96 | | | 1,7 |
| 20 | 24,01 | Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester | 005129-60-2 | 1,7 |
| 21 | 25,82 | Diethyl Phthalate | 000084-66-2 | 11,2 |
| 22 | 26,42 | Octadecanoic acid, methyl ester | 000112-61-8 | 1,5 |
| 23 | 26,66 | 9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)- | 001937-62-8 | 0,4 |
| 24 | 27,19 | 8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester | 056599-58-7 | 0,7 |
| 25 | 27,71 | | | 0,5 |
| 26 | 29,43 | | | 1,0 |
| 27 | 29,87 | | | 3,6 |
| 28 | 30,85 | Phenol, 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl- | 000119-47-1 | 5,6 |
| 29 | 31,11 | Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | 000103-23-1 | 2,7 |
| Zitterpappel Sonne | | | | |
| 1 | 7,86 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 1,6 |
| 2 | 7,94 | Benzene, 1,3-dimethyl- | 000108-38-3 | 0,7 |
| 3 | 9,30 | Benzene, 1-ethyl-3-methyl- | 000620-14-4 | 0,9 |
| 4 | 9,55 | Benzene, 1-ethyl-2-methyl- | 000611-14-3 | 0,5 |
| 5 | 10,01 | Acetic acid, hexyl ester | 000142-92-7 | 0,6 |
| 6 | 10,30 | | | 1,1 |
| 7 | 10,32 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 | 2,1 |
| 8 | 10,55 | Cyclohexanone | 000108-94-1 | 0,4 |
| 9 | 10,61 | 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (E)- | 018794-84-8 | 1,1 |
| 10 | 10,78 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 4,3 |
| 11 | 10,80 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 18,3 |
| 12 | 11,05 | 2-Hexen-1-ol, acetate, (E)- | 002497-18-9 | 1,3 |
| 13 | 11,16 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 000110-93-0 | 2,4 |
| 14 | 11,46 | ? | | 0,8 |
| 15 | 11,81 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-96-1 | 0,9 |
| 16 | 12,12 | Nonanal | 000124-19-6 | 0,4 |
| 17 | 13,02 | 2,6-Dimethyl-1,3,5,7-octatetraene, E,E- | 000460-01-5 | 3,0 |
| 18 | 13,18 | | | 0,5 |
| 19 | 13,41 | | | 0,5 |
| 20 | 13,90 | Decanal | 000112-31-2 | 1,4 |
| 21 | 14,49 | 1,6-Octadien-3-ol, 3,7-dimethyl- | 000078-70-6 | 0,7 |
| 22 | 15,58 | ? | | 0,1 |
| 23 | 15,68 | Caryophyllene | 000087-44-5 | 1,2 |
| 24 | 17,40 | ? | | 0,8 |
| 25 | 17,77 | .alpha.-Farnesene | 000502-61-4 | 2,7 |
| 26 | 18,32 | Methyl Salicylate | 000119-36-8 | 13,8 |
| 27 | 18,65 | 2,6-Dimethyl-3,5,7-octatriene-2-ol, ,E,E- | 1000141-11-8 | 5,0 |
| 28 | 18,85 | Phosphorodithioic acid, O,O,S-trimethyl ester | 002953-29-9 | 0,5 |
| 29 | 19,53 | Benzyl Alkohol | 000100-51-6 | 0,3 |
| 30 | 20,12 | | | 0,4 |
| 31 | 20,52 | ? | | 0,8 |

| | | | | |
|------------------------------|-------|---|--------------|------|
| 32 | 21,31 | 1-(3-Methyl-cyclopent-2-enyl)-cyclohexene | 1000185-30-7 | 1,5 |
| 33 | 21,55 | 4-(2,3,4,4a,6,6a,7,8,9,10b-Decahydro-1H-benzo[c]chromen-6-yl)-1-butanol | 1000260-99-9 | 1,0 |
| 34 | 21,69 | | | 0,9 |
| 35 | 21,78 | ? | | 2,0 |
| 36 | 22,17 | Cyclohexanone, 2-cyclohexylidene- | 001011-12-7 | 0,7 |
| 37 | 22,67 | ? | | 1,5 |
| 38 | 23,97 | | | 2,3 |
| 39 | 24,01 | Hexadecanoic acid, methyl ester | 000112-39-0 | 0,9 |
| 40 | 24,26 | ? | | 0,6 |
| 41 | 24,72 | Cyclohexanepropanol, 2,2-dimethyl-6-methylene- | 095452-04-3 | 0,6 |
| 42 | 24,86 | ? | | 6,0 |
| 43 | 25,82 | Diethyl Phthalate | 000084-66-2 | 3,5 |
| 44 | 26,42 | Octadecanoic acid, methyl ester | 000112-61-8 | 1,4 |
| 45 | 26,69 | | | 0,6 |
| 46 | 27,20 | 9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)- | 002566-97-4 | 0,2 |
| 47 | 27,71 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester | 000084-69-5 | 0,3 |
| 48 | 29,44 | Dibutyl phthalate | 000084-74-2 | 0,8 |
| 49 | 30,88 | Phenol, 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl- | 000119-47-1 | 5,4 |
| 50 | 31,12 | Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | 000103-23-1 | 0,7 |
| Zitterpappel Schatten | | | | |
| 1 | 7,70 | | | 0,6 |
| 2 | 7,76 | - | | 1,3 |
| 3 | 7,93 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 | 0,3 |
| 4 | 9,27 | Benzene, 1-ethyl-3-methyl- | 000620-14-4 | 0,7 |
| 5 | 9,57 | | | 0,5 |
| 6 | 10,01 | Acetic acid, hexyl ester | 000142-92-7 | 0,8 |
| 7 | 10,28 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 | 0,5 |
| 8 | 10,58 | ? | | 0,3 |
| 9 | 10,87 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 | 28,2 |
| 10 | 10,93 | | | 58,1 |
| 11 | 11,06 | 2-Hexen-1-ol, acetate | 010094-40-3 | 1,1 |
| 12 | 11,17 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 000110-93-0 | 0,2 |
| 13 | 11,82 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-96-1 | 1,3 |
| 14 | 12,12 | Nonanal | 000124-19-6 | 0,5 |
| 15 | 13,02 | 2,6-Dimethyl-1,3,5,7-octatetraene, E,E- | 000460-01-5 | 0,2 |
| 16 | 13,18 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | 016491-36-4 | 0,2 |
| 17 | 13,40 | cis-3-Hexenyl isovalerate | 035154-45-1 | 0,2 |
| 18 | 13,89 | Copaene | 003856-25-5 | 0,5 |
| 19 | 14,63 | ? | | 0,3 |
| 20 | 15,68 | Caryophyllene | 000087-44-5 | 0,7 |
| 21 | 18,67 | 2,6-Dimethyl-3,5,7-octatriene-2-ol, ,E,E- | 1000141-11-8 | 0,8 |
| 22 | 18,86 | Phosphorodithioic acid, O,O,S-trimethyl ester | 002953-29-9 | 0,3 |
| 23 | 18,99 | Dodecanoic acid, 1-methylethyl ester | 010233-13-3 | 0,8 |
| 24 | 20,68 | Cyclobutanone, oxime | 002972-05-6 | 0,5 |
| 25 | 21,56 | | | 0,2 |

| | | | | |
|----|-------|-----------------------------------|-------------|-----|
| 26 | 22,18 | Cyclohexanone, 2-cyclohexylidene- | 001011-12-7 | 0,3 |
| 27 | 25,82 | Diethyl Phthalate | 000084-66-2 | 0,4 |
| 28 | 26,43 | Octadecanoic acid, methyl ester | 000112-61-8 | 0,4 |

Tabelle 6.3. Alle Duftstoffe, die in den Duftproben von Zitterpappel (im Freiland und im Gewächshaus) gefunden wurden. Alphabetische Anordnung

| Nr. | Stoffnamensidentifikation der Nist-Datenbank | CAS |
|-----|--|--------------|
| 1 | (E)-2-Butenoic acid, 2-(methylenecyclopropyl)prop-2-yl ester | 1000158-24-3 |
| 2 | .alpha Caryophyllene | 6753-98-6 |
| 3 | .alpha Cubebene | 17699-14-8 |
| 4 | .alpha Farnesene | 502-61-4 |
| 5 | .alpha.,.alpha.'-Dihydroxy-m-diisopropylbenzene | 1999-85-5 |
| 6 | .alpha.-Farnesene | 000502-61-4 |
| 7 | .beta Phellandrene | 555-10-2 |
| 8 | .beta Pinen | 127-91-3 |
| 9 | .beta.-Myrcene | 123-35-3 |
| 10 | 1-Hexanol, 2-ethyl- | 104-76-7 |
| 11 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester | 84-69-5 |
| 12 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl 2-methylpropyl ester | 017851-53-5 |
| 13 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester | 4376-20-9 |
| 14 | 1,3,5-Triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, 1,3,5-tri-2-propenyl- | 1025-15-6 |
| 15 | 1,3,6 Octatriene 3,7 dimethyl (E) | 3779-61-1 |
| 16 | 1,3,6,10 Dodecatetraene 3,7,11 trimethyl | 502-61-4 |
| 17 | 1,3,6-Octatriene, 3,7-dimethyl-, (Z)- | 3338-55-4 |
| 18 | 1,3,7-Octatriene, 3,7-dimethyl- | 502-99-8 |
| 19 | 1,3,8-p-Menthatriene | 021195-59-5 |
| 20 | 1,5-Heptadiene, 2,6-dimethyl- | 006709-39-3 |
| 21 | 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (E)- | 018794-84-8 |
| 22 | 1,6-Octadien-3-ol, 3,7-dimethyl- (Linalool) | 000078-70-6 |
| 23 | 1,7-Octadien-3-one, 2-methyl-6-methylene- | 041702-60-7 |
| 24 | 11-Octadecenoic acid, methyl ester, (Z)- | 1937-63-9 |
| 25 | 1-Butanol, 2-methyl-, propanoate | 2438-20-2 |
| 26 | 1-Dodecanol | 112-53-8 |
| 27 | 1-Hexanol, 2-ethyl- | 000104-76-7 |
| 28 | 1H-Indene, 2,3-dihydro-1,1,3-trimethyl-3-phenyl- | 003910-35-8 |
| 29 | 1-Nonanol | 143-08-8 |
| 30 | 1-Octanol | 111-87-5 |
| 31 | 1-Octen-3-ol | 3391-86-4 |
| 32 | 1-Propanol, 2-(2-hydroxypropoxy)- | 106-62-7 |
| 33 | 1S.alpha Pinene | 7785-26-4 |
| 34 | 2,3-Butanediol | 513-85-9 |
| 35 | 2(3H)-Furanone, dihydro-5-methyl- | 1679-47-6 |
| 36 | 2(5H)-Furanone, 5-ethyl- | 2407-43-4 |
| 37 | 2,4-Diphenyl-4-methyl-2(E)-pentene | 022768-22-5 |
| 38 | 2,5-Hexanediol, 2,5-dimethyl- | 110-03-2 |
| 39 | 2,6 Dimethyl 1,3,5,7 octatetraene E | 460-01-5 |
| 40 | 2,6 Octadiene 4,5 diol 3,6 dimethyl | 10317-05-2 |
| 41 | 2,6-Dimethyl-3,5,7-octatriene-2-ol, ,E,E- | 1000141-11-8 |
| 42 | 2-Butanol | 78-92-2 |
| 43 | 2-Cyclopenten-1-one, 2-pentyl- | 25564-22-1 |
| 44 | 2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-2-(2-pentenyl)-, (Z)- | 488-10-8 |

| | | |
|----|--|-------------|
| 45 | 2H-1-Benzopyran, 3,4,4a,5,6,8a-hexahydro-2,5,5,8a-tetramethyl-(2à,4aà,8aà)- | 63335-66-0 |
| 46 | 2-Hexanol, 3-methyl- | 2313-65-7 |
| 47 | 2-Hexen-1-ol, acetate | 010094-40-3 |
| 48 | 2-Hexenal, (E)- | 6728-26-3 |
| 49 | 2-Pentanol | 6032-29-7 |
| 50 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 |
| 51 | 3 Caren | 13466-78-9 |
| 52 | 3-Heptanone | 106-35-4 |
| 53 | 3-Heptanone, 2-methyl- | 13019-20-0 |
| 54 | 3-Hexanol | 623-37-0 |
| 55 | 3-Hexanone | 589-38-8 |
| 56 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-96-1 |
| 57 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 |
| 58 | 3-Hexen-1-ol, benzoate, (Z)- | 025152-85-6 |
| 59 | 3-Hydroxy-3-methyl-2-butanone | 115-22-0 |
| 60 | 4 Hexen 1 ol acetate | 72237-36-6 |
| 61 | 4 Hexen 1 ol(Z) | 928-91-6 |
| 62 | 4-Methyl-2-hexanol | 2313-61-3 |
| 63 | 4-Methylthiophene-2-sulfonamide | N/A |
| 64 | 4-Undecene, 3-methyl-, (E)- | 074630-59-4 |
| 65 | 5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (E)- | 003796-70-1 |
| 66 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 000110-93-0 |
| 67 | 9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester | 112-63-0 |
| 68 | 9,17-Octadecadienal, (Z)- | 56554-35-9 |
| 69 | 9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)- | 1120-25-8 |
| 70 | 9-Octadecenoic acid, (E)- | 112-79-8 |
| 71 | Acetamide | 60-35-5 |
| 72 | Acetamide, N,N-dimethyl- | 127-19-5 |
| 73 | Acetic acid | 64-19-7 |
| 74 | Acetic acid, hexyl ester | 000142-92-7 |
| 75 | Acetophenone | 000098-86-2 |
| 76 | alpha Muurolene | 10208-80-7 |
| 77 | Amylene Hydrate | 75-85-4 |
| 78 | Azulene, 1,2,3,4,5,6,7,8-octahydro-1,4-dimethyl-7-(1-methylethenyl)-, [1S-(1à,4à,7à)]- | 3691-12-1 |
| 79 | Benzaldehyde | 000100-52-7 |
| 80 | Benzene 1 methyl 3 (1methylethyl) | 535-77-3 |
| 81 | Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl- | 488-23-3 |
| 82 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 |
| 83 | Benzene, 1,2,4-trimethyl- | 000095-63-6 |
| 84 | Benzene, 1,3,5-trimethyl- | 108-67-8 |
| 85 | Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl- | 874-41-9 |
| 86 | Benzene, 1-ethyl-3-methyl- | 000620-14-4 |
| 87 | Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)- | 1195-32-0 |
| 88 | Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)- | 99-87-6 |
| 89 | Benzene, methoxy- | 100-66-3 |
| 90 | Benzene, propyl- | 000103-65-1 |
| 91 | Benzenemethanol, .alpha.,.alpha.-dimethyl- | 000617-94-7 |
| 92 | Benzoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester | 000119-36-8 |
| 93 | Benzoic acid, methyl ester | 000093-58-3 |
| 94 | Benzothiazole | 000095-16-9 |

| | | |
|-----|--|--------------|
| 95 | Benzyl Alkohol | 000100-51-6 |
| 96 | Benzyl nitrile | 140-29-4 |
| 97 | Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene, 3,6,6-trimethyl- | 4889-83-2 |
| 98 | Name: Bicyclo[4.2.0]oct-1-ene, 7-exo-ethenyl- | N/A |
| 99 | Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)- | 28634-89-1 |
| 100 | Bicyclo[3.1.0]hexan-2-one, 5-(1-methylethyl)- | 513-20-2 |
| 101 | Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene, 2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)- | 17699-05-7 |
| 102 | Bicyclo[4.1.0]hept-3-ene, 3,7,7-trimethyl-, (1S)- | 498-15-7 |
| 103 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (E)- | 053398-84-8 |
| 104 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | 016491-36-4 |
| 105 | Butanoic acid, 3-hydroxy-, methyl ester | 1487-49-6 |
| 106 | Butylated Hydroxytoluene | 128-37-0 |
| 107 | Carbamic acid, methyl ester | 598-55-0 |
| 108 | Caryophyllene | 000087-44-5 |
| 109 | cis-3-Hexenyl isovalerate | 035154-45-1 |
| 110 | cis-3-Hexenyl-.alpha.-methylbutyrate | 053398-85-9 |
| 111 | Copaene | 3856-25-5 |
| 112 | Cyclobuta[1,2:3,4]dicyclopentene, decahydro-3a-methyl-6-methylene-1-(1-methylethyl)-, [1S-(1à,3aà,3bá,6aá,6bà)]- | 5208-59-3 |
| 113 | Cyclobutanone, oxime | 002972-05-6 |
| 114 | Cyclohexadecane | 295-65-8 |
| 115 | Cyclohexane, 1-methylene-4-(1-methylethenyl)- | 499-97-8 |
| 116 | Cyclohexane, 1,5-diethenyl-3-methyl-2-methylene-, (1à,3à,5à)- | 74742-35-1 |
| 117 | Cyclohexane, isothiocyanato- | 1122-82-3 |
| 118 | Cyclohexanone | 000108-94-1 |
| 119 | Cyclohexanone, 2-cyclohexylidene- | 001011-12-7 |
| 120 | Cycloisolongifolene, 8,9-dehydro- | 1000151-28-0 |
| 121 | Cyclopentane, 1,1-dimethyl- | 1638-26-2 |
| 122 | Decanal | 000112-31-2 |
| 123 | Decanoic acid, methyl ester | 110-42-9 |
| 124 | Diethyl Phthalate | 000084-66-2 |
| 125 | D-Limonene | 5989-27-5 |
| 126 | Dodecanal | 112-54-9 |
| 127 | Dodecane | 112-40-3 |
| 128 | Dodecane, 2,6,11-trimethyl- | 31295-56-4 |
| 129 | Dodecanoic acid, 1-methylethyl ester | 10233-13-3 |
| 130 | Dodecanoic acid, methyl ester | 111-82-0 |
| 131 | Ethanone, 1-[4-(1-hydroxy-1-methylethyl)phenyl]- | 54549-72-3 |
| 132 | Eucalyptol | 470-82-6 |
| 133 | Formamide, N,N-dimethyl- | 68-12-2 |
| 134 | Furan, 2-pentyl- | 3777-69-3 |
| 135 | Germacrene D | 23986-74-5 |
| 136 | Heptadecane | 629-78-7 |
| 137 | Hexadecane | 544-76-3 |
| 138 | Decane | 124-18-5 |
| 139 | Heptadecanoic acid 16 methyl-methyl ester | 5129-61-3 |
| 140 | Heptanal | 111-71-7 |
| 141 | Hexadecane 2,6,10,14 tetramethyl | 638-36-8 |
| 142 | Hexadecanoic acid, methyl ester | 112-39-0 |
| 143 | Hexanal | 66-25-1 |
| 144 | Heneicosan | 629-94-7 |

| | | |
|-----|---|--------------|
| 145 | Hexane 3,3 dimethyl | 563-16-6 |
| 146 | Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | 103-23-1 |
| 147 | Methyl 9-methyltetradecanoate | 213617-69-7 |
| 148 | Methyl salicylate | 119-36-8 |
| 149 | Methyl tetradecanoate | 124-10-7 |
| 150 | N-Aminopyrrolidine | 16596-41-1 |
| 151 | n-Hexadecanoic acid | 57-10-3 |
| 152 | Nonadecane | 629-92-5 |
| 153 | Nonanal | 124-19-6 |
| 154 | Nonanedioic acid, dimethyl ester | 1732-10-1 |
| 155 | Nonanol | 3452-97-9 |
| 156 | Octadecane | 593-45-3 |
| 157 | Octadecanoic acid methyl ester | 112-61-8 |
| 158 | Octanal | 124-13-0 |
| 159 | Octanoic acid, 8-hydroxy-, methyl ester | 20257-95-8 |
| 160 | Pentacosane | 629-99-2 |
| 161 | Pentadecane | 629-62-9 |
| 162 | Pentadecane, 2,6,10-trimethyl- | 3892-00-0 |
| 163 | Pentadecanoic acid, methyl ester | 7132-64-1 |
| 164 | Pentanoic acid, 2,2,4-trimethyl-3-carboxyisopropyl, isobutyl ester | N/A |
| 165 | Phenol | 000108-95-2 |
| 166 | Phenol, 2-(1,1-dimethylethyl)-5-methyl | 88-60-8 |
| 167 | Phenol, 2-(1,1-dimethylethyl)-6-methyl- | 2219-82-1 |
| 168 | Phenylethyl Alkohol | 60-12-8 |
| 169 | Phosphorodithioic acid, O,O,S-trimethyl ester | 002953-29-9 |
| 170 | Phthalic acid, butyl isohexyl ester | 1000309-03-6 |
| 171 | Propanoic acid | 79-09-4 |
| 172 | Propanoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester | 97-64-3 |
| 173 | Propanoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester, (+/-)- | 2155-30-8 |
| 174 | Propanoic acid, 2-hydroxy-2-methyl- | 594-61-6 |
| 175 | Propanoic acid, 2-methyl-, 1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl ester | 74381-40-1 |
| 176 | p-Xylene | 000106-42-3 |
| 177 | Tetracosane | 646-31-1 |
| 178 | Tetradecane | 629-59-4 |
| 179 | Tetradecane, 6,9-dimethyl- | 55045-13-1 |
| 180 | Thiourea, tetramethyl- | 2782-91-4 |
| 181 | Toluene | 108-88-3 |
| 182 | trans-3-Penten-2-ol | 003899-34-1 |
| 183 | Tricyclo[2.2.1.0 ^{2,6}]heptane, 1,7,7-trimethyl- | 508-32-7 |
| 184 | Tridecane | 629-50-5 |
| 185 | Tridecane 2 methyl | 1560-96-9 |
| 186 | UnDecanal | 112-44-7 |
| 187 | Undecane | 1120-21-4 |
| 188 | Undecane, 2,6-dimethyl- | 17301-23-4 |
| 189 | Urea, tetramethyl- | 632-22-4 |

Tabelle 6.4. Alle Duftstoffe, die in den Duftproben von Salweiden (in Freiland und im Gewächshaus) gefunden wurden. Alphabetische Anordnung

| Nr. | Stoffnamenvorschläge der Nist Daten Bank | CAS |
|-----|--|--------------|
| 1 | (-)-Spathulenol | 77171-55-2 |
| 2 | (E)-2-Butenoic acid, 2-(methylenecyclopropyl)prop-2-yl ester | 1000158-24-3 |
| 3 | (S)-3-Ethyl-4-methylpentanol | 1000144-07-1 |

| | | |
|----|--|-------------|
| 4 | .alpha.Cubebene | 17699-14-8 |
| 5 | .alpha.,...alpha.,...alpha.',..alpha.'-Tetramethyl-1,4-benzenedimethanol | 2948-46-1 |
| 6 | .beta.-Myrcene | 123-35-3 |
| 7 | .beta.-Phellandrene | 555-10-2 |
| 8 | .E-2Octenal | 2548-87-0 |
| 9 | 1,2 Benzenedicarboxylic acid, butyl octyl ester | 84-78-6 |
| 10 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester | 000084-69-5 |
| 11 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl 2-methylpropyl ester | 017851-53-5 |
| 12 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester | 4376-20-9 |
| 13 | 1,3,5-Triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, 1,3,5-tri-2-propenyl- | 1025-15-6 |
| 14 | 1,3,6 Octatriene 3,7 dimethyl (E) | 3779-61-1 |
| 15 | 1,3,6-Octatriene, 3,7-dimethyl-, (Z)- | 3338-55-4 |
| 16 | 1,3,7-Octatriene, 3,7-dimethyl- | 502-99-8 |
| 17 | 1,3,8-p-Menthatriene | 021195-59-5 |
| 18 | 1,4-Cyclohexadiene, 3-ethenyl-1,2-dimethyl- | 62338-57-2 |
| 19 | 1,6,10-Dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-, (E)- | 40716-66-3 |
| 20 | 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (E)- | 018794-84-8 |
| 21 | 1,6-Cyclodecadiene, 1-methyl-5-methylene-8-(1-methylethyl)-, [s-(E,E)]- | 23986-74-5 |
| 22 | 1,7-Octadien-3-one, 2-methyl-6-methylene- | 041702-60-7 |
| 23 | 11-Octadecenoic acid, methyl ester, (Z)- | 1937-63-9 |
| 24 | 1-Butanol, 2-methyl-, propanoate | 2438-20-2 |
| 25 | 1H-Cycloprop[e]azulene, 1a,2,3,4,4a,5,6,7b-octahydro-1,1,4,7-tetramethyl-, [1aR-(1aà,4à,4aà,7bà)]- | 489-40-7 |
| 26 | 1-Hexanol | 000111-27-3 |
| 27 | 1-Hexanol, 2-ethyl- | 000104-76-7 |
| 28 | 1H-Indene, 2,3-dihydro-1,1,3-trimethyl-3-phenyl- | 003910-35-8 |
| 29 | 1H-Isoindole-1,3(2H)-dione, 2-(2-hydroxyethyl)- | 3891-07-4 |
| 30 | 1-Octanol | 111-87-5 |
| 31 | 1-Octen-3-ol | 3391-86-4 |
| 32 | 1-Pentanol | 71-41-0 |
| 33 | 1-Penten-3-ol, 4-methyl- | 4798-45-2 |
| 34 | 1-Tridecene | 2437-56-1 |
| 35 | 2 Pentene 2,4,4 trimethyl | 107-40-4 |
| 36 | 2,3 Epoxycarene (E) | 20053-58-1 |
| 37 | 2,4-Diphenyl-4-methyl-2(E)-pentene | 022768-22-5 |
| 38 | 2,5-Hexanediol, 2,5-dimethyl- | 110-03-2 |
| 39 | 2,6 Dimethyl 1,3,5,7 octatetraene E | 460-01-5 |
| 40 | 2,6-Dimethyl-1,3,5,7-octatetraene, E,E- | 460-01-5 |
| 41 | 2-Butanol | 78-92-2 |
| 42 | 2-Butenal, 3-methyl- | 107-86-8 |
| 43 | 2-Hexanol, 3-methyl- | 2313-65-7 |
| 44 | 2-Hexen-1-ol, (E)- | 000928-95-0 |
| 45 | 2-Hexenal, (E)- | 6728-26-3 |
| 46 | 2-Hexyl-1-octanol | 19780-79-1 |
| 47 | 2-Nonanone, O-methyloxime | 56292-72-9 |
| 48 | 2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl- | 502-69-2 |
| 49 | 2-Pentanol | 6032-29-7 |
| 50 | 2-Pentanol, propanoate | 54004-43-2 |
| 51 | 2-Propanol, 1-methoxy- | 000107-98-2 |
| 52 | 3-Heptanone | 106-35-4 |
| 53 | 3-Hexanone | 589-38-8 |

| | | |
|-----|--|-------------|
| 54 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | 000928-96-1 |
| 55 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | 003681-71-8 |
| 56 | 3-Hexen-1-ol, benzoate, (Z)- | 025152-85-6 |
| 57 | 4-Carene, (1S,3S,6R)-(-)- | 5208-50-4 |
| 58 | 4-Hexen-3-one, 5-methyl- | 13905-10-7 |
| 59 | 4-Methyl-2-hexanol | 2313-61-3 |
| 60 | 4-Undecene, 3-methyl-, (E)- | 074630-59-4 |
| 61 | 5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (E)- | 003796-70-1 |
| 62 | 5-Eicosene, (E)- | 74685-30-6 |
| 63 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | 000110-93-0 |
| 64 | 6-tert-Butyl-2,4-dimethylphenol | 1879-09-0 |
| 65 | 6-Tridecane | 42371-66-4 |
| 66 | 8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester | 056599-58-7 |
| 67 | 9,17-Octadecadienal, (Z)- | 56554-35-9 |
| 68 | 9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)- | 1120-25-8 |
| 69 | 9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)- | 001937-62-8 |
| 70 | Acetamide | 60-35-5 |
| 71 | Acetamide, N,N-dimethyl- | 127-19-5 |
| 72 | Acetic acid, hexyl ester | 000142-92-7 |
| 73 | Amylene Hydrate | 75-85-4 |
| 74 | Benzaldehyde | 000100-52-7 |
| 75 | Benzene, 1,2,3-trimethyl- | 000526-73-8 |
| 76 | Benzene, 1,2,4-trimethyl- | 000095-63-6 |
| 77 | Benzene, 1-ethyl-3-methyl- | 000620-14-4 |
| 78 | Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)- | 99-87-6 |
| 79 | Benzene, propyl- | 000103-65-1 |
| 80 | Benzenemethanol, .alpha.,.alpha.-dimethyl- | 000617-94-7 |
| 81 | Benzoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester | 000119-36-8 |
| 82 | Benzoic acid, methyl ester | 000093-58-3 |
| 83 | Benzothiazole | 000095-16-9 |
| 84 | Benzyl Alkohol | 000100-51-6 |
| 85 | Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)- | 28634-89-1 |
| 86 | Bicyclo[3.1.0]hexan-2-one, 5-(1-methylethyl)- | 513-20-2 |
| 87 | Butane, 1-methoxy-3-methyl- | 626-91-5 |
| 88 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | 016491-36-4 |
| 89 | Butanoic acid, 3-hydroxy-, methyl ester | 1487-49-6 |
| 90 | Butylated Hydroxytoluene | 128-37-0 |
| 91 | Cadina 1,4 diene | 29837-12-5 |
| 92 | Carbamic acid, methyl ester | 598-55-0 |
| 93 | Caryophyllene | 000087-44-5 |
| 94 | cis 2 Oxabicyclo(4,4,0)decane | 60416-19-5 |
| 95 | cis-3-Hexenyl isovalerate | 35154-45-1 |
| 96 | cis-Carvyl acetate | 1205-42-1 |
| 97 | Copaene | 3856-25-5 |
| 98 | Cyclobutanone, oxime | 002972-05-6 |
| 99 | Cyclohexadecane | 295-65-8 |
| 100 | Cyclohexane 1,1 dimethyl | 590-66-9 |
| 101 | Cyclohexane, (1-methylethyl)- | 696-29-7 |
| 102 | Cyclohexane, 1,3-dimethyl trans | 2207-06-3 |
| 103 | Cyclohexane, 1-methyl-2-propyl- | 4291-79-6 |
| 104 | Cyclohexane, isothiocyanato- | 1122-82-3 |

| | | |
|-----|--|-------------|
| 105 | Cyclohexane 1,5 diethenyl 3methyl2methylene(1.alpha,3.alpha,5.alpha) | 74742-35-1 |
| 106 | cyclohexene | 110-83-8 |
| 107 | Cyclopentane (1 methylbutyl) | 4737-43-3 |
| 108 | Cyclopentane 1,2,3,4,5 pentamethyl | N/A |
| 109 | Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2-(3-methyl-1,3-butadienyl)- | 68998-21-0 |
| 110 | Decanal | 000112-31-2 |
| 111 | Decane | 124-18-5 |
| 112 | Decane, 2,3,7-trimethyl- | 62238-13-5 |
| 113 | Decanoic acid, methyl ester | 110-42-9 |
| 114 | Diethyl Phthalate | 000084-66-2 |
| 115 | Dodecanoic acid, 1-methylethyl ester | 010233-13-3 |
| 116 | Dodecanoic acid, methyl ester | 111-82-0 |
| 117 | Eicosane | 112-95-8 |
| 118 | Ethanone, 1,1'-(1,4-phenylene)bis- | 1009-61-6 |
| 119 | Ethanone, 1-[4-(1-hydroxy-1-methylethyl)phenyl]- | 54549-72-3 |
| 120 | Ether hexyl pentyl | 32357-83-8 |
| 121 | Ethyl 1,2-dihydro-6-methoxy-2-oxoquinoline-4-carboxylate | 093257-70-6 |
| 122 | Eucalyptol | 470-82-6 |
| 123 | Formamide, N,N-dimethyl- | 68-12-2 |
| 124 | Furan, 2-pentyl- | 3777-69-3 |
| 125 | Furan, 3-(4-methyl-3-pentenyl)- | 539-52-6 |
| 126 | Germacrene D | 23986-74-5 |
| 127 | Heneicosane | 000629-94-7 |
| 128 | Heptadecane | 000629-78-7 |
| 129 | Heptadecane, 8-methyl- | 13287-23-5 |
| 130 | Heptanal | 111-71-7 |
| 131 | Heptane 2,4 dimethyl | 2213-23-2 |
| 132 | Heptane, 2-methyl-3-methylene- | 062187-11-5 |
| 133 | Hexacosane | 630-01-3 |
| 134 | Hexadecane | 544-76-3 |
| 135 | Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- | 638-36-8 |
| 136 | Hexadecanoic acid, 15-methyl-, methyl ester | 6929-04-0 |
| 137 | Hexadecanoic acid, ethyl ester | 628-97-7 |
| 138 | Hexadecanoic acid, methyl ester | 000112-39-0 |
| 139 | Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | 000103-23-1 |
| 140 | Hexanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | 31501-11-8 |
| 141 | Indeno[1,2-b]quinoxalin-6-one, oxime | 23146-22-7 |
| 142 | Isoamyl lactate | 19329-89-6 |
| 143 | Methyl Salicylate | 119-36-8 |
| 144 | Methyl tetradecanoate | 124-10-7 |
| 145 | Myrtenyl acetate | N/A |
| 146 | n octanal | 124-13-0 |
| 147 | Nonadecane | 629-92-5 |
| 148 | Nonanal | 124-19-6 |
| 149 | Nonane, 2-methyl-5-propyl- | 31081-17-1 |
| 150 | Octadecane | 593-45-3 |
| 151 | Octadecanoic acid, methyl ester | 000112-61-8 |
| 152 | Octanal | 000124-13-0 |
| 153 | Octane, 2,4,6-trimethyl- | 62016-37-9 |
| 154 | Pentacosane | 629-99-2 |
| 155 | Pentadecane | 629-62-9 |

| | | |
|-----|---|-------------|
| 156 | Pentadecane 2,6,10,14 tetramethyl | 1921-70-6 |
| 157 | Pentadecane, 2,6,10-trimethyl- | 3892-00-0 |
| 158 | Pentadecane, 2-methyl- | 1560-93-6 |
| 159 | Pentadecane, 3-methyl- | 2882-96-4 |
| 160 | Pentanoic acid, 2,2,4-trimethyl-3-carboxyisopropyl, isobutyl ester | N/A |
| 161 | Phenol | 000108-95-2 |
| 162 | Phenol, 2-(1,1-dimethylethyl)-5-methyl | 88-60-8 |
| 163 | Phenol, 2-(1,1-dimethylethyl)-6-methyl- | 2219-82-1 |
| 164 | Phenol, 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl- | 000119-47-1 |
| 165 | Phenylethyl Alkohol | 60-12-8 |
| 166 | p-Mentha 1,5 diene 8-ol | 1686-20-0 |
| 167 | Propanoic acid | 79-09-4 |
| 168 | Propanoic acid, 2,2-dimethyl-, ethyl ester | 7476-20-2 |
| 169 | Propanoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester | 97-64-3 |
| 170 | Propanoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester, (+/-)- | 2155-30-8 |
| 171 | Propanoic acid, 2-hydroxy-2-methyl- | 594-61-6 |
| 172 | Propanoic acid, 2-methyl-, 1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl ester | 074381-40-1 |
| 173 | Propofol | 2078-54-8 |
| 174 | p-Xylene | 000106-42-3 |
| 175 | Tetracosane | 646-31-1 |
| 176 | Tetradecane | 629-59-4 |
| 177 | Tetradecane, 3-methyl- | 18435-22-8 |
| 178 | Thiourea, tetramethyl- | 2782-91-4 |
| 179 | Toluene | 108-88-3 |
| 180 | trans Carvyl propionate | 145032-51-5 |
| 181 | trans-3-Penten-2-ol | 003899-34-1 |
| 182 | Tridecane | 629-50-5 |
| 183 | Tridecane, 3-methyl- | 6418-41-3 |
| 184 | Tridecane, 4-methyl- | 26730-12-1 |
| 185 | Trifluoroacetyl-lavandulol | 28673-24-7 |
| 186 | Undecane | 1120-21-4 |
| 187 | Undecane, 4,6-dimethyl- | 17312-82-2 |
| 188 | Urea, tetramethyl- | 632-22-4 |
| 189 | Verbenone | 80-57-9 |

Tabelle 6.5. Duftstoffe aus der Spurenanalyse von Salweiden und Zitterpappeln im Gewächshaus im Jahr 2007. Grün= nur bei Zitterpappel; Orange= nur bei Salweide; Weiss= bei beiden Baumarten. Mittlere Peakfläche: „+“ von 10^5 bis 2×10^7 (klein); „++“ von 2×10^7 bis 6×10^7 (mittel); „+++“ von 6×10^7 bis 8×10^7 (groß); „++++“ $> 1 \times 10^8$ (sehr groß).

| NR | RZ | Stoffnamensidentifikation der Nist-Datenbank | CAS | Mittlere Peak Fläche |
|----|--------|---|--------------|----------------------|
| 1 | 7,237 | ? | | + |
| 2 | 7,554 | 1-Methoxy-2-propanol | 000107-98-2 | + |
| 3 | 8,067 | (E)-3-Penten-2-ol | 003899-34-1 | + |
| 4 | 8,265 | p-Xylen | 000106-42-3 | + |
| 5 | 8,674 | Propyl-benzol | 000103-65-1 | + |
| 6 | 9,007 | 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 000620-14-4 | + |
| 8 | 9,679 | 1,2,4-Trimethyl-benzol | 000095-63-6 | + |
| 9 | 9,794 | Hexylacetat | 000142-92-7 | + |
| 10 | 10,031 | 1,2,3-Trimethyl-benzol | 000526-73-8 | + |
| 11 | 10,158 | Octanal | 000124-13-0 | + |
| 12 | 10,372 | (E)-2-(Methylenecyclopropyl)prop-2-yl-2-butenolat | 1000158-24-3 | + |

| | | | | |
|----|--------|---|--------------|----|
| 13 | 10,405 | 2-Methyl-6-methylene-1,7-octadien-3-on | 041702-60-7 | + |
| 14 | 10,616 | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | ++ |
| 15 | 10,829 | ? | | + |
| 16 | 10,906 | 2-Hexen-1-yl-acetat | 010094-40-3 | + |
| 18 | 11,014 | 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | + |
| 19 | 11,141 | 1-Hexanol | 000111-27-3 | + |
| 20 | 11,331 | ? | | + |
| 21 | 11,732 | (Z)-3-Hexen-1-ol | 000928-96-1 | + |
| 22 | 11,802 | (E)-3-Hexenylbutyrat | 053398-84-8 | + |
| 23 | 12,038 | Nonanal | 000124-19-6 | + |
| 24 | 12,068 | (E)-2-Hexen-1-ol | 000928-95-0 | + |
| 25 | 12,925 | 1,3,8-p-Menthatrien | 021195-59-5 | + |
| 26 | 13 | ? | | + |
| 27 | 13,122 | (Z)-3-Hexenylbutyrat | 016491-36-4 | + |
| 29 | 13,343 | (Z)-3-Hexenyl- α -methylbutyrat | 053398-85-9 | + |
| 30 | 13,476 | 2-Ethyl-1-hexanol | 000104-76-7 | + |
| 31 | 13,832 | Decanal | 000112-31-2 | + |
| 32 | 13,986 | 2-methyl-3-methylene-heptan | 062187-11-5 | + |
| 33 | 14,304 | Benzaldehyd | 000100-52-7 | + |
| 34 | 14,462 | 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol | 000078-70-6 | + |
| 35 | 14,517 | ? | | + |
| 36 | 15,469 | Hexadecan | 000544-76-3 | + |
| 37 | 15,636 | ? | | + |
| 38 | 15,874 | Methylbenzoat | 000093-58-3 | + |
| 39 | 16,075 | ? | 055045-10-8 | + |
| 40 | 16,145 | ? | | + |
| 41 | 16,334 | Acetophenon | 000098-86-2 | + |
| 42 | 16,524 | ? | | + |
| 43 | 17,032 | Heptadecan | 000629-78-7 | + |
| 44 | 17,745 | α -Farnesen | 000502-61-4 | + |
| 45 | 17,799 | α , α -Dimethyl-benzenemethanol - | 000617-94-7 | + |
| 46 | 18,278 | Methylsalicylat | 000119-36-8 | + |
| 47 | 18,515 | Octadecan | 000593-45-3 | + |
| 48 | 18,613 | 2,6-Dimethyl-1,5-heptadien | 006709-39-3 | + |
| 49 | 18,95 | 1-Methylethyl-dodecanoat | 010233-13-3 | + |
| 50 | 19,248 | (E)-6,10-dimethyl-5,9-Undecadien-2-on | 003796-70-1 | + |
| 51 | 19,49 | Benzylalkohol | 000100-51-6 | + |
| 52 | 20,483 | ? | | + |
| 53 | 20,653 | Oxime-cyclobutanon | 002972-05-6 | + |
| 54 | 20,819 | Benzothiazol | 000095-16-9 | + |
| 55 | 21,23 | Phenol | 000108-95-2 | + |
| 56 | 21,755 | ? | | + |
| 57 | 21,928 | Bis(2-ethylhexyl)-hexanedioat | 000103-23-1 | + |
| 58 | 22,634 | ? | 1000293-04-2 | + |
| 59 | 22,947 | (Z)-3-Hexen-1-ol-benzoat | 025152-85-6 | + |
| 60 | 23,5 | 2,4-Diphenyl-4-methyl-2(E)-penten | 022768-22-5 | + |
| 62 | 23,979 | Methylpalmitat | 000112-39-0 | + |
| 63 | 24,087 | 1,1,3-Trimethyl-2,3-dihydro-3-phenyl-1H-inden | 003910-35-8 | + |
| 64 | 24,832 | 8,9-Dehydro-cycloisolongifolen | 1000151-28-0 | + |
| 65 | 24,929 | ? | | + |
| 66 | 25,815 | Diethylphthalat | 000084-66-2 | ++ |

| | | | | |
|----|--------|---|--------------|----|
| 67 | 26,391 | Methylstearat | 000112-61-8 | + |
| 68 | 27,69 | Bis(2-methylpropyl)-1,2-benzenedicarboxylat | 000084-69-5 | + |
| 69 | 27,706 | Butyl-isohexyl-phthalat | 1000309-03-6 | + |
| 70 | 27,996 | Bis(2-ethylhexyl)-hexanedioat | 000103-23-1 | + |
| 71 | 28,679 | Heneicosan | 000629-94-7 | ++ |
| 72 | 29,408 | Butyl-2-methylpropyl-1,2-benzenedicarboxylat | 017851-53-5 | + |
| 73 | 30,363 | Ethyl-1,2-dihydro-6-methoxy-2-oxoquinoline-4-carboxylat | 093257-70-6 | ++ |

Tabelle 6.6. Duftstoffe aus der Spurenanalyse von Salweiden und Zitterpappeln im Gewächshaus im Jahr 2008. Grün= nur bei Zitterpappel; Orange= nur bei Salweide; Weiss= bei beiden Baumarten. Mittlere Peakfläche: „+“ von 9×10^5 bis 2×10^7 (klein); „++“ von 2×10^7 bis 6×10^7 (mittel); „+++“ von 6×10^7 bis 8×10^7 (groß); „++++“ $> 1 \times 10^8$ (sehr groß).

| | RZ | Stoffnamenvorschläge der Nist Daten Bank | CAS Nummer | Mittlere Peakfläche |
|----|--------|---|--------------|---------------------|
| 1 | 7,764 | ? | | + |
| 2 | 7,829 | 1-Methoxy-2-propanol | 000107-98-2 | ++ |
| 3 | 9,274 | 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 000620-14-4 | + |
| 4 | 9,533 | ? | | + |
| 5 | 9,603 | ? | | + |
| 6 | 10,007 | Hexylacetat | 000142-92-7 | + |
| 7 | 10,284 | 1,2,3-trimethyl-benzol | 000526-73-8 | + |
| 8 | 10,554 | Cyclohexanon | 000108-94-1 | + |
| 9 | 10,614 | (E)-7,11-dimethyl-3-methylene-1,6,10-dodecatrien | 018794-84-8 | + |
| 10 | 10,771 | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | ++++ |
| 11 | 11,052 | 2-Hexen-1-yl-acetat | 010094-40-3 | ++ |
| 12 | 11,158 | 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | + |
| 13 | 11,459 | ? | | + |
| 14 | 11,802 | (Z)-3-Hexen-1-ol | 000928-96-1 | + |
| 15 | 12,105 | Nonanal | 000124-19-6 | + |
| 16 | 12,171 | ? | | + |
| 17 | 12,974 | ? | | + |
| 18 | 13,018 | E,E-2,6-Dimethyl-1,3,5,7-octatetraen | 000460-01-5 | + |
| 19 | 13,1 | ? | | + |
| 20 | 13,181 | (Z)-3-Hexenylbutyrat | 016491-36-4 | + |
| 21 | 13,399 | (Z)-3-Hexenyl-isovalerat | 035154-45-1 | + |
| 22 | 13,89 | Decanal | 003856-25-5 | + |
| 23 | 13,901 | ? | | + |
| 24 | 14,028 | ? | | + |
| 25 | 14,15 | ? | | + |
| 26 | 14,325 | (S)-3-Ethyl-4-methylpentanol | 1000144-07-1 | ++ |
| 27 | 14,491 | 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | 000078-70-6 | + |
| 28 | 14,532 | (E)-3-Methyl- 4-undecen | 074630-59-4 | + |
| 29 | 15,68 | Caryophyllen | 000087-44-5 | + |
| 30 | 17,772 | α -Farnesen | 000502-61-4 | + |
| 31 | 18,315 | Methylsalicylat | 000119-36-8 | +++ |
| 32 | 18,647 | E,E-2,6-Dimethyl-3,5,7-octatriene-2-ol | 1000141-11-8 | ++ |
| 33 | 18,853 | O,O,S-Trimethyl-phosphorodithioat | 002953-29-9 | + |
| 34 | 18,973 | 1-Methylethyl-dodecanoat | 010233-13-3 | ++ |
| 35 | 19,528 | Benzylalkohol | 000100-51-6 | + |
| 36 | 19,618 | 2-methyl-1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl Propanoat | 074381-40-1 | + |

| | | | | |
|----|--------|--|-------------|-----|
| 37 | 20,522 | ? | | + |
| 38 | 20,681 | Oxime-cyclobutanon | 002972-05-6 | + |
| 39 | 21,313 | ? | | + |
| 40 | 21,552 | ? | | + |
| 41 | 21,781 | ? | | + |
| 42 | 22,172 | 2-Cyclohexylidene-cyclohexanon- | 001011-12-7 | + |
| 43 | 22,665 | ? | | + |
| 44 | 23,961 | ? | | + |
| 45 | 24,004 | Methylpalmitat | 000112-39-0 | + |
| 46 | 24,263 | ? | | + |
| 47 | 24,856 | ? | | ++ |
| 48 | 25,811 | Diethylphthalat | 000084-66-2 | +++ |
| 49 | 26,438 | Methylstearat | 000112-61-8 | + |
| 50 | 26,661 | (E)-Methyl 9-octadecenoat | 001937-62-8 | + |
| 51 | 27,189 | Methyl-8,11-octadecadienoat | 056599-58-7 | + |
| 52 | 27,714 | Bis(2-methylpropyl)-1,2-benzenedicarboxylat | 000084-69-5 | + |
| 53 | 29,423 | Butyl 2-methylpropyl-1,2-benzenedicarboxylat | 017851-53-5 | + |
| 54 | 30,836 | 2,2'-Methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol] | 000119-47-1 | ++ |
| 55 | 31,106 | Bis(2-ethylhexyl)-hexanedioat | 000103-23-1 | ++ |

Tabelle 6.7. Duftstoffkonzentrationen (x 10.000.000) in den Gewächshausduftproben von zwei Vegetationsperioden. Die Reihenfolge ergibt sich aus der Retentionszeit.

| Stoffname | | 2007 | | | | 2008 | | | |
|------------------------|---------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | | SW So | SW Sch | ZP So | ZP Sch | SW So | SW Sch | ZP So | ZP Sch |
| 1-Methoxy-2-propanol | Median | 5,48 | 48,11 | 17,20 | 28,59 | 188,86 | 49,03 | 32,49 | 59,82 |
| | Perzentil 25% | 1,65 | 40,70 | 15,49 | 4,54 | 116,07 | 21,68 | 29,43 | 45,28 |
| | Perzentil 75% | 5,97 | 119,78 | 24,58 | 30,83 | 337,84 | 257,57 | 47,11 | 137,39 |
| 1-Ethyl-3-methylbenzol | Median | 0,71 | 7,52 | 3,95 | 11,04 | 3,00 | 1,77 | 9,35 | 29,64 |
| | Perzentil 25% | 0,35 | 4,02 | 2,87 | 0,94 | 1,94 | 1,01 | 3,12 | 26,93 |
| | Perzentil 75% | 1,00 | 8,50 | 4,03 | 11,75 | 3,23 | 1,95 | 16,59 | 35,95 |
| 1,2,4-Trimethylbenzol | Median | 0,93 | 7,77 | 6,60 | 17,06 | 1441,32 | 729,05 | 4108,30 | 16340,92 |
| | Perzentil 25% | 0,59 | 4,34 | 5,60 | 2,38 | 542,81 | 609,08 | 3158,36 | 15199,63 |
| | Perzentil 75% | 1,04 | 8,38 | 6,83 | 19,43 | 2559,59 | 2041,96 | 8770,54 | 16702,96 |
| Hexylacetat | Median | 0,00 | 5,69 | 9,43 | 18,28 | 14,14 | 4,25 | 96,18 | 242,56 |
| | Perzentil 25% | 0,00 | 1,58 | 9,37 | 11,01 | 7,43 | 2,38 | 74,47 | 234,68 |
| | Perzentil 75% | 0,00 | 14,70 | 20,73 | 50,84 | 18,95 | 9,54 | 294,05 | 245,74 |
| (Z)-3-Hexen-1-ylacetat | Median | 24,33 | 985,60 | 1656,97 | 1889,14 | 1441,32 | 729,05 | 4108,30 | 16340,92 |
| | Perzentil 25% | 5,62 | 244,79 | 1391,67 | 1674,52 | 542,81 | 609,08 | 3158,36 | 15199,63 |
| | Perzentil 75% | 147,72 | 1585,55 | 2210,06 | 4846,21 | 2559,59 | 2041,96 | 8770,54 | 16702,96 |
| 6-Methyl-5-hepten-2-on | Median | 0,97 | 5,93 | 6,30 | 10,66 | 2,83 | 4,12 | 48,19 | 15,90 |
| | Perzentil 25% | 0,77 | 5,17 | 5,99 | 1,23 | 0,00 | 1,94 | 20,73 | 11,09 |
| | Perzentil 75% | 1,26 | 11,81 | 17,92 | 20,10 | 4,47 | 5,12 | 56,68 | 17,48 |
| Nonanal | Median | 21,17 | 137,32 | 84,69 | 118,77 | 122,87 | 115,69 | 182,35 | 441,03 |

| | | | | | | | | | |
|---|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | Perzentil 25% | 19,81 | 65,06 | 74,07 | 34,85 | 122,55 | 115,10 | 157,68 | 415,87 |
| | Perzentil 75% | 61,89 | 137,76 | 116,47 | 124,89 | 131,44 | 154,28 | 524,88 | 627,00 |
| (Z)-3-Hexenylbutyrat | Median | 0,38 | 0,56 | 13,08 | 34,74 | 1,81 | 5,47 | 3,32 | 31,99 |
| | Perzentil 25% | 0,00 | 0,40 | 11,21 | 13,36 | 1,68 | 0,89 | 2,71 | 25,07 |
| | Perzentil 75% | 0,75 | 1,21 | 16,52 | 89,88 | 2,44 | 7,74 | 11,21 | 46,47 |
| 2-Ethyl-1-hexanol | Median | 0,92 | 1,60 | 1,34 | 2,11 | 2,62 | 2,43 | 3,18 | 4,66 |
| | Perzentil 25% | 0,49 | 1,08 | 1,13 | 0,70 | 2,33 | 2,33 | 1,47 | 3,91 |
| | Perzentil 75% | 9,10 | 3,34 | 2,11 | 2,88 | 4,33 | 2,83 | 4,15 | 5,19 |
| Decanal | Median | 2,11 | 13,30 | 5,56 | 7,49 | 0,00 | 0,00 | 18,97 | 26,19 |
| | Perzentil 25% | 1,89 | 8,33 | 2,96 | 1,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 21,50 |
| | Perzentil 75% | 2,17 | 20,45 | 7,32 | 11,64 | 0,00 | 0,00 | 27,82 | 27,35 |
| 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | Median | 0,00 | 0,00 | 4,54 | 4,82 | 0,00 | 0,00 | 32,97 | 0,00 |
| | Perzentil 25% | 0,00 | 0,00 | 3,34 | 2,41 | 0,00 | 0,00 | 27,83 | 0,00 |
| | Perzentil 75% | 0,00 | 0,00 | 6,46 | 5,69 | 0,00 | 0,00 | 35,36 | 14,15 |
| Benzaldehyd | Median | 0,60 | 2,26 | 3,22 | 3,34 | 1,42 | 1,75 | 4,94 | 5,99 |
| | Perzentil 25% | 0,58 | 2,04 | 2,45 | 1,80 | 1,31 | 1,56 | 3,47 | 4,99 |
| | Perzentil 75% | 0,64 | 2,37 | 5,02 | 3,76 | 1,61 | 1,77 | 8,40 | 6,61 |
| Methylsalicylat | Median | 6,70 | 5,28 | 28,99 | 26,43 | 0,00 | 0,00 | 271,15 | 10,07 |
| | Perzentil 25% | 5,94 | 5,26 | 28,14 | 8,49 | 0,00 | 0,00 | 83,38 | 0,00 |
| | Perzentil 75% | 13,92 | 5,68 | 40,70 | 41,80 | 0,00 | 0,00 | 1580,54 | 12,08 |
| Benzylalkohol | Median | 1,47 | 4,11 | 5,46 | 5,96 | 1,33 | 2,59 | 9,78 | 8,24 |
| | Perzentil 25% | 1,22 | 3,83 | 4,41 | 2,26 | 1,32 | 2,56 | 5,03 | 7,81 |
| | Perzentil 75% | 1,59 | 5,45 | 6,74 | 6,51 | 1,58 | 2,97 | 10,07 | 9,92 |
| Methyltetradecanoat | Median | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,91 | 1,04 | 0,67 | 0,49 |
| | Perzentil 25% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,87 | 0,86 | 0,53 | 0,49 |
| | Perzentil 75% | 0,00 | 0,29 | 0,00 | 0,35 | 1,00 | 1,05 | 0,69 | 0,55 |

Tabelle 6.8. Änderung der Duftspektren während der Vegetationsperiode. Stoffe die bei mindestens 40% der Duftproben vorhanden waren. Die Reihenfolge ergibt sich aus der Retentionszeit. Die Stoffnamen sind Vorschläge der Nist Daten Bank.

| Nr | RZ | Name aus Nist Daten Bank | SW So | | | SW Sch | | | ZP So | | | ZP Sch | | |
|----|-------|--------------------------------|-------|-----|------|--------|-----|------|-------|-----|------|--------|-----|------|
| | | | V | VII | VIII | V | VII | VIII | V | VII | VIII | V | VII | VIII |
| | | Monat | | | | | | | | | | | | |
| | | Anzahl der Proben | 8 | 2 | 7 | 7 | 5 | 8 | 8 | 3 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 1 | 5,6 | Amylene Hydrate | v | v | | v | v | | v | v | | v | v | |
| 2 | 5,846 | Toluene | v | | | | | | | v | | | | |
| 3 | 6,071 | 2-Butanol | | v | | | v | | | | | | v | |
| 4 | 6,3 | Tetramethyl silicate | | | v | | | v | | | v | | | v |
| 5 | 6,363 | Propanoic acid, 2,2-dimethyl-, | | v | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ethyl ester | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 6,4 | 3-Hexanone | | | | | v | | | v | | | | |
| 7 | 6,6 | Undecane | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v |
| 8 | 6,727 | Hexanal | | | | | | | | v | | | | |
| 9 | 7 | Bicyclo[3.1.0]hex-2-ene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)- | | | | v | | | | v | | | v | |
| 10 | 7,129 | 3-Hexanol | | | | | | | | | | v | | |
| 11 | 7,172 | .beta.-Phellandrene | | v | | | | | | v | | | | |
| 12 | 7,2 | 2-Pentanol | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | |
| 13 | 7,4 | 2-Propanol, 1-methoxy- | v | | | v | | | | | | v | | |
| 14 | 7,448 | 2-Pentanol, propanoate | | | | | | v | | | v | | | v |
| 15 | 7,7 | 3-Heptanone | | | | v | | | | | | v | | |
| 16 | 7,792 | .beta.-Myrcene | | v | | | | | v | v | | | | |
| 17 | 7,926 | unbestimmt | | | | v | | | | | | v | | |
| 18 | 8,157 | Dodecane | | | | | | | | v | | | | |
| 19 | 8,334 | Heptanal | v | v | | v | v | | v | v | | v | v | |
| 20 | 8,336 | 1-Butanol, 2-methyl-, propanoate | | | v | | | v | | | v | | | v |
| 21 | 8,461 | D-Limonene | | | | | | | v | v | | | | |
| 24 | 8,705 | Eucalyptol | v | | | v | v | | v | v | | v | v | |
| 25 | 8,802 | 1,3,8-p-Menthatriene | | v | | | | | | v | | | | |
| 27 | 9,009 | 4-Carene, (1S,3S,6R)-(-)- | | v | | | | | | | | | | |
| 28 | 9,015 | 2-Hexenal, (E)- | | | | v | | | | v | | | | |
| 29 | 9,033 | Furan, 2-pentyl- | | v | | v | v | | | v | | | | |
| 30 | 9,052 | Benzene, 1-ethyl-3-methyl- | | | | | | v | | | v | v | | |
| 31 | 9,356 | 1,3,7-Octatriene, 3,7-dimethyl- | | | v | | | | v | v | | | | |
| 32 | 9,374 | 1,3,6-Octatriene, 3,7-dimethyl-, (Z)- | | v | | | | | | v | | | v | |
| 33 | 9,386 | 1-Pentanol | | | | v | | | | | | | | |
| 34 | 9,435 | Propanoic acid, 2-hydroxy-2-methyl- | v | | | v | | v | | | v | | | |
| 35 | 9,437 | Butanoic acid, 3-methyl-2-[(phenylmethoxy)imino]-, trimethylsilyl ester | | | | | | | | | | | | v |
| 36 | 9,447 | 3-Hydroxy-3-methyl-2-butanone | | | | | | | | | | | v | |
| 37 | 9,702 | Isoamyl lactate | | | | | v | | | | | | | |
| 38 | 9,703 | 2-Heptanol, 4-methyl- | | | | | | | | | | | | |
| 39 | 9,705 | 2-Hexanol, 3-methyl- | | | | | | v | | | v | | | v |
| 40 | 9,711 | Butane, 1-methoxy-3-methyl- | | | v | | | | | | | | | |
| 41 | 9,757 | Acetic acid, hexyl ester | | | | v | | | v | | | v | | |
| 42 | 9,782 | Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)- | | v | | | v | | | | | | | |
| 43 | 9,782 | Furan, 3-(4-methyl-3-pentenyl)- | | v | | | | | | | | | | |
| 44 | 9,796 | unbestimmt | | | | | | v | | | | | | |
| 46 | 9,808 | 4-Methyl-2-hexanol | | | v | | | | | | v | | | v |
| 47 | 9,869 | Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)- | | | | | | | | | | | | v |
| 48 | 9,893 | unbestimmt | | | | | | v | | | v | | | |
| 49 | 10,025 | Tridecane | | | | | | | | | | | v | |
| 50 | 10,074 | Benzene, 1,3,5-trimethyl- | | | | | | | v | | | v | | v |
| 51 | 10,1 | Octanal | v | v | | v | | | v | v | | v | v | |
| 52 | 10,112 | Butanoic acid, 3-hydroxy-, methyl ester | | | v | | | v | | | v | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 53 | 10,167 | Octanal | | | | | v | | | | v | | | v |
| 54 | 10,173 | 1-Penten-3-ol, 4-methyl- | | | | | | v | | | | | | |
| 55 | 10,3 | (E)-2-Butenoic acid, 2-(methylenecyclopropyl)prop-2-yl ester | | v | | | v | | v | v | | v | v | |
| 56 | 10,335 | unbestimmt | v | | | | v | | | | | | | |
| 57 | 10,354 | Trifluoroacetyl-lavandulol | | v | | | | | | | | | | |
| 58 | 10,59 | 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- | v | v | | | v | v | | v | v | | v | v |
| 59 | 10,67 | Tridecane | | | | | | | | v | | | | |
| 60 | 10,678 | Propanoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester, (+/-)- | | | | v | | | v | | | v | | v |
| 61 | 10,84 | 1-Tridecene | | v | | | | | | | | | | |
| 62 | 10,858 | 1-Dodecanol | | | | | | | | v | | | | |
| 63 | 10,952 | Formamide, N,N-dimethyl- | | | v | | | v | | | v | | | v |
| 64 | 10,992 | 5-Hepten-2-one, 6-methyl- | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v |
| 65 | 11,116 | Propanoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester | | | v | | | v | | | v | | | v |
| 66 | 11,163 | 1-Hexanol | | | | v | | | | | | | | |
| 67 | 11,181 | Benzene, methoxy- | | | | | | | | | | v | | |
| 68 | 11,4 | Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl- | | | | | | | v | | | | v | v |
| 69 | 11,564 | Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl- | | | | | | | | | | v | | |
| 70 | 11,7 | 3-Hexen-1-ol, (Z)- | v | v | | | v | | v | v | | v | v | |
| 71 | 11,826 | Tetradecane | | | | | v | v | | v | | | v | |
| 72 | 11,9 | Nonanal | v | v | v | v | v | | v | v | v | v | v | v |
| 73 | 11,919 | Octanoic acid, 8-hydroxy-, methyl ester | | | | | | | | | | | | v |
| 74 | 12,223 | Acetamide, N,N-dimethyl- | | | v | | | v | | | v | | | |
| 75 | 12,296 | unbestimmt | | v | | | | v | | | v | | | |
| 76 | 12,482 | Undecane, 2,6-dimethyl- | | | | | | | | v | | | | |
| 77 | 12,5 | Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- | | | | | v | | | | | | | |
| 78 | 12,501 | Decane, 2,3,7-trimethyl- | | v | | | | | | | | | | |
| 80 | 12,674 | 2,6-Dimethyl-1,3,5,7-octatetraene, E,E- | | v | | | v | | v | v | | | | |
| 81 | 12,8 | 1-Octen-3-ol | v | | | | v | v | | | | | v | v |
| 82 | 12,8 | Octane, 2,4,6-trimethyl- | | | | | v | | | | | | | |
| 83 | 12,838 | Benzene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)- | | | | | | | | | | | | v |
| 84 | 12,88 | 1,3,8-p-Menthatriene | | v | | | v | | v | v | | | | |
| 85 | 13,04 | Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | | v | | | v | | v | v | | | | |
| 86 | 13,112 | Urea, tetramethyl- | | | v | | | v | | | v | | | |
| 87 | 13,2 | cis-3-Hexenyl isovalerate | | | | | v | | | | | | | |
| 88 | 13,298 | Acetic acid | | | | | | | | | | v | v | v |
| 89 | 13,493 | 1-Hexanol, 2-ethyl- | v | | v | | | v | | | v | v | | |
| 90 | 13,523 | Heptacosane | | | | | | | | v | | | | |
| 91 | 13,541 | Pentadecane | | v | | | v | v | | | | | v | |
| 92 | 13,638 | .alpha.-Cubebene | | | | | | | | v | | | | |
| 93 | 13,7 | Decanal | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v |
| 94 | 14,225 | Pentadecane, 2,6,10-trimethyl- | | | v | | | | | v | | | | |
| 95 | 14,3 | Benzaldehyde | | | | | v | | v | v | v | v | | |
| 96 | 14,4 | 1,6-Octadien-3-ol, 3,7-dimethyl- | | v | | | v | | | | | | v | |
| 97 | 14,436 | Tricyclo[2.2.1.0 ^{2,6}]heptane, 1,7,7-trimethyl- | | | | | | | | | | | | v |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|
| 98 | 14,448 | Bicyclo[4.1.0]hept-3-ene, 3,7,7-trimethyl-, (1S)- | | | | | | v | | | | | | |
| 99 | 14,472 | Pentadecane, 2-methyl- | v | | | v | | | | | | | | |
| 100 | 14,612 | 1-Octanol | | | v | | | | | | | v | | |
| 101 | 14,624 | N-Aminopyrrolidine | | | | | | | v | | | | | |
| 102 | 14,632 | Tridecane, 4-methyl- | | v | | | | | | | | | | |
| 103 | 14,675 | Tetradecane, 3-methyl- | | v | | | | | | | | | | |
| 104 | 14,876 | Pentadecane, 3-methyl- | | v | | | | | | | | | | |
| 105 | 14,916 | Propanoic acid | | | v | | | v | v | | | v | v | |
| 106 | 14,922 | unbestimmt | | | | | | | | | | v | | |
| 107 | 15,135 | Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene, 2,6-dimethyl-6-(4-methyl-3-pentenyl)- | | | | | | | | v | | | | |
| 108 | 15,202 | Hexadecane | v | | v | v | v | | v | v | | | | |
| 109 | 15,229 | Tridecane, 3-methyl- | | v | | | | | | | | | | |
| 111 | 15,399 | Hexadecane | | v | | | | | | | | | v | |
| 112 | 15,429 | Tridecane | | | | | | | | | | | | v |
| 113 | 15,439 | Caryophyllene | | | v | | | v | v | | | v | v | |
| 114 | 15,457 | UnDecanal | | | | | | | v | | | | | |
| 116 | 15,531 | Undecane, 4,6-dimethyl- | v | | | | | | | | | | | |
| 117 | 15,709 | Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- | | v | | | | | | | | | | |
| 118 | 15,786 | 2(3H)-Furanone, dihydro-5-methyl- | | | | | | | | v | | | | |
| 119 | 15,877 | Carbamic acid, methyl ester | | | | | v | v | | v | | | | |
| 120 | 15,89 | Benzoic acid, methyl ester | v | | | | | | | | | | | |
| 121 | 16 | Heptadecane, 8-methyl- | | v | | | | | | | | | | |
| 122 | 16 | Nonane, 2-methyl-5-propyl- | | | | | | v | | | | | | |
| 123 | 16,069 | Bicyclo[3.1.0]hexan-2-one, 5-(1-methylethyl)- | v | | | v | | | v | | | v | v | |
| 124 | 16,2 | Hexanoic acid, 3-hexenyl ester, (Z)- | | | | v | | | | | | | | |
| 125 | 16,212 | Nonanol | | | | | | | | v | | | | |
| 126 | 16,224 | 1-Nonanol | | | | | | | | | | | v | |
| 127 | 16,226 | 2-Hexyl-1-octanol | | | | | | v | | | | | | |
| 128 | 16,237 | Pentadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- | v | v | | v | | | | | | | | |
| 129 | 16,36 | Acetophenone | | | | | | | | | | v | | |
| 130 | 16,439 | Dodecane, 2,6,11-trimethyl- | | | | | | | | | | v | | |
| 131 | 16,443 | unbestimmt | | | | v | | | | | | | | |
| 132 | 16,449 | Cyclohexane, (1-methylethyl)- | v | v | | | | | | | | | | |
| 133 | 16,458 | Tetracosane | | | | | | | v | | | | | |
| 134 | 16,524 | 1-Propanol, 2-(2-hydroxypropoxy)- | | | | | | | | | | v | | |
| 135 | 16,772 | Heptadecane/Decane | v | | | | v | | | | | | | v |
| 136 | 16,78 | Cyclohexane, isothiocyanato- | | | | | | v | | | | v | | |
| 137 | 16,95 | Heptadecane | | v | | | | v | | | | v | | v |
| 138 | 17,064 | 1,3,8-p-Menthatriene | | | | | | | | v | | | | |
| 139 | 17,076 | Dodecanal | | | | | | | | | | | v | |
| 141 | 17,204 | 1,6-Cyclodecadiene, 1-methyl-5-methylene-8-(1-methylethyl)-, [s-(E,E)]- | | | | v | | | | | | | | |
| 143 | 17,344 | unbestimmt | | | | | | | | v | | | | |
| 144 | 17,617 | Cyclopropane, 1,1-dimethyl-2- | v | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (3-methyl-1,3-butadienyl)- | | | | | | | | | | | |
| 145 | 17,772 | 2,5-Hexanediol, 2,5-dimethyl- | | | v | | | v | | | v | | v |
| 146 | 17,848 | Acetamide | | | | v | | | | | | v | |
| 147 | 17,991 | 2(5H)-Furanone, 5-ethyl- | | | | | | | | v | | | v |
| 148 | 18,009 | 4-Hexen-3-one, 5-methyl- | | | v | | | v | | | | | |
| 149 | 18,268 | Methyl Salicylate | v | v | | v | | | | | | v | v |
| 150 | 18,336 | Dodecanoic acid, methyl ester | | | | | v | | | v | | v | |
| 151 | 18,435 | Octadecane/ Heptadecane | | | v | | | v | | | | | v |
| 152 | 18,453 | Decanoic acid, methyl ester | | | | | v | | | | v | | |
| 153 | 18,652 | 2,6-Dimethyl-1,3,5,7-octatetraene, E,E- | | | v | | v | v | | v | | | v |
| 154 | 18,7 | Dodecanoic acid, 1-methylethyl ester | v | v | v | v | v | v | | v | v | v | v |
| 155 | 19,181 | 5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (E)- | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v | v |
| 156 | 19,448 | Propanoic acid, 2-methyl-, 1-(1,1-dimethylethyl)-2-methyl-1,3-propanediyl ester | v | | | | v | v | | v | v | v | |
| 157 | 19,53 | Pentanoic acid, 2,2,4-trimethyl-3-carboxyisopropyl, isobutyl ester | | | | v | | | | | | | v |
| 159 | 19,6 | Benzyl Alkohol | v | v | | | v | v | | v | | | v |
| 160 | 19,7 | unbestimmt | | | | | | | | | | | v |
| 161 | 19,828 | Tetradecane, 6,9-dimethyl- | | | | | | | | | v | | |
| 162 | 19,84 | Nonadecane | | | | v | | | | | | | |
| 163 | 19,84 | Heptadecane | | | | | | | v | | | | |
| 164 | 20,059 | Butylated Hydroxytoluene | | | | v | | | v | | v | | |
| 165 | 20,087 | Phenylethyl Alkohol | v | v | v | v | | | v | | | v | |
| 166 | 20,205 | Thiourea, tetramethyl- | | | | | | v | | | v | | v |
| 167 | 20,318 | Octadecanoic acid, methyl ester | v | | | | v | v | | | | v | v |
| 168 | 20,416 | Benzyl nitrile | | | | | | | | v | | | |
| 169 | 20,537 | 2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-2-(2-pentenyl)-, (Z)- | | | | | | | | v | | | v |
| 170 | 20,744 | 3-Heptanone, 2-methyl- | | | | | | | | | v | | |
| 171 | 20,836 | Benzothiazole | | | | | | v | | | | v | v |
| 172 | 21,184 | Eicosane | | | | v | | | | | | | |
| 173 | 21,197 | Hexacosane | | | | | | | | v | | | |
| 174 | 21,2 | Methyl tetradecanoate | v | v | v | v | v | v | v | v | | v | v |
| 176 | 21,3 | Phenol | | | | | | | | | | v | |
| 178 | 21,602 | 1,6,10-Dodecatrien-3-ol, 3,7,11-trimethyl-, (E)- | | | | v | | | | | | | |
| 179 | 21,633 | Indeno[1,2-b]quinoxalin-6-one, oxime | | | | | | | | | | | v |
| 180 | 22,067 | 6-tert-Butyl-2,4-dimethylphenol | | | | v | | | | | | | |
| 181 | 22,192 | unbestimmt | v | | | | v | | | | | | |
| 183 | 22,468 | Heneicosane | | | | v | | | | | v | | |
| 184 | 22,612 | Methyl 9-methyltetradecanoate | | | | | | | | | | v | v |
| 185 | 22,636 | Hexadecanoic acid, 15-methyl-, methyl ester | | | | | | | | | | | |
| 186 | 22,669 | Pentadecanoic acid, methyl ester | | | | | | | | | | | |
| 187 | 22,825 | 2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl- | | | | v | | | | | | | |
| 188 | 22,918 | Nonanedioic acid, dimethyl ester | | | | | | | | | | v | |
| 189 | 23 | 3-Hexen-1-ol, benzoate, (Z)- | v | v | | | v | | | | | | v |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 191 | 23,709 | Pentacosane | | | v | | | | | | v | | | |
| 192 | 23,721 | Nonadecane | | | | | | v | | | | | | |
| 193 | 23,91 | Hexadecanoic acid, methyl ester | v | | | v | | | | | v | | | v |
| 194 | 23,993 | 1,3,8-p-Menthatriene | | v | | | | | | | | | | |
| 195 | 24,068 | Phenol, 2-(1,1-dimethylethyl)-6-methyl-/ oder 5-methyl | | | v | | | v | | | v | | | |
| 196 | 24,1 | unbestimmt | | | | | | v | | | | | | |
| 197 | 24,2 | Hexadecanoic acid, methyl ester | | v | v | | | v | v | v | v | | v | v |
| 198 | 24,287 | 2-Cyclopenten-1-one, 2-pentyl- | | | | | | | | | | | | v |
| 199 | 24,348 | Hexadecanoic acid, ethyl ester | | | v | | | | v | | | | | |
| 200 | 24,7 | unbestimmt | | | | | | v | | | | | | |
| 201 | 24,741 | 9-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)- | v | | | | v | v | v | | | v | | v |
| 202 | 24,895 | Tetracosane | | | | | | | | | | v | | |
| 203 | 24,902 | Heptadecane | | | v | | | | | | | | | v |
| 204 | 24,972 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester | v | v | | | v | v | | | | | v | v |
| 205 | 25,473 | Ethanone, 1,1'-(1,4-phenylene)bis- | | | v | | | | v | | | | | |
| 206 | 25,997 | 1,3,5-Triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, 1,3,5-tri-2-propenyl- | | | v | | | | v | | | v | | v |
| 207 | 26,051 | Heptadecane/ Hexadecane | | | v | | | | v | | | | | v |
| 208 | 26,313 | Octadecanoic acid, methyl ester | | | v | | | | v | | | v | | v |
| 209 | 26,568 | 11-Octadecenoic acid, methyl ester, (Z)- | | | v | | | | v | | | v | | v |
| 210 | 26,75 | .alpha.,.alpha.'-Dihydroxy-m-diisopropylbenzene | | | | | | | | | | v | | |
| 211 | 26,77 | .alpha.,.alpha.,.alpha.',.alpha.'-Tetramethyl-1,4-benzenedimethanol | | | v | | | | v | | | | | |
| 212 | 27,043 | Propofol | | | v | | | | v | | | | | |
| 213 | 27,14 | 9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester | | | | | | | | | | | | v |
| 214 | 27,177 | Cyclohexadecane | | | v | | | | v | | | v | | |
| 215 | 27,457 | 9,17-Octadecadienal, (Z)- | | | v | | | | | | | v | | |
| 216 | 27,469 | 6-Tridecane | | | | | | | v | | | | | |
| 217 | 27,67 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester | | | v | | | | v | | | v | | v |
| 218 | 27,864 | Ethanone, 1-[4-(1-hydroxy-1-methylethyl)phenyl]- | | | v | | | | v | | | v | | |
| 219 | 28,217 | Heneicosane | | | v | | | | v | | | v | | v |
| 220 | 28,55 | 1H-Isoindole-1,3(2H)-dione, 2-(2-hydroxyethyl)- | | | v | | | | v | | | | | |
| 221 | 28,764 | Hexadecane | | | v | | | | v | | | | | |
| 222 | 28,807 | 9-Octadecenoic acid, (E)- | | | | | | | | | | | | v |
| 223 | 29,178 | 1,2-Benzenedicarboxylic acid, mono(2-ethylhexyl) ester | | | v | | | | v | | | v | | |
| 224 | 29,324 | Octadecane | | | v | | | | v | | | v | | |
| 225 | 29,434 | 5-Eicosene, (E)- | | | v | | | | v | | | | | |
| 226 | 30,59 | Heneicosane | | | v | | | | v | | | | | |
| 227 | 30,724 | 2-Nonanone, O-methyloxime | | | v | | | | | | | | | |
| 228 | 30,942 | 4-Methylthiophene-2-sulfonamide | | | | | | | | | | v | | |
| 229 | 30,973 | Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | | | v | | | | v | | | v | | v |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|---------------------|--|--|---|--|--|---|--|--|---|--|--|---|
| 230 | 32,068 | Octadecane | | | v | | | v | | | v | | | |
| 231 | 32,287 | n-Hexadecanoic acid | | | | | | | | | | | | v |

Literaturverzeichnis:

- Boland, W., Ney, P., Jaenicke, L. and Gassmann, G., 1984, A “closed-loop-stripping” technique as a versatile tool for metabolic studies of volatiles. *Analysis of Volatiles*. Walter de Gruyter & Co, Berlin.
- Brilli, F. et al., 2009, Constitutive and herbivore-induced monoterpenes emitted by *Populus x euroamericana* leaves are key volatiles that orient *Chrysomela populi* beetles. *Plant Cell and Environment*, 32(5): 542-552.
- Brooks, J.E., Borden, J.H., Pierce, H.D. and Lister, G.R., 1987, Seasonal variation in foliar and bud monoterpenes in Sitka spruce. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique*, 65(6): 1249-1252.
- Bruce, T.J.A., Wadhams, L.J. and Woodcock, C.M., 2005, Insect host location: a volatile situation. *Trends in Plant Science*, 10(6): 269-274.
- Chararas, C., Schoenen.A and Poupon, H., 1969, Variations in vitality and osmotic pressure in different Eucalyptus as a function of ecological conditions and role of *Phoracantha semipunctata* Fabr. (Coleoptera Cerambycidae Xylophaga). *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Seances De L Academie Des Sciences Serie D*, 268(22): 2697-2711.
- Damm, M., 2003, Faunistische Erfassung phytophager Insekten an ausgewählten Waldaußen- und Waldinnenrändern des Sollings unter besonderer Berücksichtigung der Macrolepidoptera und von Waldrandstrukturen. Fakultät für Forstwissenschaft und Waldökologie, PhD. Georg-August-Universität, Göttingen, 182 pp.
- De Moraes, C.M., Mescher, M.C. and Tumlinson, J.H., 2001, Caterpillar-induced nocturnal plant volatiles repel conspecific females. *Nature*, 410: 577-580.
- Durner, J., Shah, J. and Klessig, D.F., 1997, Salicylic acid and disease resistance in plants. *Trends in Plant Science*, 2(7): 266-274.
- Ebert, G. et al., 1994, Die Schmetterlinge Baden-Württenbergs, 4. Eugen Ulmer, Stuttgart, 535 pp.
- Fernandez, P.C., Meiners, T., Bjorkman, C. and Hilker, M., 2007, Electrophysiological responses of the blue willow leaf beetle, *Phratora vulgatissima*, to volatiles of different *Salix viminalis* genotypes. *Entomologia Experimentalis Et Applicata*, 125: 157-164.
- Frost, C.J. et al., 2007, Within-plant signalling via volatiles overcomes vascular constraints on systemic signalling and primes responses against herbivores. *Ecology Letters*, 10(6): 490-498.
- Frost, C.J., Mescher, M.C., Carlson, J.E. and De Moraes, C.M., 2008a, Why do distance limitations exist on plant-plant signaling via airborne volatiles? *Plant Signal Behav*, 3(7): 466-8.
- Frost, C.J. et al., 2008b, Priming defense genes and metabolites in hybrid poplar by the green leaf volatile cis-3-hexenyl acetate. *New Phytologist*, 180(3): 722-733.
- Haynes, K.F., Zhao, J.Z. and Latif, A., 1991, Identification of floral compounds from *Abelia grandiflora* that stimulate upwind flight in cabbage looper moths. *Journal of Chemical Ecology*, 17(3): 637-646.
- Honda, K., Omura, H. and Hayashi, N., 1998, Identification of floral volatiles from *Ligustrum japonicum* that stimulate flower-visiting by Cabbage butterfly, *Pieris rapae*. *Journal of Chemical Ecology*, 24(12): 2167-2180.

- Hopke, J., Donath, J., Blechert, S. and Boland, W., 1994, Herbivore-induced volatiles - the emission of acyclic homoterpenes from leaves of *Phaseolus lunatus* and *Zea mays* can be triggered by a beta-glucosidase and jasmonic acid. *FEBS Letters*, 352(2): 146-150.
- Hu, J., Angeli, S., Schuetz, S., Luo, Y. and Hajek, A.E., 2009a, Ecology and management of exotic and endemic Asian longhorned beetle *Anoplophora glabripennis*. *Agricultural and Forest Entomology*, 11: 359–375.
- Hu, Z.H., Shen, Y.B., Shen, F.Y., Luo, Y.Q. and Su, X.H., 2009b, Evidence for the signaling role of methyl jasmonate, methyl salicylate and benzothiazole between poplar (*Populus simonii* x *P. pyramidalis* 'Opera 8277') cuttings. *Trees-Structure and Function*, 23(5): 1003-1011.
- Jerkovic, I. and Mastelic, J., 2003, Volatile compounds from leaf-buds of *Populus nigra* L. (Salicaceae). *Phytochemistry*, 63(1): 109-113.
- Johne, A.B., Weissbecker, B. and Schütz, S., 2006a, Microorganisms on *Aesculus hippocastanum*-olfactory perspective of *Cameraria ohridella* (Deschka&Dimic). *Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent.*, 15: 147-151.
- Johne, A.B., Weissbecker, B. and Schütz, S., 2006b, Volatile emissions from *Aesculus hippocastanum* induced by mining of larval stages of *Cameraria ohridella* influence oviposition by conspecific females. *Journal of Chemical Ecology*, 32(10): 2303-2319.
- Knudsen, J.T., Tollsten, L. and Bergstrom, L.G., 1993, Floral scents-a checklist of volatile compounds isolated by headspace techniques. *Phytochemistry*, 33(2): 253-280.
- Leder, B., 1993, Zur Geschichte einer Einbeziehung von Weichlaubhölzer in die waldbauliche Praxis. *Forst und Holz*, 48(12): 337-343.
- Lerdau, M. and Gray, D., 2003, Ecology and evolution of light-dependent and light-independent phytogenic volatile organic carbon. *New Phytologist*, 157(2): 199-211.
- Li, J.G., Jin, Y.J., Luo, Y.Q., Xu, Z.C. and Chen, H.J., 2003, Leaf volatiles from host tree *Acer negundo*: diurnal rhythm and behavior responses of *Anoplophora glabripennis* to volatiles in field. *Acta Botanica Sinica*, 45(2): 177-182.
- Loreto, F., Forster, A., Durr, M., Csiky, O. and Seufert, G., 1998, On the monoterpene emission under heat stress and on the increased thermotolerance of leaves of *Quercus ilex* L. fumigated with selected monoterpenes. *Plant Cell and Environment*, 21(1): 101-107.
- Loughrin, J.H., Potter, D.A., HamiltonKemp, T.R. and Byers, M.E., 1996, Volatile compounds from crabapple (*Malus* spp.) cultivars differing in susceptibility to the Japanese beetle (*Popillia japonica* Newman). *Journal of Chemical Ecology*, 22(7): 1295-1305.
- Markovic, I. and Norris, D.M., 1996, Volatiles involved in the nonhost rejection of *Fraxinus pennsylvanica* by *Lymantria dispar* larvae. *J. Agric. Food Chem.*, 44(3): 929-935.
- McCall, P.J., Turlings, T.C.J., Loughrin, J., Proveaux, A.T. and Tumlinson, J.H., 1994, Herbivore-induced volatile emissions from cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings. *Journal of Chemical Ecology*, 20(12): 3039-3050.
- Meineke, T., Brunken, G. and Menge, K., 1993, Landschaftsökologische Bestandsaufnahme Kerstlingeröder Feld. Gutachten für die Stadt Göttingen.
- Paczkowska, M. et al., 2006, Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand. *Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent.*, 13: 213-217.
- Pare, P.W. and Tumlinson, J.H., 1999, Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiology*, 121(2): 325-331.
- Ping, L.Y., Shen, Y.B., Jin, Y.J. and Hao, J.H., 2001, Leaf volatiles induced by mechanical damage from diverse taxonomic tree species. *Acta Botanica Sinica*, 43(3): 261-266.
- Renwick, J.A.A., 1989, Chemical ecology of oviposition in phytophagous insects. *Experientia*, 45(3): 223-228.

- Rudloff, E.V., 1972, Seasonal variation in composition of volatile oil of leaves, buds, and twigs of White spruce (*Picea glauca*). Canadian Journal of Botany, 50(7): 1595-1600.
- Ruther, J., 2000, Retention index database for identification of general green leaf volatiles in plants by coupled capillary gas chromatography-mass spectrometry. Journal of Chromatography A, 890(2): 313-319.
- Rutzen, H. and Földner, K., 2002, Die Lepidopterenfauna des ehemaligen Standortübungsplatzes "Kerstlingeröder Feld" im südlichen Niedersachsen. Entomologische Zeitschrift, 112(11): 341-348.
- Scheffer, F. and Schachtschabel, P., 2001, Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg-Berlin.
- Schipka, F., 2003, Wasserumsatz in Mitteldeutschland, Georg-August-Universität, Göttingen.
- Schütz, J.P. and Brang, P., 1995, L'horizontoscope : un étonnant outil pratique de sylviculture notamment en haute montagne. ONF Bull. Tech., 28: 1-9.
- Schütz, S., 2001, Der Einfluss verletzungsinduzierter Emissionen der Kartoffelpflanze (*S. tuberosum*) auf die geruchliche Wirtspflanzenfindung und -auswahl durch den Kartoffelkäfer (*L. decemlineata*). Justus Liebig Universität, Gießen.
- Schütz, S., Weissbecker, B., Klein, A. and Hummel, H.E., 1997, Host plant selection of the Colorado potato beetle as influenced by damage induced volatiles of the potato plant. Naturwissenschaften, 84(5): 212-217.
- Shulaev, V., Silverman, P. and Raskin, I., 1997, Airborne signalling by methyl salicylate in plant pathogen resistance. Nature, 385(6618): 718-721.
- Staudt, M., Bertin, N., Frenzel, B. and Seufert, G., 2000, Seasonal variation in amount and composition of monoterpenes emitted by young *Pinus pinea* trees - Implications for emission modeling. Journal of Atmospheric Chemistry, 35(1): 77-99.
- Tollsten, L. and Knudsen, J.T., 1992, Floral scent in dioecious *Salix* (Salicaceae) - a cue determining the pollination system. Plant Systematics and Evolution, 182(3-4): 229-237.
- Tollsten, L. and Muller, P.M., 1996, Volatile organic compounds emitted from beech leaves. Phytochemistry, 43(4): 759-762.
- Turlings, T.C.J., Tumlinson, J.H. and Lewis, W.J., 1990, Exploitation of herbivore-induced plant odors by host-seeking parasitic wasps. Science, 250(4985): 1251-1253.
- Visser, J.H., 1976, The design of a low-speed wind tunnel as an instrument for the study of olfactory orientation in the Colorado beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). Entomologia Experimentalis Et Applicata, 20: 275-288.
- Visser, J.H. and Ave, D.A., 1978, General green leaf volatiles in the olfactory orientation of the Colorado beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. Entomologia Experimentalis Et Applicata, 24(3): 738-749.
- Yokouchi, Y. and Ambe, Y., 1984, Factors affecting the emission of monoterpenes from red pine (*Pinus densiflora*). Plant Physiology, 75(4): 1009-1012.
- Zhang, Q.H. et al., 1999, Leaf volatiles from nonhost deciduous trees: Variation by tree species, season and temperature, and electrophysiological activity in *Ips typographus*. Journal of Chemical Ecology, 25(8): 1923-1943.

Kapitel IV:

Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand

Marta Paczkowska¹, Kai Földner¹, Sonja Weissteiner¹, R.S. Beniwal², Andrea Polle,²
Stefan Schütz¹

¹Institute for Forest Zoology and Forest Conservation,
Georg-August-University of Göttingen

²Institute for Forest Botany
Georg-August-University of Göttingen

Abstract:

“The role of the poplar’s volatiles for the butterflies of the forest margin”

Forest margins are environments very rich in species. The softwood communities found there are unique habitats for many butterflies. The studies conducted in the vicinity of Göttingen resulted in 83 Makrolepidoptera taxa found on willow (*Salix caprea*) and 65 on poplar (*Populus tremula*). Since different plants emit different volatiles, many insects are able to follow the odour plumes and find their hosts by perceiving various odours. The emission of volatiles can be influenced by different external factors, like surplus of salts, drought, mycorrhiza. A gas-chromatograph with mass-spectrometric and parallel electroantennographic detector (GC-MS/EAD) was employed to measure in what way the volatile pattern changed and which of the associated chemical substances could be detected by the insect antennae. The volatile pattern is very important for butterflies to find their habitat.

Key words: *Smerinthus ocellatus*, *Laothoe populi*, (Z)-3-hexen-1-yl-acetate, salt stress, drought stress, mycorrhiza, *Paxillus involutus*

M.Paczkowska, mpaczko@gwdg.de, Büsgenweg 3, 37077 Göttingen

Einleitung

Pappeln wie die Zitterpappel (*Populus tremula*) bilden am Waldrand wichtige Habitate für Nachtfalter. Der Pappelschwärmer (*Laothoe populi*) und das Abendpfauenauge (*Smerinthus ocellatus*) legen ihre Eier auf den Blättern ab. Als Nachtfalter sind sie auf andere Signale als die optischen angewiesen um den optimalen Ovipositionsplatz zu finden. Je nach Vitalität des Baumes und seiner Exposition sind die Entwicklungsbedingungen der Raupe verschieden. Diese Studie soll aufzeigen, welche Duftstoffe durch Änderungen der Vitalität des Baumes beeinflusst und welche durch die Nachtfalter wahrgenommen werden können.

Material und Methoden

Repräsentativen Blattproben von Zitterpappeln (*Populus tremula*) (20g) an Waldrandstandorten nahe Göttingen wurden in Glaskolben gesammelt. Pappelschösslinge im Gewächshaus (*Populus tremula* x *Populus alba* = *Populus x canescens*) wurden als Sproß (Höhe ca. 0,5 m) gemessen. Die Sammlung der Duftstoffe von Freiland-Pappeln sowie von Gewächshaus-Pappeln erfolgte bei 22°C und 50% Luftfeuchte mittels CLSA (Closed- Loop-Stripping-Analysis). Die axenischen Pappeln im Gewächshaus wurden zur Hälfte mit dem Mykorrhizapilz *Paxillus involutus* inokuliert und in einem zweifaktoriellen Blockdesign jeweils unter Salzstress (8 Pflanzen pro Variante) oder Trockenstress (4 Pflanzen pro Variante) gesetzt. Salzstress wurde erzeugt, indem die Pflanzen zweimal täglich mit 60 ml 100 mM NaCl gegossen wurden. Diese Behandlung dauerte 2 Wochen. Danach wurde die Konzentration auf 150 mM und die Häufigkeit auf

dreimal am Tag erhöht. Nach einer Woche dieser Behandlung wurden die Duftproben genommen und die Pflanzen geerntet. Die Pflanzen für das Trockenstressexperiment wurden 11 Tage vor der Duftprobennahme nicht bewässert. Die Duftprobennahmen dauerten je 2 Stunden. Die Duftstoffe wurden mittels des in SCHÜTZ ET AL., (1997) dargestellten Verfahrens gewonnen und mittels eines Gaschromatographen mit paralleler Detektion durch einen elektroantennographischen Detektor und durch ein Massenspektrometer (GC-EAD/MS) (WEIBBECKER ET AL., 2004) analysiert. Die elektrophysiologische Reaktion der Falterantenne auf die vom Gaschromatographen eluierenden Duftstoffe wurden so mittels eines elektroantennographischen Detektors (EAD) gemessen und die Empfindlichkeit der Insektenantenne für die mit Hilfe des Massenspektrometers identifizierten Substanzen ermittelt. Für diese Messungen wurden Antennen von jeweils 4 Weibchen des Abendpfaueauges (*Smerinthus ocellatus*) und des Pappelschwärmers (*Laothoe populi*) eingesetzt.

Ergebnisse

Die Experimente mit *Populus x canescens* zeigen einen starken Einfluss des Stresszustandes der Pflanze auf Quantität und Zusammensetzung der freigesetzten Duftstoffe. (Abb. 1 a-d; Abb. 3).

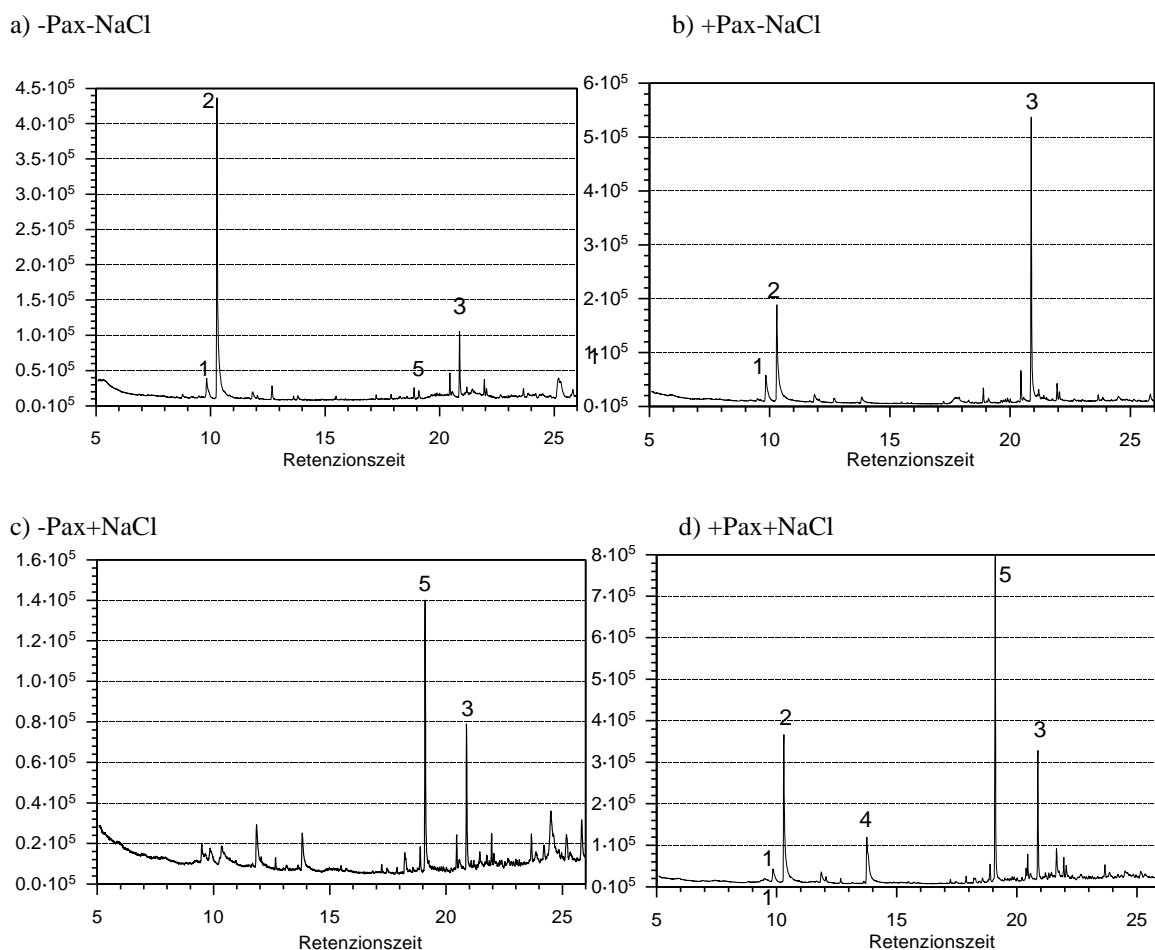


Abbildung 1: Ionenchromatogramme exemplarischer CLSA-Proben von *Populus x canescens* bei verschiedenen Behandlungsvarianten: a) mit Mykorrhiza, ohne Salzstress; b) ohne Mykorrhiza, ohne Salzstress; c) mit Mykorrhiza, mit Salzstress; d) ohne Mykorrhiza mit Salzstress. 1: (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat; 2: 2-Ethyl-Hexan-1-ol; 3: Dodecansäure-1-methylethyl ester; 4- Methylsalicylat; 5- . α - Farnesen

In der Abbildung 2 a,b sind die wichtigsten Stoffe, die in Abhängigkeit von der Inokulation mit dem Mykorrhizapilz *Paxillus involutus* und in Abhängigkeit von Salz- und Trockenstress vom Pappelspross freigesetzt wurden, gegenübergestellt. Einige Stoffe konnte man in jeder Behandlungsvariante feststellen und wurden deshalb in der Abbildung 2 nicht dargestellt. Es handelte sich vor allem um langkettige Kohlenwasserstoffe wie Pentadecan, Hexadecan, Heptadecan, Nonadecan. Diese Stoffe entstehen beim ständigen Aufbau der Kutikula

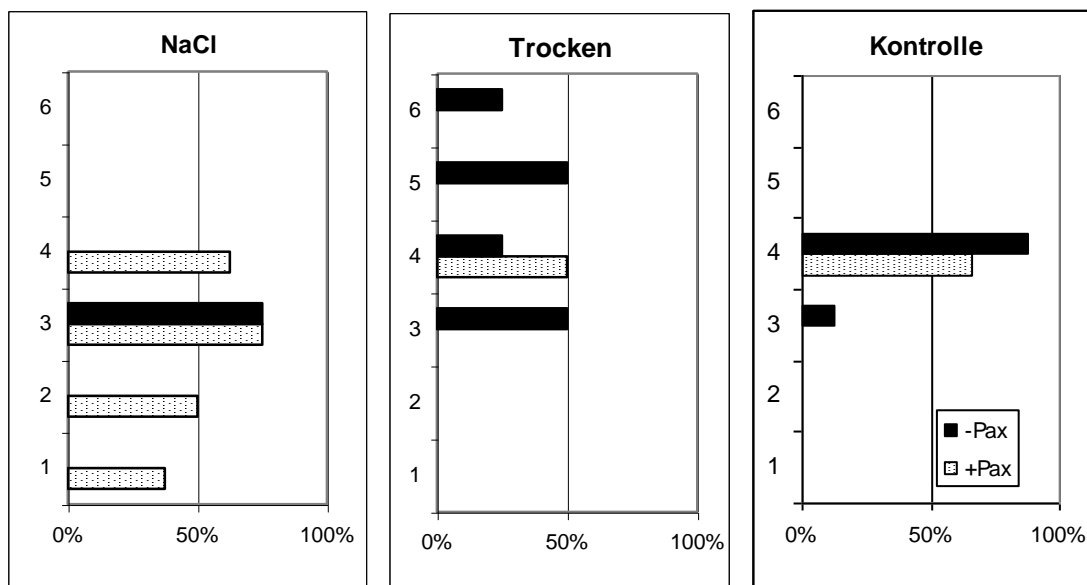


Abbildung 2 : Vorkommen von ausgewählten Duftstoffen im Salzstressversuch und im Trockenstressversuch im Vergleich zu den nichtgestressten Kontrollpflanzen. Die untere Prozentskala zeigt wie oft der Stoff in den einzelnen Proben vorkam (> 1% Gesamtpeakfläche, ohne Berücksichtigung der Menge).

1: 8,9-Dehydro-cycloisolongifolen, 2: Methyl Salicylat, 3: alpha Farnesen, 4: (Z) 3-Hexen 1-yl-acetat, 5: 2-Hexenal, 6: Hexanal

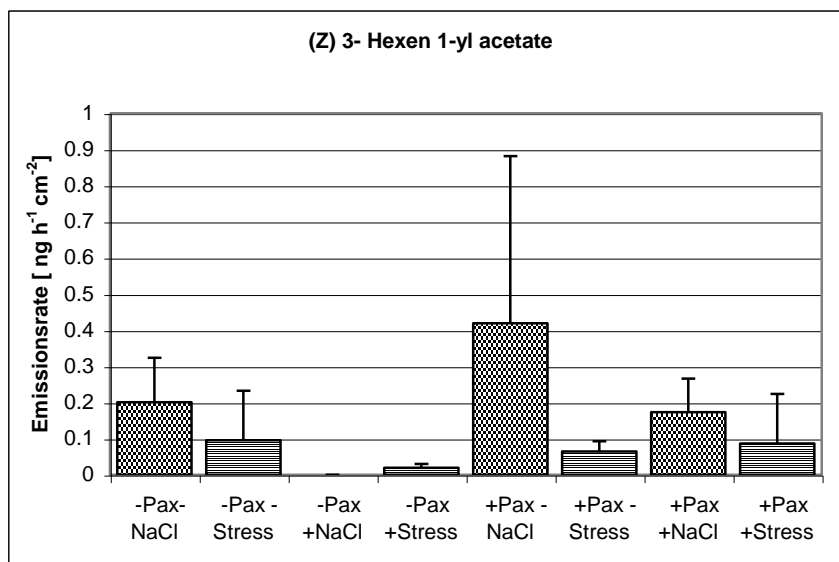


Abbildung 3: Einfluss der Parameter Mykorrhizierung durch *P. involutus* (Pax), Salzexposition (NaCl) und Trockenstress (Stress) auf die Emissionsraten von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat durch den Pappelspross (*Populus x canescens*) bezogen auf die Blattfläche.

In der Variante -Pax+NaCl und +Pax+NaCl sowie in der Variante -Pax+Stress war α -Farnesen als häufige Emission zu beobachten, die in anderen Varianten nicht auftrat. In der Variante +Pax+NaCl traten Methyl Salicylat und 8,9-Dehydro-Cycloisolongifolen als spezifische Emissionen auf. Hexanal und 2-Hexenal traten nur unter Trockenstress- Bedingungen ohne Mykorrhiza auf; dazu komplementär tritt das (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat auf (Abb. 3). Im Fall von Hexanal-Emission emittieren die gestressten Pflanzen nur wenig (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. Die Pappeln der Kontrollvariante (-Pax-NaCl; -Pax-Stress) setzen relativ große Mengen von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat frei. Eine ähnlich große Menge wird bei den mykorrhizierten Pflanzen freigesetzt, wenn sie unter Stress geraten. Die höchsten Werte sind bei den mykorrhizierten Pflanzen ohne Salzstress zu beobachten.

Die Antennen der beiden Nachtfalter reagieren, wie die meisten phytophagen Insekten, auch noch auf geringe Konzentrationen des allgemeinen Grünblattduftes (Z)-3-Hexen-1-ol. Deshalb wird dieser Stoff als Bezugspunkt zur Normierung quantitativer Reaktionen von Insektenantennen eingesetzt (Visser, 1979). Die Antennen des Abendpfaueauges und des Pappelschwärmers reagierten mit hohen Signalintensitäten bei geringen Duftstoffkonzentrationen von (Z)-3-Hexen-1-ol und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. Andere in den

Duftproben vorhandene Stoffe lösten entweder keine oder geringere Antennenreaktionen aus. Die Reaktionen auf (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat waren bei dem Abendpfauenaug um durchschnittlich 60% größer als die Reaktionen auf (Z)-3-Hexen-1-ol mit Berücksichtigung der Menge des Stoffes die diese Reaktion ausgelöst hat. Dagegen waren bei dem Pappelschwärmer die Reaktionen auf und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat im Schnitt um 20% geringer als auf (Z)-3-Hexen-1-ol. Die Unterschiede der Intensität der Antennenreaktion auf (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat zwischen den beiden Falterarten sind statistisch signifikant (t-Test: $P = 0,073$).

Diskussion

In der Variante -Pax+NaCl sowie in der Variante -Pax+Stress war α -Farnesen als dominierende Emission zu beobachten, die in anderen Varianten nicht auftrat. Diese Substanz ist in vielen Pflanzen durch Insektenbefall induzierbar (PARE & TUMLINSON 1997) und ist hier mit der Wasserunterversorgung der Pappelpflanze korreliert.

In der Variante +Pax+NaCl traten Methyl Salicylat und 8,9-Dehydro-Cycloisolongifolen als spezifische Emissionen auf. Methyl Salicylat wurde bei anderen Pflanzen mit der Abwehr von Pathogenen in Verbindung gebracht (HARBORNE 1995, SHULAEV ET AL., 1997). Möglicherweise sind die hier beobachteten Emissionen mit einer Verschiebung im Verhältnis von Mykorrhizapilz und Pappelpflanze unter den Bedingungen des Salzstresses verbunden, die eine erhöhte pflanzliche Abwehr gegen den Mykorrhizapilz notwendig macht.

Die Pappeln der Kontrollvariante (-Pax-NaCl; -Pax-Stress) setzen relativ große Mengen von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat frei. Eine ähnlich große Menge wird auch noch bei den mykorrhizierten Pflanzen freigesetzt, wenn sie unter Stress geraten. Nicht mykorrhizierte Pflanzen setzen jedoch bei Salz (-Pax, +NaCl) oder Trockenstress (-Pax, +Stress) deutlich weniger (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat frei. Dies kann darauf hinweisen, dass die Mykorrhiza den Stress oder die Stressreaktionen mindert. Die höchsten Werte sind bei den mykorrhizierten Pflanzen ohne Salzstress zu sehen. Das könnte ein Zeichen dafür sein, dass sie die besten physiologischen Bedingungen (Wasserversorgung etc.) haben.

(Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wird von den oligophagen Nachtfaltern an Pappel *Smerinthus ocellatus* und *Laothoe populi*, mittels ihrer Antennen olfaktorisch detektiert. Man beobachtet starke Antennenantworten sowohl bei (Z)-3-Hexen-1-ol als auch bei (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. Die beiden Substanzen gehören zu den sog. "green leaf odour" Volatilen, demnach können die Nachtfalter die Anwesenheit von grüner Blattmasse wahrnehmen. Diese Fähigkeit ist notwendig um dort Eier abzulegen. Offensichtlich sind sie auch in der Lage, den physiologischen Zustand (Wasserstress o.ä.) der Pflanze zu erkennen, indem sie (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wahrnehmen. Weiterhin wurde festgestellt, dass die beiden Arten nicht gleich empfindlich auf (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat reagieren. Wenn man die Intensität der Antennenantworten auf das Acetat mittels der Intensität der Antworten auf (Z)-3-Hexen-1-ol normiert, reagiert das Abendpfauenaug (*Smerinthus ocellatus*) stärker auf das Acetat als der Pappelschwärmer (*Laothoe populi*). Das Abendpfauenaug (*Smerinthus ocellatus*) ist eine wärmebedürftigere Art als der Pappelschwärmer (*Laothoe populi*). *S. ocellatus* bevorzugt Bäume mit sonniger Exposition (die öfter unter Wasserstress leiden), während der zweite Nachtfalter eher schattige bis halbschattige Expositionen für seine Eiablage wählt (FÜLDNER & DAMM 2002). So könnte die höhere Empfindlichkeit gegenüber (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat des Abendpfauenauges auf eine Anpassung an Pappelpflanzen zurückzuführen sein, die aufgrund ihrer exponierteren Standorte geringere Mengen dieses Stoffes freisetzen.

Die großen Antennen der Schwärmerarten, mit ihren zahlreichen Chemorezeptoren scheinen eine differenzierte Erfassung des physiologischen Zustands einer potentiellen Wirtspflanze zu erlauben. Steinbrecht et al. (1995) haben die Antennen der Nachtfalter (*Antheraea polyphenus*, *A. pernyi*, *Bombyx mori*) auf das Vorkommen von duftstoffbindenden Proteinen untersucht. Dabei stellten sie Unterschiede zwischen den Geschlechtern fest. Die Unterschiede haben sich vor allem in den langen *Sensilla trichodea* gezeigt. Bei den männlichen Tieren waren sie immer mit pheromonbindenden Proteinen (PBP) versehen, während sie bei den Weibchen von *Antheraea* Arten fehlten, oder, wie bei *Bombyx*, mit allgemein duftstoffbindenden Proteinen (GOBP) versehen waren. Dies weist darauf hin, dass die Weibchen die Pflanzenduftstoffe besser wahrnehmen können als die Männchen. Das ermöglicht ihnen eine effektive und erfolgreiche Suche und Auswahl des optimalen Eiablageplatzes. Dagegen sind die Männchen auf Grund der zahlreichen pheromonbindenden Proteine mehr auf die Partnersuche spezialisiert. Die Tatsache, dass für einige *Smerinthus* Arten Acetate und Aldehyde z.B.: (Z,E) Hexadecadien(10,12)al und (Z,E) Hexadecadien(10,12)yl acetat, als Pheromone bekannt sind (Reed, 1987), somit Aldehyde und Acetate starke Antennenreaktionen auslösen, analoge Alkohole keine so große Reaktion verursachen, könnte einen weiteren, physiologischen Grund für die besonders empfindliche Detektion von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat darstellen.

Literatur

- FÜLDNER, K., DAMM, M.,** (2002) Die Macrolepidopterenfauna der Zitterpappel (*Populus tremula* L.) in Waldrandgesellschaften in Südniedersachsen, Nachr. Ent. Ver. Apollo N.F. 23: 89-96.
- HARBORNE J.B.,** (1995) Ökologische Biochemie, 383 pp Spectrum Akad. Verl.
- PARE P.W., TUMLINSON J.H.,** (1997) Induced synthesis of plant volatiles, Nature 385:30-31
- REED, D.W., UNDERHILL, E.W., AND GIBLIN, E.M.,** (1987) Attraction of Sphingid Moths (Lepidoptera: Sphingidae) to 10,12-Hexadecadienyl aldehydes and acetates. Evidence of Pheromone Components, Journal of Chemical Ecology, Vol.13, No. 4: 931-942
- SCHÜTZ, S., WEIBBECKER, B., KLEIN, A., HUMMEL, H.E.,** (1997) Host Plant Selection of the Colorado Potato Beetle as Influenced by Damage Induced Volatiles of the Potato Plant, Naturwissenschaften 84:212-217.
- SHULAEV, V., SILVERMAN, P., AND RASKIN, I.,** (1997) Airborne signalling by methyl salicylate in plant pathogen resistance. Nature 385:718-72.
- STEINBRECHT, R.A., LAUE, M. AND ZIEGELBERGER, G.,** (1995) Immunolocalisation of pheromone-binding protein and general odorant binding protein in olfactory sensilla of the silk moth *Antheraea* and *Bombyx*, Cell & Tissue Res., 282:203-217.
- VISSER, J.H.** (1979) Electroantennogram responses of the Colorado beetle *Leptinotarsa decemlineata* to plant volatiles, Entomologia Experimentalis et Applicata 25:86-97.
- WEIBBECKER, B., HOLIGHAUS, G., SCHÜTZ, S.,** (2004) Gaschromatography with mass spectrometric and electroantennographic detection for the analysis of wood odorants by direct coupling of insect olfaction and mass spectrometry, Journal of Chromatography A, 1056:209-216.

Veröffentlicht in den Mitteilungen Deutsche Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie 2006

Paczkowska, M., Földner, K., Weissteiner, S., Beniwal, R.S., Polle, A., Schütz, S., 2006, Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand. Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent. 13, 213-217.

Kapitel V:

Der Große Gabelschwanz *Cerura vinula* L.- expositionsbedingte Larvalentwicklung und olfaktorische Habitatfindung.

Untersuchungen an Salweide (*Salix caprea* L.) und Zitterpappel (*Populus tremula* L.).

| | | |
|---------|--|-----|
| 1 | Einleitung..... | 92 |
| 2 | Material und Methoden..... | 93 |
| 2.1 | Bäume..... | 93 |
| 2.1.1 | Forschungsgebiet- Kerstlingeröder Feld | 93 |
| 2.1.1.1 | Die Lage..... | 93 |
| 2.1.1.2 | Geologie und Boden | 94 |
| 2.1.1.3 | Klima..... | 94 |
| 2.1.1.4 | Nutzungsgeschichte | 94 |
| 2.1.1.5 | Versuchsbäume | 95 |
| 2.1.2 | Versuchsaufbau im Gewächshaus | 96 |
| 2.1.3 | Duftprobennahme..... | 98 |
| 2.2 | Der Große Gabelschwanz..... | 99 |
| 2.2.1 | Biologie und Verbreitung..... | 99 |
| 2.2.2 | Erhaltungszucht..... | 102 |
| 2.2.3 | REM Aufnahmen | 103 |
| 2.3 | GC-MS/ EAD | 103 |
| 2.4 | EAG- Verdünnungsreihen, Dosis-Antwort-Kurven | 105 |
| 2.5 | Verhaltensversuche..... | 107 |
| 2.5.1 | Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung | 107 |
| 2.5.2 | Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung | 109 |
| 2.5.3 | Verhaltensversuch zur Fernbereichsorientierung..... | 109 |
| 2.6 | Fütterungsversuch..... | 109 |
| 2.7 | Ausbindeversuch | 111 |
| 3 | Ergebnisse..... | 112 |
| 3.1 | Versuchsbäume..... | 112 |
| 3.2 | REM Aufnahmen..... | 115 |
| 3.2.1 | Antennenmorphologie..... | 115 |
| 3.2.2 | Aufnahmen..... | 115 |
| 3.3 | GC-MS/EAD und EAG | 120 |
| 3.3.1 | GC-MS/EAD..... | 120 |
| 3.3.2 | EAG-Verdünnungsreihen | 124 |
| 3.4 | Verhaltensversuche..... | 126 |
| 3.4.1 | Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung | 126 |
| 3.4.2 | Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung | 128 |
| 3.4.3 | Verhaltensversuch zur Fernbereichsorientierung..... | 129 |
| 3.5 | Larvalentwicklung | 130 |
| 3.5.1 | Laborfütterungsversuch..... | 130 |
| 3.5.2 | Ausbindeversuch | 135 |
| 4 | Diskussion..... | 139 |
| 4.1 | REM Aufnahmen..... | 139 |

| | | |
|-----|----------------------------|-----|
| 4.2 | VOC Wahrnehmung | 141 |
| 4.3 | Verhaltensversuche..... | 145 |
| 4.4 | Larvalentwicklung | 148 |
| 5 | Zusammenfassung | 153 |
| | Literaturverzeichnis:..... | 154 |

1 Einleitung

Die meisten Insekten sind mono- oder oligophag und können sich nur an wenigen Wirtspflanzen entwickeln (Bernays und Chapman, 1994). Solchermaßen spezialisierte Insekten müssen in der Lage sein in ihrer komplexen Umwelt die passenden Nahrungspflanzen zu finden. Dazu dienen sowohl optische als auch olfaktorische, mechanische und chemische Signale. Oft sind am Orientierungsprozess mehrere Sinne beteiligt (Renwick, 1989). Der Gabelschwanz ist eine der vielen Schmetterlingsarten, die an den Weichholzbaumarten (Salweide *Salix caprea* und Zitterpappel *Populus tremula*) vorkommen. Diese Baumarten wurden jahrelang im Betriebswald wie Unkraut behandelt und vor allem an Waldrändern gezielt zurück geschnitten (Leder, 1993). Dadurch sind wichtige Habitate für den Gabelschwanz und viele andere Insektenarten zerstört worden. Seit Ende des 20. Jahrhunderts wurde die ökologische Sonderstellung von Waldrändern erkannt und ihr besonderer naturschutzfachlicher Wert anerkannt (Schretzenmayr et al., 1974; Henkel, 1975). Man hat aber auch festgestellt, dass nicht jeder Waldrand dem anderen gleich ist, denn ob sonnig oder schattig-, nord- oder süd- exponiert, verändern sich die mikroklimatischen Bedingungen. Dementsprechend sind auch die Duftmuster von Salweiden und Zitterpappeln in unterschiedlichen Expositionen sehr divers. In mehreren Duftmessreihen wurden über 200 Duftstoffe nachgewiesen. Einige kamen vereinzelt vor oder konnten nicht sicher identifiziert werden. Jedoch fast die Hälfte davon war in mehr als 40% der Proben anwesend. Die Duftstoffemissionen waren nicht nur von der Saison (Frühjahr, Hochsommer, Spätsommer) sondern auch von der Tageszeit und der Exposition der Bäume abhängig.

Freilandhebungen an Waldmantelgesellschaften von 1997 bis 2002 ergaben umfangreiche Hinweise auf die Einnischung verschiedener Macrolepidopteren in Abhängigkeit von Strukturparametern wie Sonnenexposition, Größe und sozialer Stellung der Weichhölzer (Damm, 2003). Um die beobachteten Habitatpräferenzen zu verstehen und die Rolle des Insektengeruchssinns bei dieser Präferenz zu klären ist die experimentelle Untersuchung einer möglichen Kausalkette von Strukturparametern, resultierender abiotischer und biotischer Stressoren für die Wirtspflanzen, der entsprechend veränderten volatilen Emissionen der

Pflanzen, der Wahrnehmung durch die Insekten sowie der Verhaltensantwort durch die Insekten, nötig. Darüber hinaus bleibt der Einfluss der Habitats- und Ovipositionspräferenzen auf die Fitness der Folgegeneration zu untersuchen. Die Auswahl eines optimalen Eiablageplatzes ist entscheidend für das Überleben der Nachkommen und damit für das Überleben der Art. Selbst bei einer großen Anzahl abgelegter Eier (beim Gabelschwanz *Cerura vinula* bis zu 250) ist es kein Zufall wo die Eier abgelegt werden. Wenn man die Evolution der Wirtswahl bei phytophagen Insekten betrachtet wird angenommen, dass eine positive Beziehung zwischen der Präferenz einen Wirt mit Eiern zu belegen und dem Entwicklungserfolg der Nachkommen auf diesem Wirt besteht (Mayhew, 1997). Die Ressourcen mit hoher Qualität für die Larven sollen von den Insektenweibchen bevorzugt zur Eiablage genutzt werden (Godfray, 1987). Es wurde nachgewiesen, dass die Qualität der Brutressourcen eine sehr hohe Variabilität zeigt (Bernays und Chapman, 1994) und die Weibchen für eine optimale Anpassung eine hohe Flexibilität im Verhalten zeigen müssen. Die kleinen Raupen sind zwar mobil, aber nur wenige würden den mehrere Meter weiten Weg bis zum nächsten Baum überleben. Deswegen sind sie auf die Wahl der „Mutter“ angewiesen.

In dieser Arbeit wird versucht den Mechanismus, der dem Falter einen Hinweis auf seinen optimalen Eiablageplatz gibt, zu erforschen. Dabei stellen sich die ersten Fragen: Wo liegt das Optimum? Welche mikroklimatischen Bedingungen sind für die ausgewählte Art optimal? Woran erkennt das Tier, dass hier das Optimum für seine Nachkommen ist? Welche Sinne spielen dabei die führende Rolle? Ist die Habitatwahl rein zufällig? Ist die Orientierung beider Geschlechter gleich oder stecken verschiedene Mechanismen dahinter?

2 Material und Methoden

2.1 Bäume

2.1.1 Forschungsgebiet- Kerstlingeröder Feld

2.1.1.1 Die Lage

Alle Freilandversuche wurden auf dem Kerstlingeröder Feld in der Nähe von Göttingen (Süd-niedersachsen) durchgeführt. Diese 196ha große Fläche ist ein Teil des Naturschutzgebietes Nr. 138 „Stadtwald Göttingen und Kerstlingeröder Feld“ und gleichzeitig Teil des Fauna- Flora- Habitat (FFH-) Gebietes „Göttinger Wald“. Somit ist es ein Bestandteil des europäischen Schutzgebietsystems Natura 2000 (NLWKN). Rund 1,5km östlich der Stadt

Göttingen, mit einer maximalen Nord-Süd Ausdehnung von 1500m und einer Ost-Westausdehnung von bis zu 1300m, liegt das Kerstlingeröder Feld als Offenlandbereich inmitten des Göttinger Waldes. Der in der Nordhälfte gelegene Sauberg bildet den höchsten Punkt des auf 320 bis 390m ü. NN gelegenen Gebietes (Meineke et al., 1993). Rund 83ha der Fläche ist von Wald bedeckt, 56ha sind landwirtschaftliche Streuobstwiesen und 58ha sind Sukzessionsflächen, das heißt Übergangsformen zwischen offener Landschaft und Wald. Die so genannte „Zickenpumpe“ ist das einzige Gewässer bzw. Feuchtbiotop, das jedoch phasenweise trocken fällt.

2.1.1.2 Geologie und Boden

Ausgangsgestein des Kerstlingeröder Feldes ist der Mittlere Muschelkalk. Der Sauberg befindet sich mit seinen Trochitenkalkschichten auf Oberem Muschelkalk. Auf den Bereichen des Mittleren Muschelkalkes bildeten sich Braunerde- Bodentypen (Rendzina, Pararendzina) aus (Meineke et al., 1993). Alle Versuchsbäume bis auf 2 Zitterpappeln (Nr. 31 und 32) befinden sich auf geringmächtiger Rendzina. Die Bäume 31 und 32 befinden sich auf Pararendzina sehr nah am Übergang von diesen beiden Bodentypen. Rendzinen weisen zwar mit Mull eine fruchtbare Humusform auf, jedoch sind diese Bodentypen auf festem Carbonatgestein häufig von Flachgründigkeit und insbesondere an Südhängen von Trockenheit betroffen (Scheffer and Schachtschabel, 2001).

2.1.1.3 Klima

Das Gebiet befindet sich im Übergangsbereich von einem subozeanischen zu einem subkontinental geprägten kühl- gemäßigten Klima in submontaner Lage und ist kühler und niederschlagsreicher als die Göttinger Ebene. Mit ca. 710mm ist der Niederschlag um ca. 60mm höher als im nahe gelegenen Göttingen. Während der Vegetationsperiode fallen 50% des Jahresniederschlages, wobei das Maximum im Juni liegt. Bei einer Jahrestemperatur von 7,5°C ist das Habitat rund 1,2°C kühler als Göttingen (Schipka, 2003).

2.1.1.4 Nutzungsgeschichte

Etwa 60 Jahre lang (bis 1992) fand das Kerstlingeröder Feld als Truppenübungsplatz zunächst für die Reichswehr, die Britische Rheinarmee und schließlich für die Bundeswehr Verwendung. In der Zeit ist ein sehr dichtes Wegenetz (15km) mit breit angelegten Schotterstraßen und Betonplatten an den Kreuzungspunkten entstanden (Rutzen and Földner, 2002). Dieses dichte Wegenetz bot eine große Auswahl an unterschiedlich exponierten

Waldrändern mit Weichholzarten. Aus diesem Grund war das Kerstlingeröder Feld ein geeignetes Forschungsgebiet. Im Jahr 2001 hat die Stadt Göttingen das Gebiet gekauft und unter die Kontrolle des Stadtforstamtes Göttingen gestellt. 2007 wurde das Kerstlingeröder Feld zusammen mit dem Göttinger Wald zum Naturschutzgebiet (FFH) ausgewiesen.

2.1.1.5 Versuchsbäume

Auf dem Kerstlingeröder Feld wurden 32 Versuchsbäume in Wuchshöhen von 1,5m bis 2,5m ausgewählt. Die 16 Salweiden und 16 Zitterpappeln standen in sonniger oder schattiger Exposition am Waldrand. Als sonnig wurden die Standorte eingestuft, bei denen innerhalb der Vegetationsperiode (April bis Oktober) die mittlere potentielle Sonnenscheindauer pro Tag, gemessen mit dem Horizontoskop (Schütz and Brang, 1995), (s. Abbildung 2.1) mindestens sechs Stunden betrug. Als schattig exponiert galten die Standorte, die während der Vegetationsperiode unter 4 Stunden potentieller Sonnenscheindauer am Tag erhielten. Das Luftbild zeigt das dichte Wegenetz und die Standorte der Versuchsbäume (Abbildung 2.2).



Abbildung 2.1. Horizontoskop der für die Bestimmung der potenziellen Sonnenscheindauer benutzt wurde. Photoquelle: http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/wsl_horizontoskop_DE

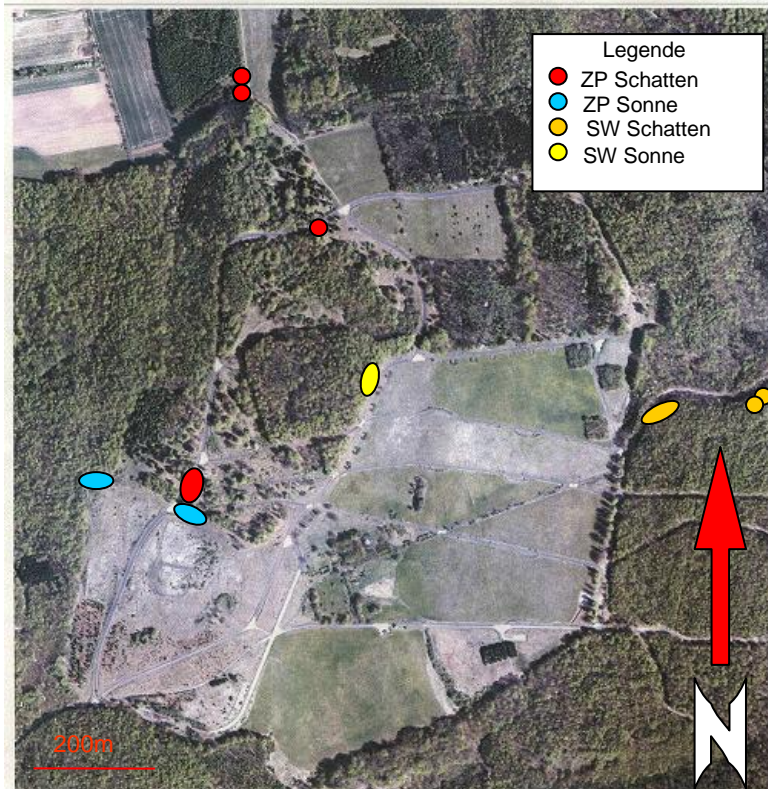


Abbildung 2.2. Luftbild vom Kerstlingeröder Feld mit markierten Versuchsbäumen. ZP-Zitterpappel, SW-Salweide

2.1.2 Versuchsaufbau im Gewächshaus

20 Zitterpappeln und 20 Salweiden wurden in eine Gewächshauskammer gestellt. Die Zitterpappeln waren Vollgeschwister und stammen aus einer gezielten Kreuzung von Zitterpappel (*Populus tremula*) Geismar 7 ♀ und Geismar 5 ♂ aus dem Institut für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung der Universität Göttingen. Die Salweiden waren wild angeflogene Sämlinge aus der Versuchsfläche am Büsgeninstitut der Georg-August-Universität Göttingen, Büsgenweg 2. Bei den ersten Aufnahmen waren die Salweiden 40-50cm hoch. Alle Pappeln waren bei den ersten Aufnahmen 7 Jahre alt und 150-200cm hoch. Die Blattmassen der Zitterpappeln und der Salweiden waren trotz der Größenunterschiede vergleichbar. Die Pflanzen standen in 12-Liter Kunststofföpfen mit Frühstorfer Erde, Typ T25, Archut. Die Anordnung der Bäume im Gewächshaus zeigt Abbildung 2.3. Alle Bäume wurden in Abständen von drei Tagen mit je zwei Litern pro Pflanze gegossen. Vor dem Einbringen in das Gewächshaus wurden alle Pflanzen mit dem systemischen Insektizid Confidor WG70 0,035% und teilsystemischen Fungizid Flint 0,02% behandelt. Die Gewächshauskammer wurde mit 1% Vircon S desinfiziert. Die Bäume wurden Anfang März ins Gewächshaus gestellt. Bis Mai wurden sie weder umgestellt noch beprobt, damit sie sich an die neuen Bedingungen gewöhnen und mögliche Nebenwirkungen der Pestizide

ausklingen konnten. In der Kammer wurden künstlich die Lichtbedingungen Sonne und Schatten simuliert. Die Sonnen-Pflanzen standen etwa 1m vom Fenster entfernt und wurden zusätzlich mit vier Lampen Fa. Philips IP65 mit Weißlichtglühbirnen Master HPI-T Plus 400 Watt, 230V beleuchtet. Die Schatten-Pflanzen standen etwa 6m vom Fenster entfernt und waren durch die Schattierung sowie durch die Wände des Gewächshauses beschattet. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 2.3. Die Helligkeit wurde mit dem Luxmeter gemessen und betrug auf der Sonnenseite 7000-10000Lux und auf der Schattenseite 100-150Lux.

Die Temperatur betrug zwischen 15°C nachts bis 30°C tagsüber (der Alarmwert von 35°C wurde nie überschritten). Die Luftfeuchte betrug zwischen 30% RH und 60% RH bei Alarmwerten von min 23% RH und max 80% RH.

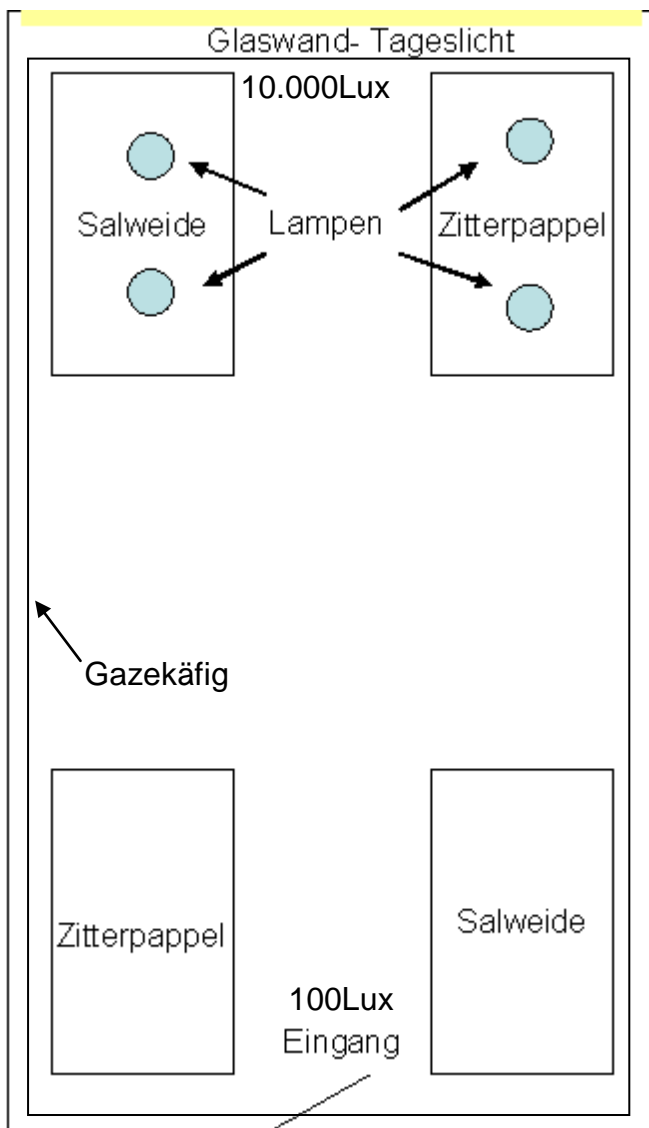


Abbildung 2.3. Die Anordnung der Versuchsbäume im Gewächshaus.

2.1.3 Duftprobennahme

Die Duftproben sind auf dem Kerstlingeröder Feld (Freiland) und im Gewächshaus mit dem Closed-Loop-Stripping-Analysis-System (CLSA) (Boland et al., 1984) in CLSA Röhren (1,5mg Aktivkohle, CLSA-Filter, Fa. Daumazan sur Arize, Frankreich) mit einem 6V Akku und Bratschläuchen (Confresco Frischhalteprodukte, Minden, Deutschland) genommen worden (Abbildung 2.4). Bratschläuche waren für die Probennahme sehr gut geeignet, weil sie keine Weichmacher ausdünsten, duftneutral, gut abdichtbar und hitzebeständig sind. Außerdem sind sie kostengünstig und können als Einwegmaterial benutzt werden. Bei der Duftprobennahme wurden vorher ausgeheizte (20Min bei 80°C) 40cm lange Bratschläuche mit einem Umfang von 60cm über die Zweige der ausgewählten Bäume gestülpt und abgedichtet. Die Pumpen (Fa. Fürgut, Tannheim) wurden von Akkus (6V) mit Strom versorgt und saugten über zwei Stunden die Luft aus dem Bratschlauch mit einer durchschnittlichen Saugleistung von 36l/h. Abweichend vom klassischem CLSA System wurde die Luft aus der Pumpe nach außen geblasen, um die Kontaminationen der Probe mit den Duftstoffen aus dem Pumpenmechanismus zu vermeiden.

Bei diesem Vorgehen dringen geringe Mengen der Umgebungsluft in den Bratschlauch ein. Deshalb wurde ein Molekularsieb (0,4nm Fa. Merk) als Filter für die eindringende Luft eingeführt.



Abbildung 2.4. Duftprobennahme an einer Salweide im Freiland.

Die Duftprobenahmen erfolgten zur Hauptflugzeit der Falter zwischen 19.00 und 21.00 Uhr. Die CLSA-Röhrchen wurden anschließend im Labor mit 75µl der Mischung *MeOH* und *CH₂Cl₂* im Verhältnis 1:2 eluiert (beides Suprasolv-Qualität, Fa. Merck/VWR, Darmstadt) wobei sich die Duftkomponenten im Eluat lösten. Danach wurde die Lösung in Spitzbodengläschen abgefüllt und bis zur Analyse bei -80°C tief gefroren.

2.2 Der Große Gabelschwanz

2.2.1 Biologie und Verbreitung

Der Große Gabelschwanz *Cerura vinula* Linnaeus, 1758 (Lepidoptera, Notodontidae-Zahnspinner) ist eine vor allem durch seine Raupe bekannt gewordene Art. Dank ihrer Farben und auffallenden Drohhaltung gehört sie zu den schönsten Raupen Europas. (Abbildung 2.5) (Sauer, 1992).



Abbildung 2.5. Ausgewachsene Gabelschwanzraupe (L5) in Drohstellung

Die Falter fliegen von April bis August und sind dämmerungsaktiv. Tagsüber ruhen sie mit vorgestreckten Vorderbeinen an Pfosten und Wänden (früher mit Vorliebe an Telegraphenstangen) und sind völlig unempfindlich gegen Störungen s. Abbildung 2.6 (Ebert et al., 1994). In älteren Werken findet man diese Art auch unter den Namen *Harpyja vinula* L. und *Dicranura vinula* L.



Abbildung 2.6. Das Gabelschwanz Weibchen ist relativ träge und lässt sich am Tage nicht stören.

Der Große Gabelschwanz ist in ganz Europa von Südfrankreich (Pyrenäen) bis nach Sibirien (Baikalsee) und auch auf den Britischen Inseln verbreitet. Die südliche Verbreitungsgrenze zieht sich durch den gesamten nördlichen Mittelmeerraum bis in die Türkei und zum Kaukasus. Die nördlichsten Standorte findet man bis über den Polarkreis hinaus (Ebert et al., 1994).

Die Raupen ernähren sich überwiegend von vielen Weiden- und Pappelarten (bevorzugt Salweiden und Zitterpappeln), insbesondere von deren Jungwuchs an sonnenexponierten Standorten (Ebert et al., 1994). In der Literatur wurden folgende Futterpflanzen genannt: *Populus tremula*, *P. alba*, *P. nigra*, *P. nigra* ssp. *pyramidalis*, *P. x canadensis*, *Populus* sp., *Salix fragilis*, *S. purpurea*, *S. aurita*, *S. caprea*; *S. appendiculata*, *Salix* sp.; (Ebert et al., 1994) und auch *Fraxinus* sp.; *Betula* sp. (Freina and Witt, 1987). Die Eiablage wurde auch an Kastanien (*Aesculus* sp.) und Obstgehölzen beobachtet (Schwenke, 1978). Die Eier sind halbkugelig, 1,5-2mm groß, meistens schokoladenbraun oder hellbeige. Sie werden meistens paarweise auf der Blattoberfläche festgeklebt.



Abbildung 2.7. Gabelschwanzeier auf einem Salweidenblatt (*Salix caprea*) im Gewächshaus.

Im Freiland findet man selten mehr als 2-6 Eier pro Pflanze (Abbildung 2.7). Ein Weibchen kann bis zu 250 Eier ablegen, wobei die maximale Eiermenge pro Nacht 40 Stück beträgt. Die meisten Eier werden etw. 4-6 Tage nach dem Schlupf abgelegt. Imagines leben 4-13 Tage (Templin, 1955) und nehmen keine Nahrung auf. Aufgrund der regelmäßigen Beseitigung von Weichhölzern an Waldrändern in den 90er Jahren wurde die Art stark zurückgedrängt. Als Kulturfolger fanden die Falter jedoch im Siedlungsraum, auf Sukzessionsflächen und in Kiesgruben neue Habitate (Ebert et al., 1994).

Die Larvalentwicklung umfasst fünf Larvalstadien. Die Entwicklungsdauer ist temperaturabhängig. Bei zu niedrigen ($<18^{\circ}\text{C}$) oder zu hohen ($>30^{\circ}\text{C}$) Temperaturen können sogar Häutungsstörungen auftreten (Hintze-Podufal., 1970; Hintze, 1970). Das letzte Larvalstadium (L5) dauert länger als L1 bis L4 zusammen. Die Färbung der Raupe verändert sich stark mit den Häutungen von tief schwarz bis hellgrün mit schwarzen Flecken (Hintze, 1970). Kurz vor der Verpuppung erfolgt eine hormonell bedingte Verfärbung in violett bis dunkel rot (Buckmann, 1959). Die Raupe verpuppt sich und überwintert in einem harten Holzkokon (Abbildung 2.8). Nach dem Schlupf nutzen die Falter ein Oralsekret um im Holzkokon einen Schlüpfloch zu lösen. Alle Präimaginalstadien wurden schon in den fünfziger Jahren detailliert beschrieben (Templin, 1955).



Abbildung 2.8. Geöffneter Holzkokon des Gabelschwanzes, Puppe und Hautrest der letzten Häutung.

2.2.2 Erhaltungszucht

Die Insekten wurden jedes Jahr (2004-2008) im Puppenstadium oder im Eistadium von verschiedenen Züchtern erworben. Nach dem Schlupf wurden die Falter in Drahtnetz Käfigen gehalten. Imagines aus verschiedenen Herkünften (Baden-Württemberg, Schweiz, Polen) wurden in der Zucht gekreuzt um Inzuchteffekte zu vermeiden. Die Züchter haben einen Freilandanflug für den besseren genetischen Austausch verwendet. Die Raupen wurden in Zuchtzylindern aus Plexiglas gehalten und mit frischen Blättern der Zitterpappel (*Populus tremula* L.) oder der Salweide (*Salix caprea* L.) gefüttert (Abbildung 2.9).



Abbildung 2.9. Zuchtzylinder aus Plexiglas für die Erhaltungszucht der Raupen

Die Temperatur während der Larvalstadien betrug 20°C bis 30°C , es herrschten Langtagsbedingungen (16 Stunden hell/8 Stunden dunkel). Am Ende der Larvalentwicklung wurden den Raupen kleine Holzstücke als Substrat für den Kokon angeboten. Die Kokons überwinterten ab Oktober im dunklen Kühlraum bei 6°C . Einmal im Monat wurden die Kokons mit Wasser besprüht. Im April (der genaue Termin richtete sich nach dem Vegetationsfortschritt im Freiland) endete die Überwinterungszeit und die Falter konnten bei Zimmertemperatur (ca. $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) schlüpfen. Für die genaue Altersbestimmung wurden die Imagines direkt nach dem Schlupf markiert.

2.2.3 REM Aufnahmen

Die Antennen wurden vom Kopf getrennt und in 50%ige Ethanol-Lösung gegeben. Für die Entwässerung wurde eine aufsteigende Ethanolreihe verwendet. Dem folgte die Trocknung der Objekte am kritischen Punkt (Balzers BalTec CPD 30). Die getrockneten Objekte wurden zum Schluss mit Gold besputtert (Balzers BalTec SCD 050). In Kooperation mit der Fakultät für Physik (Georg-August-Universität Göttingen) konnte das Rasterelektronenmikroskop LEO Supra 35 von der Firma Zeiss NTS genutzt werden.

2.3 GC-MS/ EAD

3 Die Duftstoffgemische der Versuchsbäume wurden mit einem Gaschromatographen (6890N, Agilent Technologies, Santa Clara) auf der polaren Säule INNOWAX (Agilent Technologies 30m x 0,25mm ID und 0,25 μm Filmdicke) in ihre Einzelkomponenten

aufgetrennt. Zur Identifizierung der Substanzen kam ein gekoppeltes Quadrupol-Massenspektrometer (5973, Agilent Technologies) zum Einsatz. Es wurde 1 µl des CLSA-Eluat in den Split/Splitlos-Injektor, der bei 250 °C im Splitlosmodus betrieben wurde, injiziert und mittels des Temperaturprogramms Start: 50 °C, Haltezeit 1,5 Min, Rampe 7,5 °C/Min, Endtemperatur 250 °C, Haltezeit: 5 Min, getrennt. Die gesamte Messdauer betrug 33,17 Min. Die getrennten Duftstoffe wandern mit dem Trägergas Helium (Reinheit: 99,999%) über die Säule bis zum Split (Graphpack 3D/2, Gerstel, Mühleim, Germany; 50:50), der sie zum Massenspektrometer und zu der Insektenantenne führt (Abbildung 2.10). Die Flussrate betrug 1,0 l/min und die Temperatur der Transferline betrug 230 °C. Mit der NIST Datenbank (National Institut for Standards & Technologies, 2003) im Programm Enhanced ChemStation version D.02.00.275 (Agilent Technologies) wurde der Vergleich der gemessenen Massenspektren zur Identifizierung der Substanzen durchgeführt. Die Richtigkeit der Identifizierungen wurde durch die Messung von authentischen Standards bestätigt. Die Standards wurden in der Konzentration 10^{-4} g/g im gleichen Lösungsmittelgemisch verdünnt, das zur Eluierung der Duftstoffe aus den CLSA-Röhrchen diente. Die Verdünnungen wurden in 2 Arbeitsschritten angefertigt. Zuerst wurden 1,98 g Lösungsmittel (MeOH /CH₂Cl₂) mit 0,02 g Reinsubstanz (meistens 99,9% Reinheit) gemischt und 2 Min lang vor dem nächstem Arbeitsschritt gemixt (Vortex). 0,02 g der so entstandenen Lösung in der Konzentration 10^{-2} g/g wurden in ein weiteres Probenglas mit 1,98 g Lösungsmittel pipettiert und erneut gemixt. Auf diesem Weg entstand die Lösung in der Konzentration 10^{-4} g/g.

Die Kopplung zur elektroantennographischen Detektion (EAD) erfolgte über ein modifiziertes ODP-2 Interface (Olfactory-Detector-Port, Fa. Gerstel, Mülheim, Deutschland). Die abgeschnittenen Antennen wurden in einer modifizierten EAG-Halterung (Sauer et al., 1992) über einer Elektrolytlösung (Kaissling und Thorson, 1980) mit Ag/AgCl-Elektroden verbunden, um ihre elektrophysiologischen Reaktionen auf die chemischen Einzelsubstanzen zu messen (GC-EAD). Um eine gute Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen wurde immer die 5 mm lange Spitze der Antenne eingesetzt. Das bedeutet, dass der für die Duftstoffe exponierte Bereich der Antenne zwischen 1 mm und 3 mm von der Spitze lag. Die Verstärkung (Faktor 100) der abgeleiteten Potenziale erfolgte mit einem speziellen EAG-Verstärker (Prof. Koch, Kaiserslautern, Deutschland). Die Signale wurden über einen A/D-Wandler 35900E der ChemStation-Software (beides Fa. Agilent, Santa Clara, USA) zugeführt und aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Peaks sind als Antwort einer Insektenantenne auf einen Duftpuls zu verstehen. Die verwendete parallele Detektion durch ein gekoppeltes GC/MS-

EAD System (Weissbecker et al., 2004) ermöglichte einerseits die quantitative Erfassung und Identifizierung sämtlicher flüchtiger organischer Verbindungen (VOC-volatile organic compound) und andererseits die Zuordnung der Antennenreaktionen zu bestimmten Substanzen. Vor jeder Messreihe, die aus acht Duftproben bestand, wurden die Antennen auf ihre Fitness getestet, indem 5ml Luft mit (Z)-3-Hexen-1-ol in Paraffinöl auf einem Filterpapier in einer Konzentration von 10^{-3} und 5ml Luft mit reinem Paraffinöl auf einem Filterpapier auf die Antenne gespritzt wurden. Als geeignet wurden Antennen ausgewählt, die beim Duftstimulus (positive Kontrolle) mindestens zweifach höhere Ausschläge als bei der negativen Kontrolle (Filterpapier mit Paraffinöl) zeigten. Innerhalb von zwei Vegetationsperioden (2007 und 2008) wurden an elf Weibchen 98 Messungen und an zwei Männchen 32 Messungen durchgeführt. Die Fragestellung betraf das Eiablageverhalten, deswegen lag der Schwerpunkt auf den weiblichen Tieren. Die Duftproben stammten von den Bäumen im Gewächshaus und im Freiland. Es wurden Duftspektren von Salweide-Sonne, Salweide-Schatten, Zitterpappel-Sonne und Zitterpappel-Schatten gemessen.

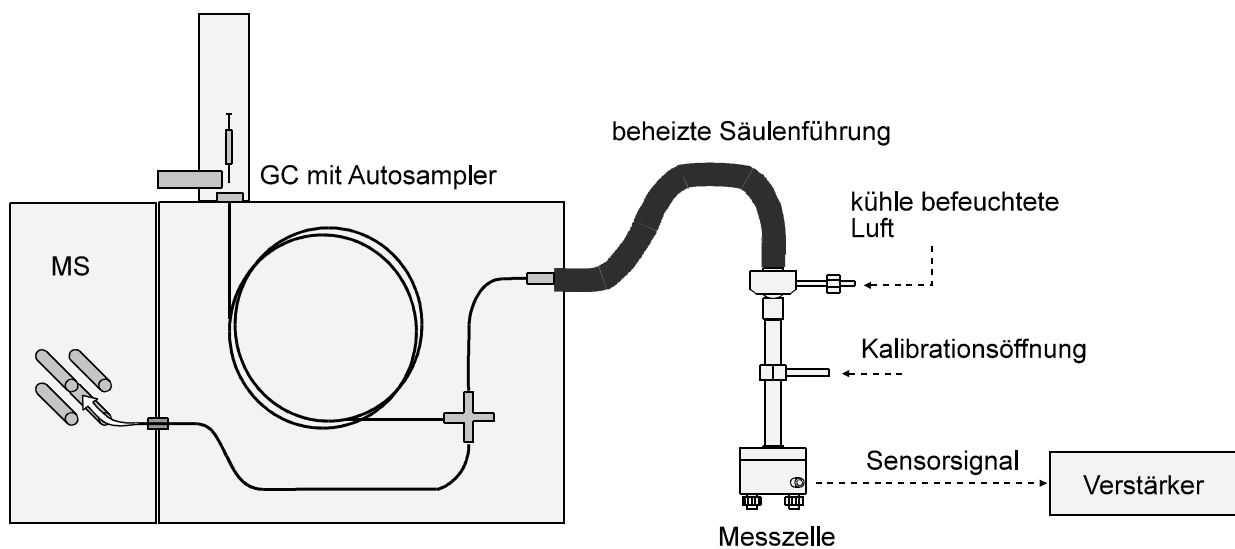


Abbildung 2.10. Schematische Darstellung des Gaschromatographen mit paralleler massenspektrometrischer und elektroantennographischer Detektion.

3.1 EAG- Verdünnungsreihen, Dosis-Antwort-Kurven

Im Jahr 2008 und 2009 wurden die Antennenreaktionen auf einzelne Stoffe in definierten Konzentrationen getestet. Als Auswahlkriterium dienten hier die EAD-Messungen aus den Vegetationsperioden 2007 und 2008. An 11 Weibchen wurden 15 Stoffe in den verschiedenen Konzentrationen getestet. Die Duftstoffe wurden in Paraffinöl (Uvasol quality, Merck/VWR) gelöst. Ein 50 μ l-Tropfen der Paraffinlösung wurde auf etwa 2cm² Filterpapier (Schleicher & Schuell, Dassel, Germany) gegeben und in die 10ml Glasspritze (Poulten & Graf GmbH,

Wertheim, Germany) gelegt. Die sechs Verdünnungstufen wurden von der niedrigsten 10^{-7} g/g bis zu höchsten 10^{-2} g/g nacheinander getestet. Zwischen den einzelnen Duftimpulsen wurde solange gewartet bis die Antenne zum Ruhezustand zurückkehrte. Diese Zeit variierte zwischen 10- 30s. Bei jedem Experiment wurde am Anfang und am Ende die Reaktion der Antenne auf (Z)-3-Hexen-1-ol in der Konzentration 10^{-3} g/g als sog. positive Kontrolle gemessen (Weissbecker et al., 1997; Park et al., 2001; Zhao and Kang, 2002). Als negative Kontrolle (NK) diente ein Filterpapier mit reinem Paraffinöl. Jedes Mal wurde auf die Antenne 5ml Luft gegeben. Die negative Kontrolle wurde ebenfalls vor und nach jedem Experiment durchgeführt. Alle Reaktionen wurden als Prozentanteil der positiven Kontrolle dargestellt und auf Signifikanz gegen die negative Kontrolle geprüft, die ebenfalls als Prozentanteil der positiven Kontrolle dargestellt wurde. Dank dieses Verfahrens war ein quantitativer Vergleich der Intensitäten der Antennenreaktionen zwischen verschiedenen Tieren möglich. Tabelle 2.1 zeigt alle Stoffe die in diesem Verfahren im Jahr 2008 und 2009 getestet wurden und die Anzahl Individuen sowie die Anzahl der Wiederholungen als auch die jeweils getesteten Konzentrationen.

Tabelle 2.1. : Getestete Stoffe und deren Konzentrationen in Paraffinöl (g/g). N: Anzahl Individuen, n: Anzahl Wiederholungen. Die Reihenfolge ergibt sich aus den Retentionszeiten der Stoffe

| Stoff | CAS | 2008 | 2009 |
|--------------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | ♀ N=5 | ♀ N=6 |
| Hexylacetat | 000142-92-7 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 | |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 | |
| 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=5 |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | 000928-96-1 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 | |
| Nonanal | 124-19-6 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=8 |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat | 016491-36-4 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=7 |
| 2-Ethyl-hexan-1-ol | 000104-76-7 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=10 |
| Decanal | 000112-31-2 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=5 |
| Benzaldehyd | 000100-52-7 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=7 |
| 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol | 000078-70-6 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=4 |
| Hexadecan | 112-88-9 | 10^{-1} - 10^{-5} / n=3 | |
| Methylsalicylat | 19-36-8 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=10 |
| Benzylalkohol | 100-51-6 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=10 |
| 1-Octadecen | 112-88-9 | 10^{-1} - 10^{-7} /n=3 | |
| Methyl octadecanoat | 112-61-8 | 10^{-1} - 10^{-3} / n=3 | |

3.2 Verhaltensversuche

3.2.1 Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung

Im Käfig (50x50x70cm³) wurden in allen vier Ecken Petrischalen mit einem frischem Zitterpappelblatt und einem 2cm² Filterpapier mit 50µl Paraffin gestellt (Abbildung 2.11). In einer Petrischale befand sich zusätzlich ein Duftstoff in der Konzentration 10⁻³ g/g in Paraffinöl. Von den 22 elektrophysiologisch aktiven Stoffen wurden die acht interessantesten Stoffe ausgewählt und im Verhaltensversuch getestet. Es waren Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Nonanal, 2-Ethyl-hexan-1-ol, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol. Bei der Auswahl der Stoffe wurden die Häufigkeit der elektrophysiologischen Reaktionen, Duftstoffanalysen der Pappeln und Weiden sowie Literaturhinweise berücksichtigt. Die Falter wurden abends (ab 18 Uhr) in den Käfig gesetzt und in einem dunklen Raum mit einer Rotlichtlampe beobachtet. In jeder Ecke des Kastens wurde die Lufttemperatur gemessen. Sie betrug zwischen 21,9°C und 23,8°C wobei die Unterschiede zwischen den Ecken nicht größer als ±0,1°C waren.

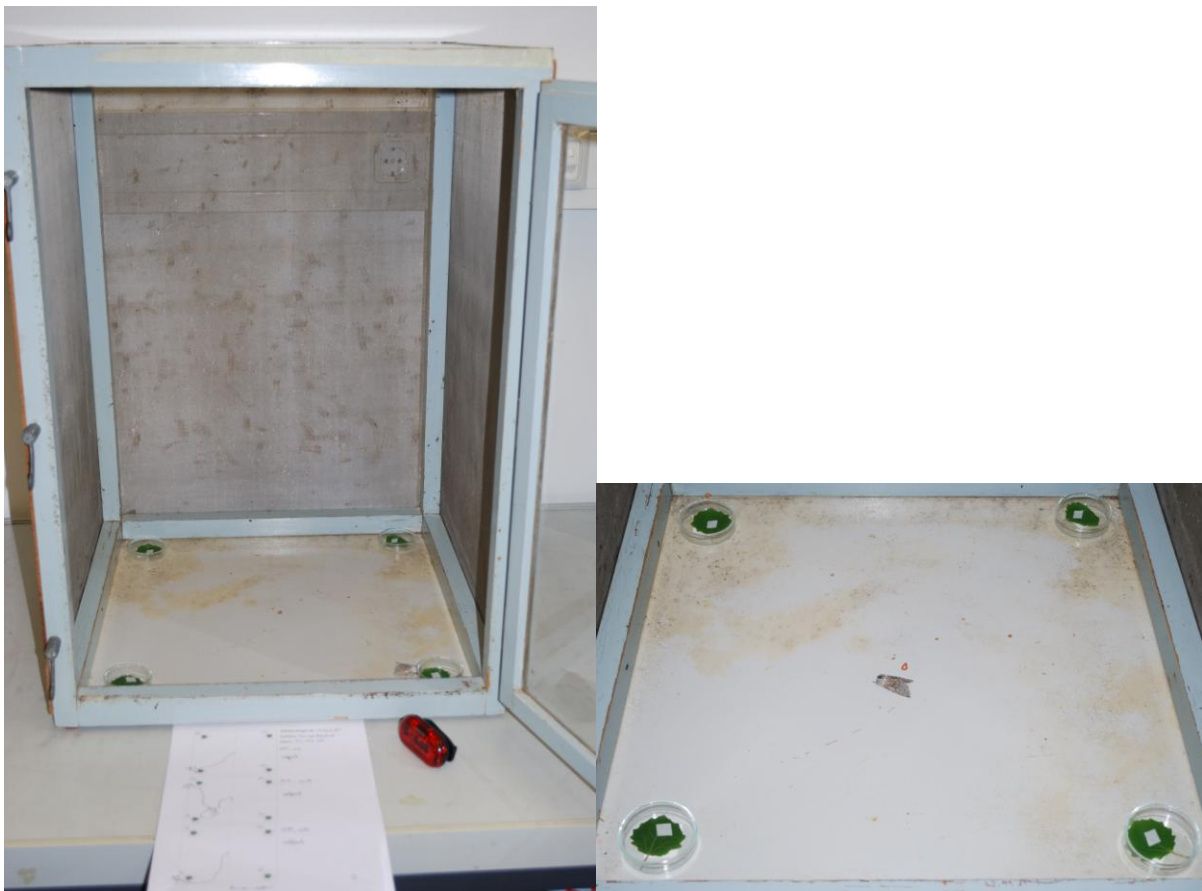


Abbildung 2.11. Versuchsaufbau für den Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung. Links ohne Falter, rechts mit weiblichem Gabelschwanz.

Alle zehn Minuten wurden die Falter zurück in die Mitte des Käfigs gesetzt. Vor jeder Versuchsreihe wurden zwei Nullproben ohne Duftstoff durchgeführt. Bei der Auswertung wurden folgende Parameter berücksichtigt:

A: Wie schnell ist der Falter losgeflogen? (25%)

B: Wie lange hat er sich in der Nähe vom Duftstoff aufgehalten? (25%)

C: Wo ist er gelandet? (25%)

D: Wie viele Zwischenstopps hat er gemacht? (25%)

Jeder Parameter wurde in einer dreistufigen Skala bewertet (Tabelle 2.2). Bei der Bewertung der Nullprobe wurde das Viertel des Kastens berücksichtigt, das im Folgeversuch mit einem Duftstoff bestückt war. Wenn der Falter keine Aktivität zeigte, wurde dieses Ereignis mit „1“ bewertet. Wenn der Falter sowohl bei der Kontrolle als auch bei dem Duftstimulus keine Aktivität zeigte, wurde diese Experimentreihe nicht berücksichtigt. Die oben genannten Parameter wurden prozentual gewichtet (Zahl in der Klammer).

Tabelle 2.2. : Bewertungsschlüssel für den kleinen Verhaltensversuch.

| Skala Parameter | 1 | 2 | 3 |
|----------------------------------|-------------------------|---|------------------|
| A: Losfliegen | Nach 4 Min. | Nach 1-4 Min. | Sofort (< 1 Min) |
| B: Streckenanteil | 0-10% | 10-50% | > 50% |
| C: Landepunkt | Außerhalb vom Duftstoff | In dem Viertel des Käfigs, wo der Duftstoff war | An der Schale |
| D: Zwischenstopp | > 4 | 1-3 | 0 |

Mit diesen Parametern wurde der Attraktivitätsindex (AI) laut der Formel:

$$\mathbf{AI=0,25\times A+0,25\times B+0,25\times C+0,25\times D}$$

berechnet. Dieser Index wurde sowohl als absoluter Wert als auch relativiert auf die Kontrollprobe betrachtet.

Die absoluten AI Werte wurden mit dem t-Test für gepaarte Stichproben mit den Kontrollwerten verglichen.

3.2.2 Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung

Im großen Gazekäfig ($2 \times 1 \times 1 \text{m}^3$) in einem dunklen Raum wurde in jeder Ecke ein Baum (Salweide) gestellt. Die Bäume hatten vergleichbare Größe und Blattmasse und standen in der vorherigen Vegetationsperiode (2008) im Gewächshaus in der schattigen Exposition (auf Grund der geringsten Eierzahl im Jahr 2008 am wenigsten attraktiv). An einem von den vier Bäumen wurde ein 4cm^2 großes Stück Filterpapier mit $100 \mu\text{l}$ Paraffinöl mit dem ausgewählten Duftstoff in einer Konzentration von 10^{-3}g/g angebracht. An den anderen Bäumen wurde Filterpapier mit Paraffinöl aber ohne den Duftstoff aufgehängt. Sobald ein Falterpärchen geschlüpft war, wurde es am selben Tag um 19.00 Uhr mittig in den Käfig gesetzt. Nachts wurde dann die Belüftung des Raumes ausgeschaltet damit die Duftstoffe frei diffundieren konnten und die Falter nicht gestört wurden. Tagsüber wurde der Raum durchgelüftet damit die Duftstoffe sich nicht anreichern konnten. Um 8.00 Uhr morgens wurde der Käfig nach Eiern und Faltern abgesucht und die Fundorte wurden notiert. Die Temperatur im Raum war gleichmäßig und betrug $20\text{-}23^\circ\text{C}$. In diesem Versuch wurden Nonanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol getestet.

3.2.3 Verhaltensversuch zur Fernbereichsorientierung

Die ersten Verhaltensversuche (2007) wurden in einer Gewächshauskammer durchgeführt. In der Kammer wurden künstlich die Lichtbedingungen Sonne und Schatten simuliert (Kapitel 2.1.2). Die Helligkeit wurde mit dem Luxmeter gemessen und betrug auf der Sonnenseite $7.000\text{-}10.000 \text{Lux}$ und auf der Schattenseite $100\text{-}150 \text{Lux}$. Es wurde die Länge der beblätterten Triebe (LbT) in allen vier Plots gemessen (SWS_o=810cm; SWS_{sch}=830cm; ZPS_o=960cm; ZPS_{sch}=1.100cm). Die Falter aus der Freilandzucht 2006 wurden nach dem Schlupf markiert und paarten sich im Käfig. Nach der Kopula wurden sie in die Mitte der Gewächshauskammer gestellt (Abbildung 2.3). Nach jeder Nacht wurden alle Bäume nach Eiern abgesucht bevor das nächste Pärchen hineingestellt wurde. Im Jahr 2008 wurde der Versuch optimiert indem ein großer Gazekäfig ($2 \times 2 \times 6 \text{m}^3$) in die Gewächshauskammer gestellt wurde. Dies verhinderte eine Eiablage in den unerreichbaren Stellen der Kammer und machte das Absuchen leichter.

3.3 Fütterungsversuch

Es wurden 20 Raupen einzeln in durchsichtigen Plastikdosen ($14 \times 14 \times 4 \text{cm}^3$) mit blauen Deckeln im Labor gezüchtet. Die Licht- und Temperaturbedingungen waren für alle gleich und betragen $22 \pm 2^\circ\text{C}$, Langtag 16/8 Stunden. Die Raupen erhielten alle zwei Tage

abgewogenes Futter. Zehn Raupen bekamen Salweideblätter und zehn Zitterpappelblätter. Die Raupen wurden alle 8 Tage gewogen. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch Futterreste und Kotmenge getrocknet (2 Stunden bei 60°C) und separat gewogen. Im L4 Stadium wurde die Trocknungszeit, wegen der steigenden Größe der Kotballen, auf fünf Stunden verlängert. Die Futtermenge wurde nach Bedarf erhöht. Manchmal war eine zusätzliche Fütterung nach einem Tag notwendig. Die Aufnahme und Verwertung der Nahrung wurde mit den nicht destruktiven, gravimetrischen Methoden nach Waldbauer, 1968 ermittelt. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit der Larven wurden keine Raupen getötet um deren Trockengewicht zu ermitteln. Der übrig gebliebene getrocknete Futterrest wurde anhand von Kalibrierkurven, die während des Experimentes erstellt wurden, auf die Frischmasse umgerechnet. Dieser Wert wurde von der angebotenen frischen Blattmasse abgezogen um die gefressene Futtermenge (frisch) zu ermitteln. Ein ähnliches Verfahren wurden auch bei Ernst, 1992 oder Moeser und Vidal, 2004 verwendet. Um die verwertete Futtermenge zu ermitteln wurde eine ähnliche Rechnung an den Trockenmassen durchgeführt. Dazu wurden von der angebotenen Trockenblattmasse die trockenen Kotmassen und die getrockneten Futterreste abgezogen. Anhand der ermittelten Futter- und Kotmengen konnten zwei Indices, die Verdaulichkeit der Nahrung (approximate digestibility- A.D.) und die Effizienz der Futterumsetzung (efficiency of conversion of ingested food in body substancy- E.C.I.) berechnet werden (Waldbauer, 1968). A.D. wurde für Trockenmassen und E.C.I. für Frischmassen ermittelt.

$$\text{A.D.} = (\text{Trockenmasse der aufgenommenen Nahrung} - \text{Kotmasse}) / \text{Trockenmasse der aufgenommenen Nahrung} \times 100$$

$$\text{E.C.I.} = \text{Gewichtszunahme der Raupe} / \text{Frischmasse der aufgenommenen Nahrung} \times 100$$

3.4 Ausbindeversuch



Abbildung 2.12. Versuchsaufbau im Freiland auf dem Kerstlingeröder Feld, Zitterpappel in schattiger Exposition. In jedem Gazekäfig befindet sich eine Gabelschwanzraupe.

Im Jahr 2006 wurden auf den ausgewählten unterschiedlich exponierten Versuchsbäumen 66 Raupen und im Jahr 2007 80 Raupen des Großen Gabelschwanzes *Cerura vinula* im Stadium L1 ausgebracht. Die Raupen befanden sich in Gazekäfigen ($30 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$) mit einem Klettverschluss an drei Seiten und waren dadurch vor Räubern (z.B. Vögeln) und Parasitoiden (z.B. Schlupfwespen) geschützt. Die Netze waren zusätzlich mit Klebeband abgedichtet. Plätze die in der Nähe von Ameisenhaufen lagen wurden gemieden. In einem Vorversuch wurde nachgewiesen, dass die Gazenetze keinen signifikanten Einfluss auf die Temperatur haben. Leichte Temperaturschwankungen haben sich auf $\pm 1^\circ\text{C}$ im Vergleich zur Außentemperatur beschränkt. Es wurde nachgewiesen, dass viele waldrandbewohnende Lepidopterenlarven den äußeren/terminalen Kronenbereich bevorzugen (Damm, 1999). Deswegen wurden die Gazekäfige gezielt sowohl in der Innenkrone als auch in der Außenkrone positioniert (Abbildung 2.12). Die Larven wurden im Jahr 2006 alle 10-12 Tage und im Jahr 2007 am Anfang wöchentlich und nach vier Wochen alle vier Tage kontrolliert, die Ausfälle wurden notiert und falls kein Futter mehr vorhanden war wurden die Käfige umgesetzt (möglichst nahe dem Ursprungsort). Kurz vor der Verpuppung wurden die Raupen in die Verpuppungskästen (Abbildung 2.13) im Labor gebracht. Dies sollte weitere Verluste aufgrund des Wanderungs- und Suchbedürfnisses der Raupen vermeiden. An den Versuchsbäumen wurden während des Versuchs die mikroklimatischen Daten alle 10 Minuten (Lufttemperatur und Luftfeuchte) mit einem Hobo Datenlogger (Onset Computer Corporation, Bourne, USA) aufgenommen.



Abbildung 2.13. Verpuppungskasten in dem die Gabelschwanzraupen ihre Kokons bauen konnten. In jeder Kammer befand sich eine Raupe.

4 Ergebnisse

4.1 Versuchsbäume

Für alle Versuchsbäume wurde eine potentielle Sonnenscheindauer für sämtliche Monate aufgenommen. Die Mittelwerte aus dieser Messung zeigt Abbildung 3.1. Die potenzielle Sonnenscheindauer ist mit den Wachstumsbedingungen der Bäume und dem Mikroklima in dem die Raupen aufwachsen korreliert (Abbildung 3.2; Abbildung 3.3). In den schattigen Positionen konnte man die Sonne in der Vegetationsperiode (April-Oktober) maximal vier Stunden pro Tag sehen und auf den sonnigen Standorten waren es fünf bis elf Stunden.

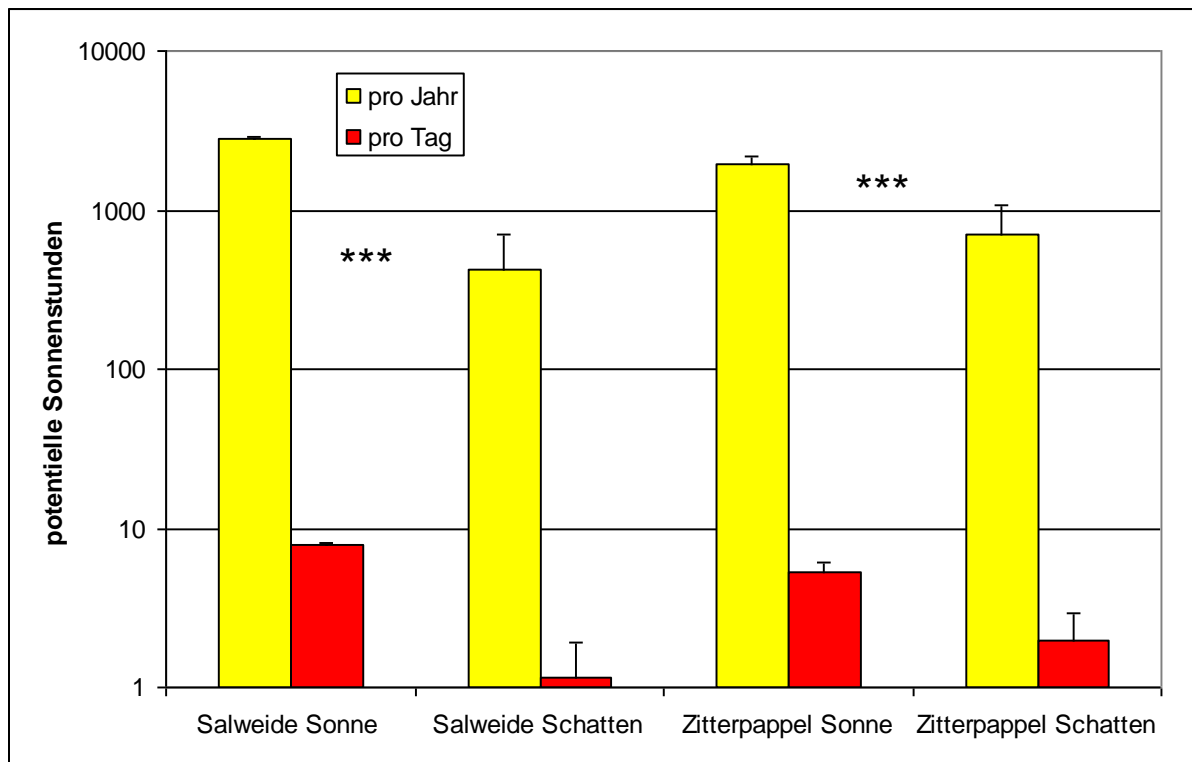


Abbildung 3.1. Potentielle Sonnenscheindauer für alle 32 Versuchsbäume im Freiland. Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert. Mittelwert \pm Standardabweichung; $p < 0,001 = ***$ (U-Test).

Im Jahr 2006 betrug die mittlere Temperatur $20,3^{\circ}\text{C}$ bis $20,6^{\circ}\text{C}$ an den sonnigen Stellen und war signifikant höher als im Schatten ($18,5^{\circ}\text{C}$ bis $18,7^{\circ}\text{C}$). Wie erwartet war die Tendenz bei der Luftfeuchte umgekehrt. Die Werte lagen im Jahr 2006 zwischen 68 und 78% und im Jahr 2007 zwischen 40 und 88%. Hier waren aber nur die Salweide-Standorte voneinander signifikant unterschiedlich (Abbildung 3.2). Im Jahr 2007 wurden ähnliche Verhältnisse beobachtet, wobei die Temperaturen niedriger und die Luftfeuchten höher als im Jahr 2006 waren. Auch im Jahr 2007 waren die Unterschiede statistisch signifikant (Abbildung 3.3).

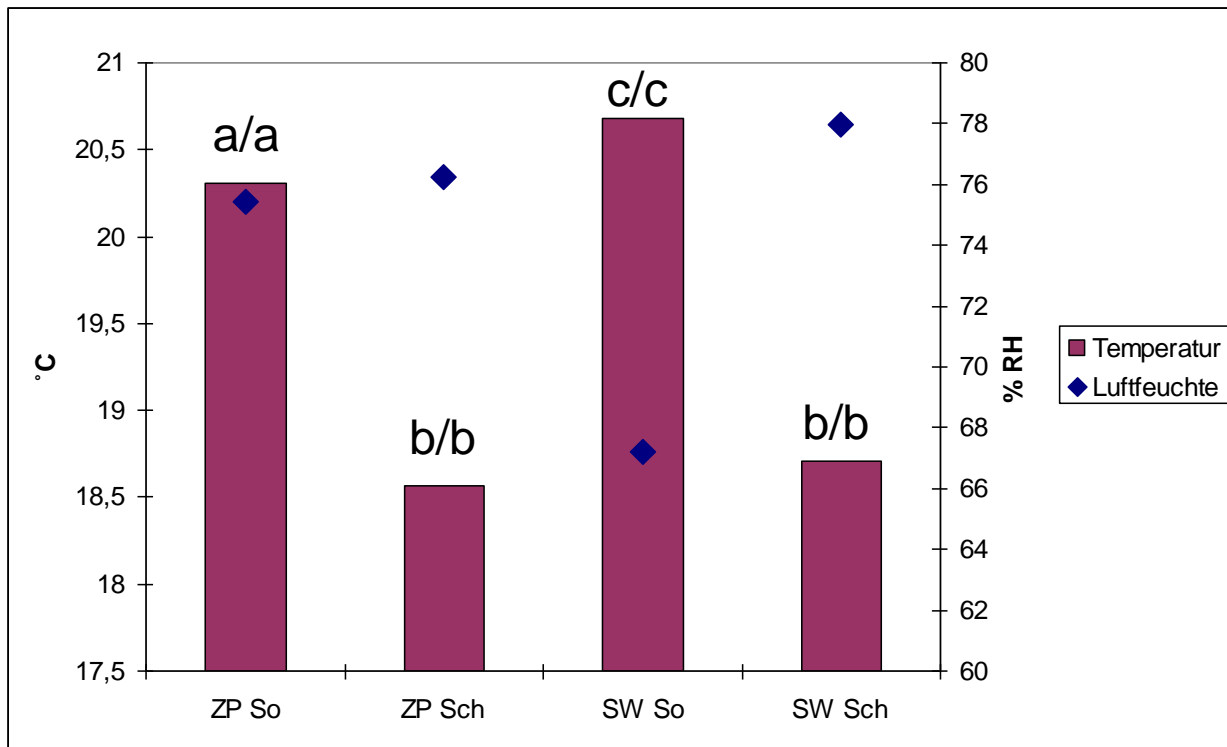


Abbildung 3.2. Mikroklimatische Bedingungen während der Vegetationsperiode 2006. ANOVA $F(3,29932)=299,5$ $p=0,00$ (Tukey HSD) linker Buchstabe für Temperatur/ rechter Buchstabe für Luftfeuchte.

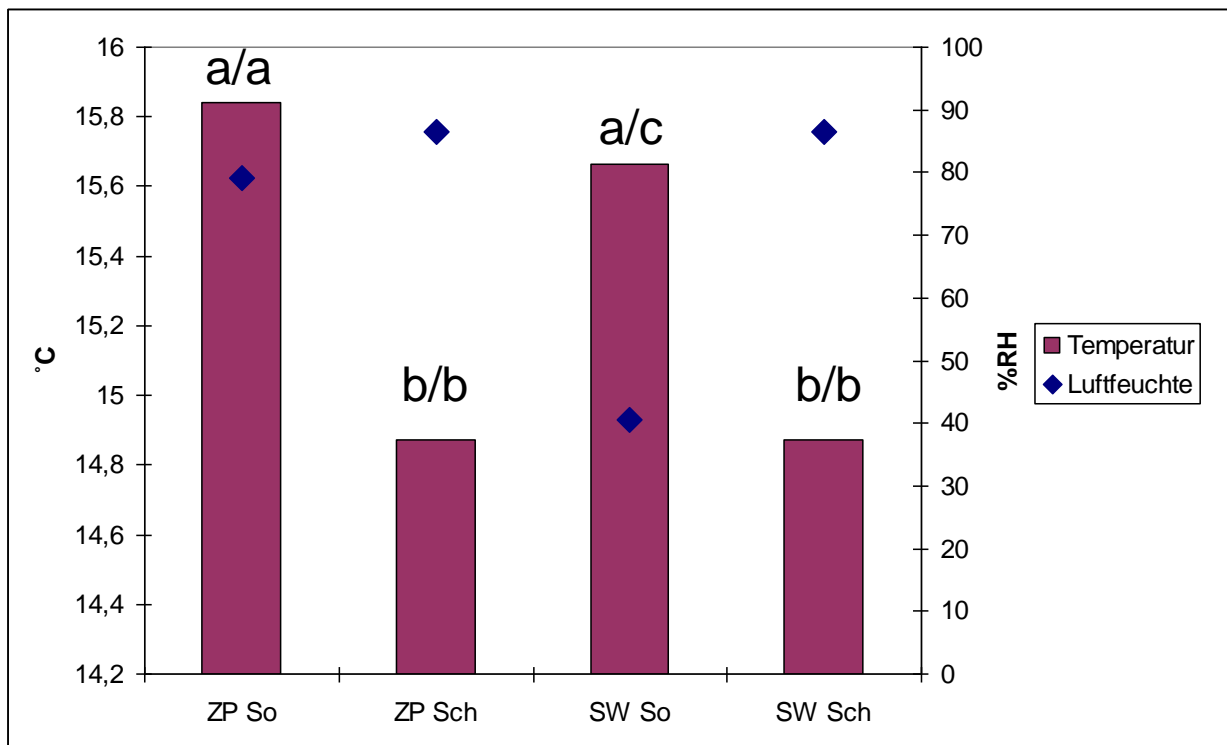


Abbildung 3.3. Mikroklimatische Bedingungen während der Vegetationsperiode 2007. ANOVA $F(3,34256)=88,1$ $p=0,00$ (Tukey HSD Test) linker Buchstabe für Temperatur/ rechter Buchstabe für Luftfeuchte.

4.2 REM Aufnahmen

4.2.1 Antennenmorphologie

Die Antennen des Gabelschwanzes sind beidseitig gekämmt. Die Antennengeißel ist über 1cm lang und hat bei Weibchen etwa 50 und bei Männchen etwa 60 Stammsegmente. Jedes Segment trägt zwei Seitenäste. Die Seitenäste sind bei den Männchen deutlich länger als bei den Weibchen. Männliche Antennen wirken insgesamt kräftiger. Die Vorderreihe und die Hinterreihe sind gleich lang. Die Astreihen sind zueinander gekrümmt und bilden ein typisches „Körbchen“. Die haarförmigen Sensillen befinden sich auf der Körbcheninnenseite und bilden einen sog. „Haarschlauchverband“ (Schneider und Kaissling, 1957). Der Geißelstamm ist auf der Außenseite stark beschuppt, hier wurden keine Sinneshaare beobachtet (Abbildung 3.10).

4.2.2 Aufnahmen

Es wurden insgesamt 41 Aufnahmen von den weiblichen und männlichen Antennen gemacht (32 von Weibchen und neun von Männchen). Die Vergrößerung lag zwischen 40x und 90.000x. Es wurde vor allem der im EAD System gemessene Abschnitt abgebildet. Anhand von morphologischen Merkmalen konnten sechs Sensillentypen beobachtet werden (Abbildung 3.5).

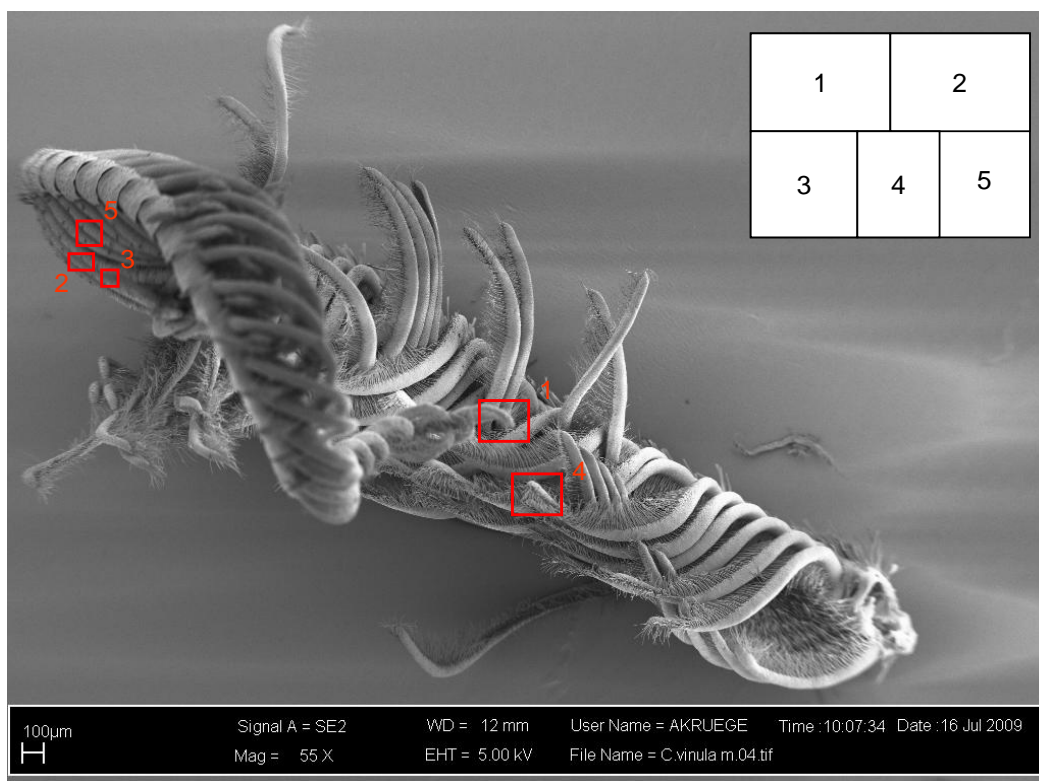


Abbildung 3.4. Die Antenne vom männlichen Gabelschwanz. In der rechten Ecke ist die räumliche Aufteilung der einzelnen Aufnahmen in der Abbildung 3.5 erklärt.

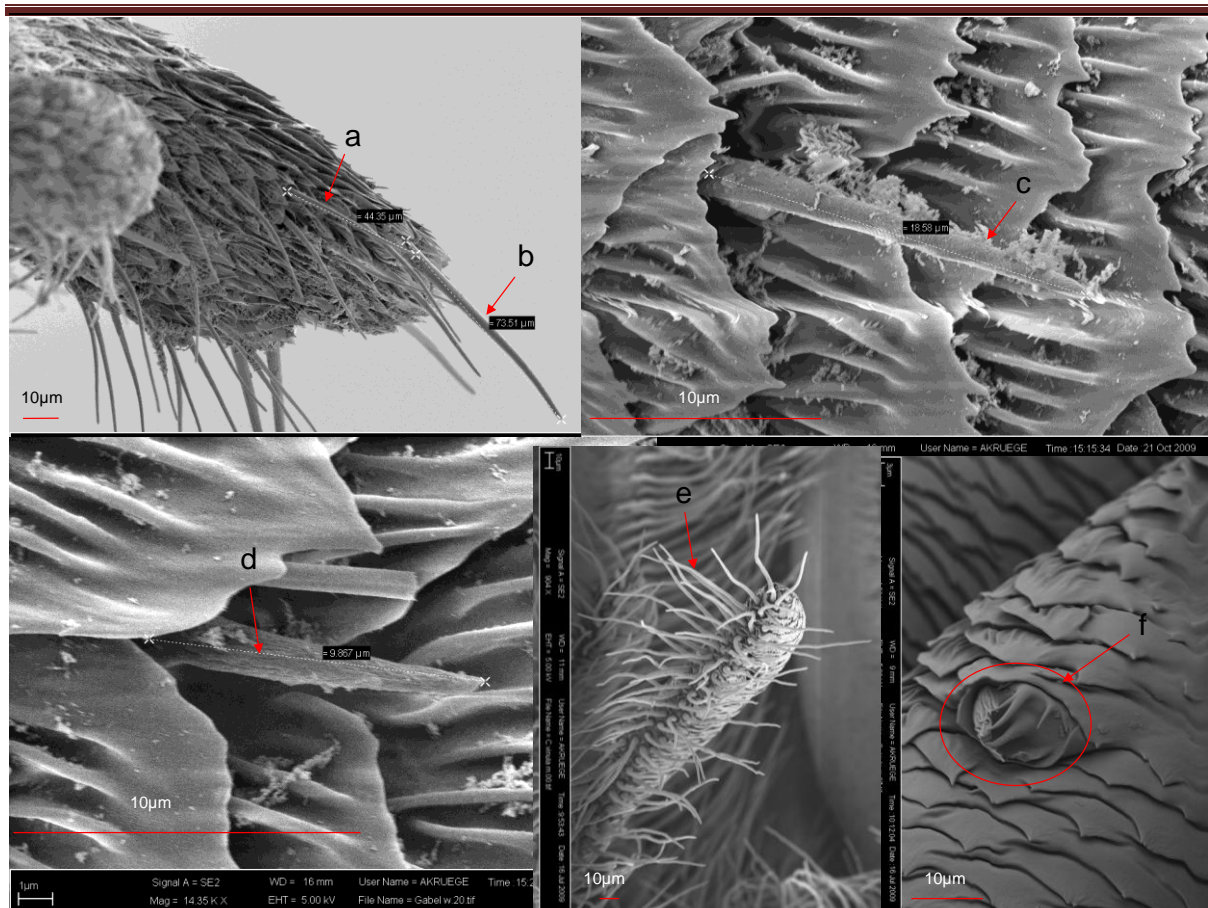


Abbildung 3.5. Sensillenmorphotypen beim Großen Gabelschwanz (Tabelle 3.2). Die Position der einzelnen Aufnahmen erklärt Abbildung 3.4. Der rote Balken ist immer 10µm lang.

Fünf davon (a-e) sind haarförmig, die Letzte ist plattenförmig. Die Beobachtungen zu einzelnen Sensillentypen sind in der Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Tabelle 3.2. Sensillentypen beim Großen Gabelschwanz

| Sensillen-morphotyp | Form | Länge | Durchmesser (Basis) | Beobachtungen | Ähnlichkeiten zu (Quellen) |
|---------------------|------|----------|---------------------|---|---|
| a | Haar | 40-50 µm | 2,5 µm | Bei beiden Geschlechtern an der Spitze der Antenne; mittelgroße Sensillen, relativ dicht, aber nur an der Spitze; Oberfläche längs geriffelt mit porenähnlichen Strukturen (Abbildung 3.6); Verankerung gelenkartig | <i>Sensillum trichodeum</i> oder <i>S. chaeticum</i> bei <i>Deilephila elpenor</i> und <i>Antheraea polyphernus</i> (Hansson, 1995) |
| b | Haar | 70-80 µm | 5 µm | An der Spitze zusammen mit „a“; sehr lange aber vereinzelt verteilte Sensillen; Oberfläche an der Basis glatt, dann längs geriffelt (Abbildung 3.7); Verankerung gelenkartig | <i>S. chaeticum</i> (Steinbrecht, 1970) |

| | | | | | |
|---|--------|-------|--------|--|---|
| c | Haar | 20 µm | 1,8 µm | Auf der Körbchenaußenseite; kleine, spärlich verteilte Sensillen mit einer feinen V-förmigen Oberflächenstruktur; Verankerung nicht sichtbar (Abbildung 3.8) | <i>S. basiconicum</i> (Pophof et al., 2005) |
| d | Haar | 10µm | 1,3µm | Auf der Körbchenaußenseite (ähnlich wie „c“); sehr kleine, kurze, versteckte und spärlich verteilte stachelförmige Sensillen; (häufiger bei weiblichen Antennen); glatte Oberfläche; Verankerung nicht sichtbar | <i>S. basiconicum</i> |
| e | Haar | 70µm | 2,5µm | Auf der Körbcheninnenseite (Abbildung 3.9); große, lange und deutliche Sensillen; sehr dicht bei den Männchen, bei den Weibchen spärlicher; geringelte Oberfläche; Verankerung ohne Gelenk | <i>S. trichodeum</i> (Hansson, 1995; Pophof et al., 2005) |
| f | Platte | - | 10µm | Auf der Körbchenaußenseite; kleine, runde, plattenförmige Sensillen; etwa alle 100-150 µm verteilt; häufiger und deutlicher bei Männchen; glatte Oberfläche; Verankerung ohne Gelenk (Abbildung 3.5, Abbildung 3.10) | <i>S. coeloconicum</i> (Hansson, 1995; Pophof et al., 2005) |

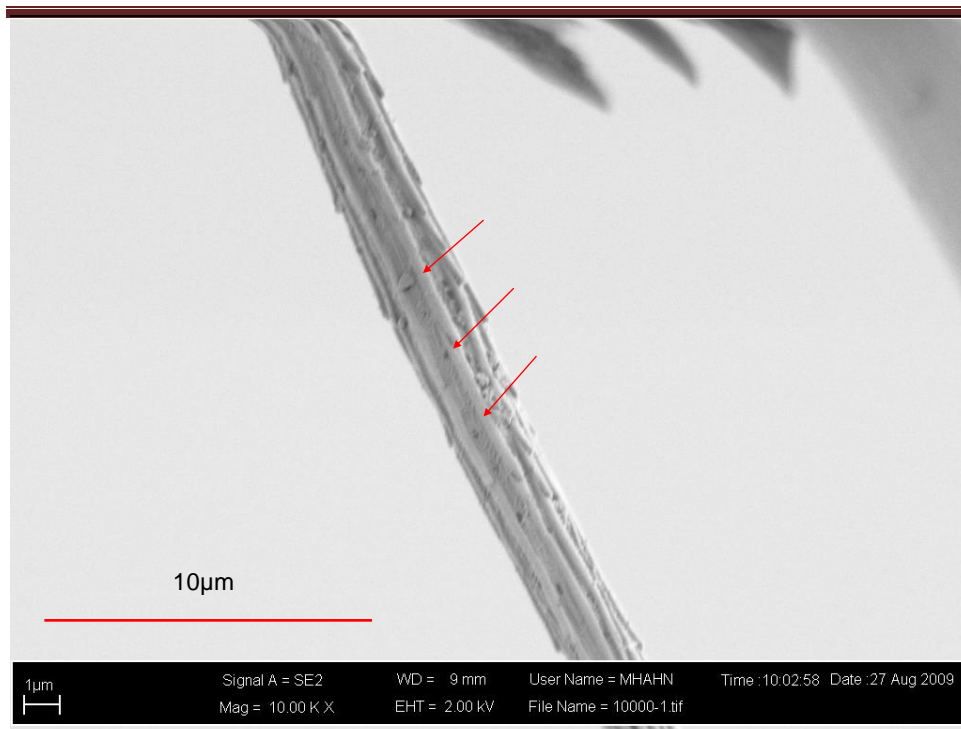


Abbildung 3.6. Sensillum „a“, die Pfeile zeigen die porenähnliche Strukturen.

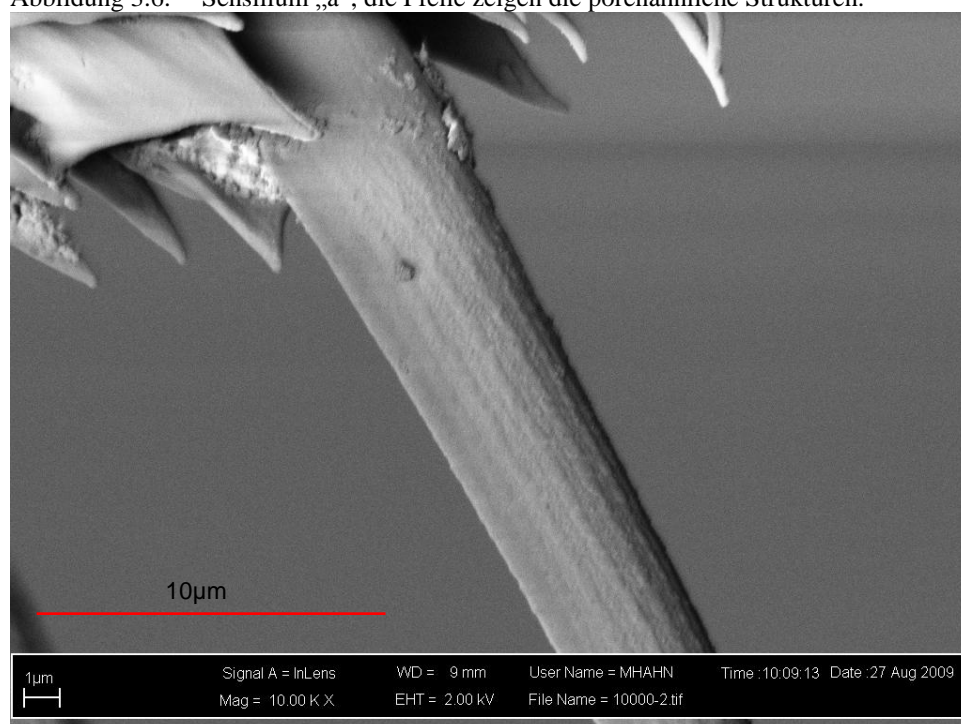


Abbildung 3.7. Sensillum „b“, glatte Oberfläche an der Basis.

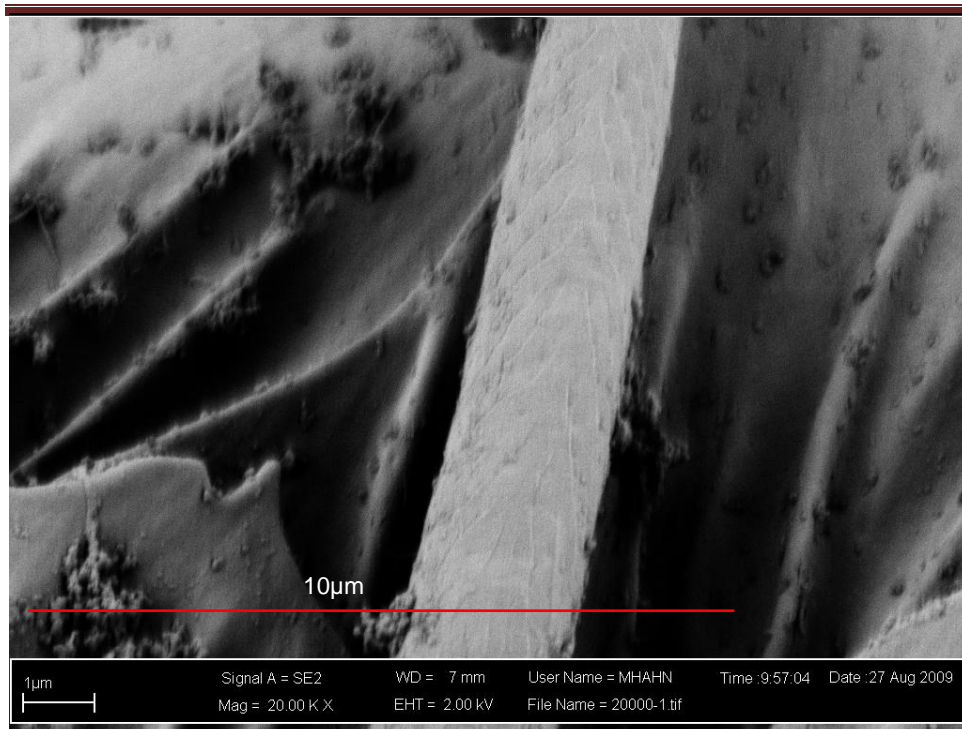


Abbildung 3.8. Sensillum „c“, feine V-förmige Oberflächenstruktur.

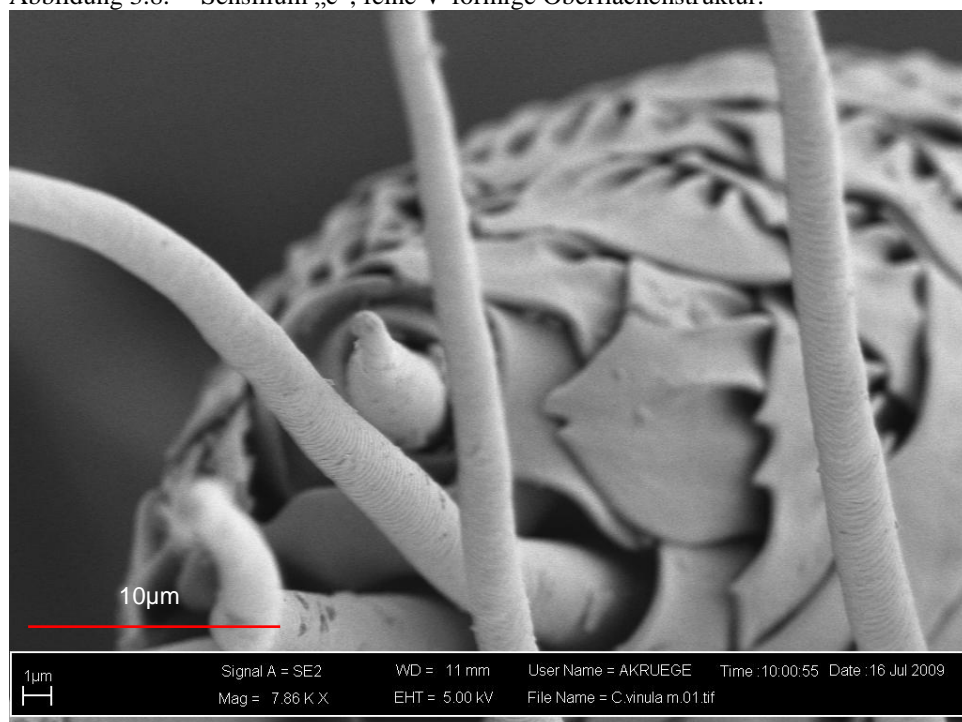


Abbildung 3.9. Sensillum „e“, geringelte Oberfläche.

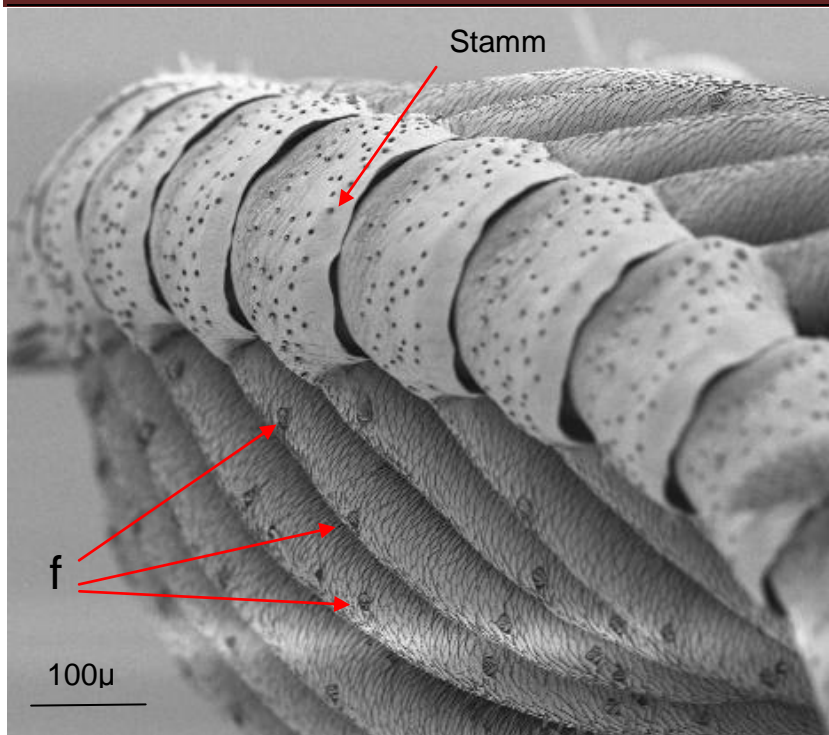


Abbildung 3.10. Sensillum „f“, männliche Antenne. Schwarze Punkte am Stamm sind abgefallene Schuppen.

4.3 GC-MS/EAD und EAG

4.3.1 GC-MS/EAD

Die Abbildung 3.11. stellt beispielhaft eine GC-MS/EAD Messung dar. Es wurden nur die Antennenpeaks markiert die wiederholt auftauchen. Der Peak nach dem Stoff Nr. 11 (RZ 17,6min) wurde nur in der Beispielmessung beobachtet und deswegen kommt er nicht in den weiteren Ergebnissen vor.

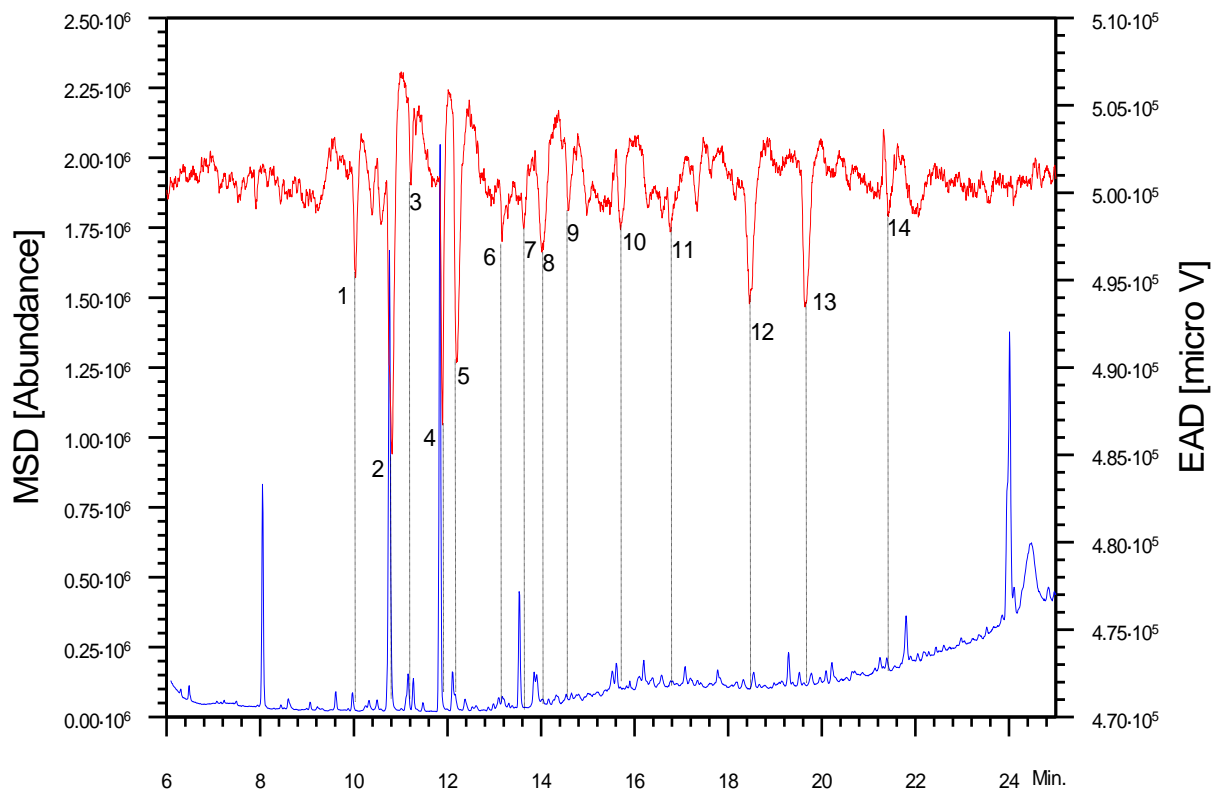


Abbildung 3.11. Beispielhafte GC-MS/EAD Messung. Gabelschwanz Weibchen, Duftspektrum von Zitterpappel Sonne. Markierte Stoffe: 1: Hexylacetat; 2: (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat; 3: 6-Methyl-5-hepten-2-on; 4: (Z)-3-Hexen-1-ol, 5: Nonanal; 6: (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat; 7: 2-Ethyl-hexan-1-ol; 8: Decanal; 9: Benzaldehyd; 10: Hexadecan; 11: Heptadecan; 12: Octadecan 13: Benzylalkohol 14: Methyl tetradecanoat.

Tabelle 3.3. Elektrophysiologisch aktive Stoffe; RI= Retenzionsindex, RZ= Retenzionszeit; x= RI liegt außerhalb der kalibrierten Referenzzeiten. Signifikanzniveau gegenüber der negativen Kontrolle * p<0.05; **p<0.01; * p<0.001**

| Nr. | CAS | RI | RZ | Stoff | Standard | Elektrophysiologische Reaktion (EAD) | | EAG ♀ | |
|-----|-------------|------|------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-----|
| | | | | | | ♀ | ♂ | Reaktion bei (in Paraffinöl (g/g)) | p |
| | | | | | | N= 98 | N= 32 | | |
| 1 | 000620-14-4 | 1231 | 9.1 | 1-Ethyl-3-methyl-benzol | 100% Aldrich | 7 | 0 | | |
| 2 | 000142-92-7 | 1273 | 10.0 | Hexylacetat | 100% Fluka | 49 | 27 | 10 ⁻⁷ | *** |
| 3 | 000108-67-8 | 1297 | 10.3 | nicht identifiziert | | 9 | 0 | | |
| 4 | 003681-71-8 | 1318 | 10.8 | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 100% Aldrich | 89 | 32 | 10 ⁻⁶ | * |
| 5 | 000110-93-0 | 1336 | 11.1 | 6-Methyl-5-hepten-2-on | 100% Fluka | 12 | 0 | 10 ⁻⁵ | ** |
| 6 | 000928-96-1 | 1374 | 11.8 | (Z)-3-Hexen-1-ol | 100% Acros | 36 | 18 | 10 ⁻⁷ | *** |
| 7 | 000124-19-6 | 1389 | 12.1 | Nonanal | 90% Acros | 80 | 30 | 10 ⁻⁵ | * |
| 8 | 016491-36-4 | 1452 | 13.2 | (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat | 100% Aldrich | 11 | 0 | 10 ⁻⁴ | * |
| 9 | 053398-84-8 | | | (E)-3-Hexen-1-yl-butyrat | Nicht erhältlich | | | | |
| 10 | 000104-76-7 | 1473 | 13.5 | 2-Ethyl-hexan-1-ol | 100% Merck | 11 | 9 | 10 ⁻⁴ | * |
| 11 | 000112-31-2 | 1493 | 13.9 | Decanal | 100% Acros | 26 | 0 | 10 ⁻¹ | ** |
| 12 | 000100-52-7 | 1520 | 14.4 | Benzaldehyd | 100% Acros | 12 | 0 | 10 ⁻⁴ | ** |
| 13 | 000078-70-6 | 1530 | 14.5 | 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol | 100% Merck | 5 | 0 | 10 ⁻⁷ | * |
| 14 | 001560-93-6 | 1553 | 14.8 | nicht identifiziert | | 0 | 12 | | |
| 15 | 000544-76-3 | 1600 | 15.5 | Hexadecan | 100% Acros | 28 | 15 | | |
| 16 | 003891-98-3 | 1665 | 16.6 | nicht identifiziert | | 11 | 0 | | |
| 17 | 000629-78-7 | 1700 | 17.1 | Heptadecan | 100% Acros | 6 | 5 | | |
| 18 | 000119-36-8 | 1778 | 18.3 | Methylsalicylat | 100% Acros | 33 | 0 | 10 ⁻⁷ | ** |
| 19 | 000593-45-3 | 1800 | 18.5 | Octadecan | 100% Acros | 13 | 11 | | |
| 20 | 000100-51-6 | 1871 | 19.5 | Benzylalkohol | 100% Aldrich | 46 | 24 | 10 ⁻⁷ | * |
| 21 | 002782-91-4 | 1914 | 20.2 | Tetramethylthioharnstoff | 100% Merck | 7 | 0 | | |
| 22 | 000124-10-7 | x | 21.4 | Methyltetradecanoat | 99% Fluka | 28 | 9 | | |

In der Tabelle 3.3. sind alle Stoffe aufgelistet, die bei über 5% der Messungen eine elektrophysiologische Reaktion ausgelöst haben (sog. EAG-aktive Stoffe). Es wurden hier auch die niedrigsten Konzentrationen, bei denen eine signifikante Reaktion im Vergleich zur negativen Kontrolle gemessen wurde (inklusive Signifikanzniveau), notiert. Die Retentionszeiten der Stoffe wurden mit den Standardmessungen der reinen Substanzen bestätigt. Drei Stoffe (RZ: 10,3min, 14,8min und 16,6min) konnten nicht identifiziert werden. Die vorgeschlagenen Stoffe aus der Nist-Datenbank hatten nach der Standardmessung andere Retentionszeiten und die Stoffe, die zur gleichen Zeit auf der GC-Säule zu finden waren, hatten sehr unterschiedliche Massenspektren. Jedoch wurden sie wegen relativ hohen Reaktionshäufigkeiten (> 10%) trotzdem aufgeführt. Abbildung 3.12. zeigt geschlechtsspezifische Unterschiede bei der Wahrnehmung der Duftstoffe. Stoffe wie 3-Hexen-1-yl-butyrat, Decanal, Benzaldehyd, 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) und

Methylsalicylat sowie der nicht identifizierte Stoff mit der Retentionszeit 10,3min (bzw. RI 1297) wurden nur von den weiblichen Tieren wahrgenommen. Dagegen rochen ausschließlich die Männchen den unidentifizierten Stoff mit der Retentionszeit 16,6min (bzw. RI 1665). Stoffe wie Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, Nonanal und Benzylalkohol wurden von beiden Geschlechtern bei 50-100% der Messungen wahrgenommen.

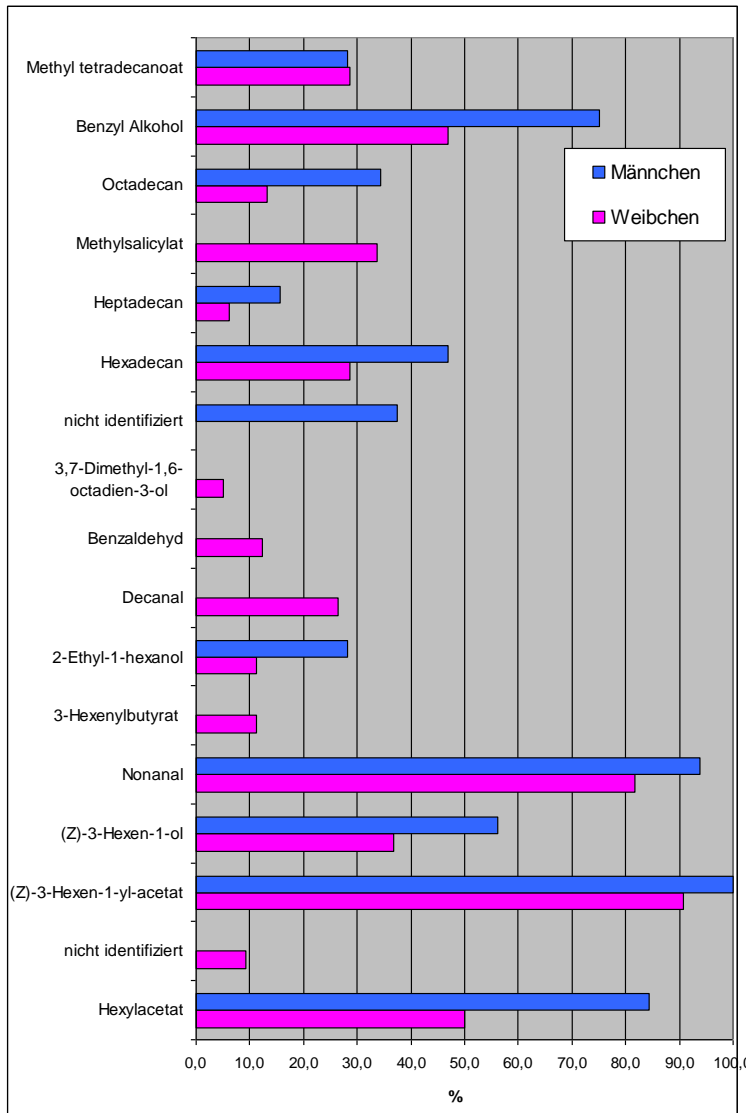


Abbildung 3.12. Häufigkeit der Antennenreaktionen auf ausgewählte Stoffe in Prozent. Die Reihenfolge ergibt sich nach der Retentionszeit der Stoffe.

Die Identität der meisten Grünblattdüfte konnte mit dem Retentionsindex aus der Literatur bestätigt werden. Für die vier Stoffe Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat lagen die Abweichungen von den Standardmessungen zwischen 4% und 10% (Ruther, 2000). Dies ist ein akzeptabler Bereich, insbesondere wenn man weiß, dass bei verschiedenen Messungen die Retentionszeiten von dem gleichen Stoff bis zu 0,1min voneinander abweichen. Die Säule die bei Ruther, 2000 verwendet wurde hat eine ähnliche

Polarität wie die in dieser Arbeit verwendete INNOWAX-Säule. Es konnte bestätigt werden, dass sich diese polaren Säulen besonders für die Trennung von Grünblattdüften eignen (Ruther, 2000).

4.3.2 EAG-Verdünnungsreihen

Zehn ausgewählte Stoffe wurden in den Konzentrationen 10^{-7} bis 10^{-1} (g/g) in Paraffinöl mehrfach (Tabelle 2.1) getestet. Für alle wurden Graphiken wie die Abbildung 3.13. erstellt, um die Konzentrationsabhängigkeit der Antennenantworten darzustellen. Die Ergebnisse der statistischen Tests auf die niedrigste signifikante vom Untergrund unterscheidbare Antennenantwort zeigt Tabelle 3.3. Die Stoffe Nonanal und Benzylalkohol wurden in beiden Versuchsjahren getestet und die Ergebnisse waren sehr ähnlich (Nonanal 2009= 10^{-5} *; 2008= 10^{-6} *; Benzylalkohol 2009= 10^{-7} *; 2008= 10^{-7} **). Die anderen Stoffe wurden nur in einem Versuchsjahr getestet. Der Gabelschwanz hat einen sehr empfindlichen Geruchssinn.

Tabelle 3.4. Signifikanzniveau der Antennenreaktion auf getestete Verdünnungsstufen (g/g).

| Stoff | CAS | 10^{-7} | 10^{-6} | 10^{-5} | 10^{-4} | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} |
|--------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Hexylacetat | 000142-92-7 | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | 000928-96-1 | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** |
| Methylsalicylat | 19-36-8 | ** | ** | *** | *** | *** | *** | *** |
| Benzylalkohol | 100-51-6 | * | * | *** | *** | *** | *** | *** |
| 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol | 000078-70-6 | * | * | ** | * | *** | *** | *** |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 003681-71-8 | | * | | *** | *** | *** | *** |
| 6-Methyl-5-hepten-2-on | 000110-93-0 | | | ** | *** | *** | *** | *** |
| Nonanal | 124-19-6 | | | * | ** | *** | *** | *** |
| Benzaldehyd | 000100-52-7 | | | | ** | *** | *** | *** |
| 2-Ethyl-hexan-1-ol | 000104-76-7 | | | | * | *** | *** | *** |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-butytrat | 016491-36-4 | | | | * | *** | *** | *** |
| Decanal | 000112-31-2 | | | | | | | ** |
| Hexadecan | 112-88-9 | | | * | | | | |
| Methyl octadecanoat | 112-61-8 | | | | | | | |

Fünf von den getesteten Duftstoffen (Hexylacetat, (Z)-Hexen-1-ol, Linalool, Methylsalicylat und Benzylalkohol) wurden schon in der Konzentration 10^{-7} (g/g) signifikant stark gerochen (Tabelle 3.4). Bei zwei Stoffen (Hexylacetat und (Z)-Hexen-1-ol) war das Signifikanzniveau bei 10^{-7} (g/g) sehr hoch. Ein weiterer wichtiger Grünblattduft ((Z)-3-Hexen-1-ylacetat) wurde bei 10^{-6} (g/g) signifikant wahrgenommen. Bei 10^{-5} (g/g) wurde 6-Methyl-5-hepten-2-on und Nonanal gerochen. Wobei Nonanal im Jahr 2008 schon bei 10^{-6} (g/g) wahrgenommen wurde. Man sieht also jährliche Schwankungen die auf Populationsunterschiede zurückzuführen sind. Die Konzentration 10^{-4} (g/g) löste bei (Z)-3-Hexen-1-yl-butytrat, 2-Ethyl-hexan-1-ol und Benzaldehyd ein signifikantes Signal aus. Nur bei Decanal waren die Reaktionen so schwach,

dass erst die höchste Konzentration (10^{-1} (g/g)) eine vom Untergrund unterscheidbare Antennenantwort auslöste.

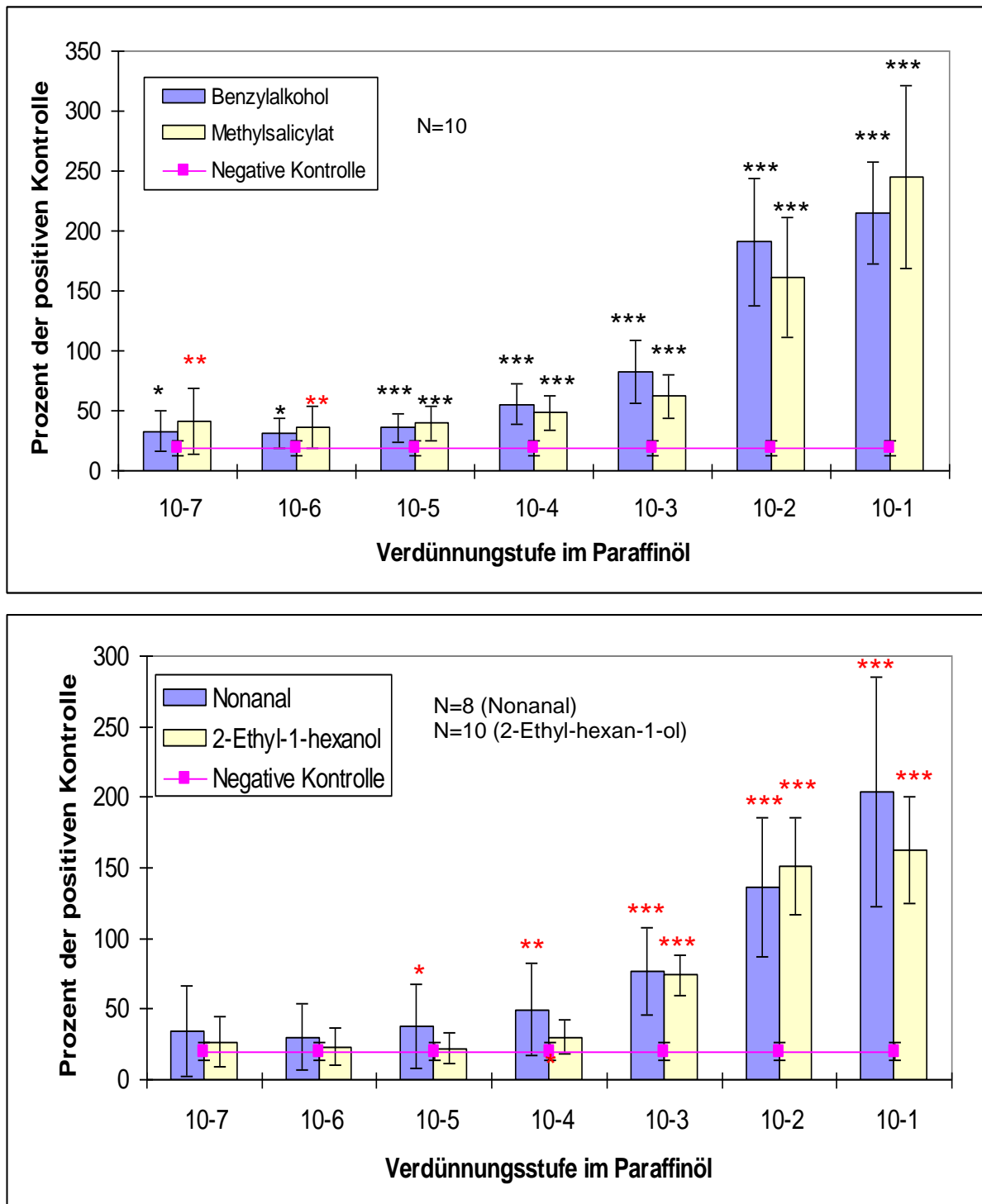


Abbildung 3.13. Relative elektrophysiologische Reaktionen der Antenne des Gabelschwanzes auf unterschiedliche Duftstoffkonzentrationen. Mittelwerte aus 8-10 Messungen (n) an sechs Individuen (N=6). Die Balken zeigen die Standardabweichung. Als negative Kontrolle wurde eine Reaktion auf Filterpapier mit Paraffin verwendet. Um das Signifikanzniveau gegenüber der negativen Kontrolle zu bestimmen wurde der t-Test (schwarze Sterne) (Gerold et al.) bzw. U-Test bei nicht normal verteilten Daten (rote Sterne) verwendet * p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001.

4.4 Verhaltensversuche

4.4.1 Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung

In diesem Versuch wurde geprüft, wie die Falter auf einzelne Duftstoffe reagieren. Ähnlich wie im typischen Vierarm-Olfaktometer hatten die Falter vier Möglichkeiten, wo sie hinfliegen konnten. Sie wurden stets über einen definierten Zeitraum beobachtet. Insgesamt wurden 12 Falter getestet (neun weibliche und drei männliche). Eine genauere Aufschlüsselung der Ergebnisse zeigt Tabelle 3.5. Es wurden maximal zwei Falter parallel beobachtet. Männliche Tiere zeigten höhere Aktivitäten als weibliche. Die Tiere waren in den Dämmerungsstunden von 18.00 Uhr bis 21.00 Uhr am aktivsten. Danach ließ die Aktivität nach. Es wurden folgende acht Stoffe in der Konzentration 10^{-3} (g/g) getestet: Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Nonanal, 2-Ethyl-hexan-1-ol, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol.

Tabelle 3.5. zeigt wie oft die Falter zum jeweiligen Duftstoff geflogen sind ($AI > 2$) und wie oft der Stoff getestet wurde. Eine grüne Markierung bedeutet, dass der Attraktivitätsindex (AI) bei über 20% der Experimente größer als zwei war (Kapitel 3.2.1). In dieser Tabelle wurden keine Kontrollergebnisse berücksichtigt. Dagegen zeigt Abbildung 3.14. und Abbildung 3.15. die prozentuelle Betrachtung des Attraktivitätsindex gegenüber der Kontrolle. Hier wurden die Werte ab 105% grün und unter 80% rot markiert. Die statistische Auswertung mit dem t-Test für gepaarte Stichproben ergab keine signifikanten Unterschiede. Jedoch wurden die Stoffe die sowohl in Tabelle 3.5. als auch in Abbildung 3.14. und Abbildung 3.15. hervorgehoben sind als „attraktiv“ bezeichnet. Für Weibchen sind das Nonanal, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol und für Männchen (Z)-3-Hexen-1-ol. Die rot hervorgehobenen Stoffe wurden als „repellent“ bezeichnet. Es wurde eine repellente Wirkung von zwei Stoffen (Methylsalicylat und Hexylacetat) an männlichen Gabelschwänzen feststellen. Die prozentuelle Betrachtung hat hier mehr Aussagekraft, da sie die Kontrollergebnisse berücksichtigt.

Alle Stoffe, die in diesem Versuch das Verhalten der Falter beeinflusst haben, wurden in den Verdünnungsreihen getestet (Kapitel 3.1).

Tabelle 3.5. Ergebnisse des Verhaltensversuchs zum Nahorientierungsbereich. Eine grüne Markierung zeigt Experimente, bei denen der Attraktivitätsindex bei über 20% der Versuche größer als 2 war.

| Getesteter Stoff | | Gabelschwanz | |
|-------------------------|----------------|--------------|----------|
| | | ♀ N=9 | ♂ N=3 |
| Methylsalicylat | Wiederholungen | 23 | 6 |
| | Wie oft AI>2* | 8 (35%) | 0 (0%) |
| Nonanal | Wiederholungen | 24 | 6 |
| | Wie oft AI>2 | 9 (38%) | 2 (33%) |
| Hexylacetat | Wiederholungen | 21 | 6 |
| | Wie oft AI>2 | 1 (5%) | 0 (0%) |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | Wiederholungen | 24 | 9 |
| | Wie oft AI>2 | 3 (13%) | 1 (11%) |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | Wiederholungen | 21 | 9 |
| | Wie oft AI>2 | 2 (10%) | 2 (22%) |
| 2-Ethyl-hexan-1-ol | Wiederholungen | 21 | 9 |
| | Wie oft AI>2 | 5 (24%) | 2 (22%) |
| Benzylalcohol | Wiederholungen | 23 | 6 |
| | Wie oft AI>2 | 6 (26%) | 3 (50%) |
| Decanal | Wiederholungen | 21 | 9 |
| | Wie oft AI>2 | 4 (19%) | 1 (11%) |

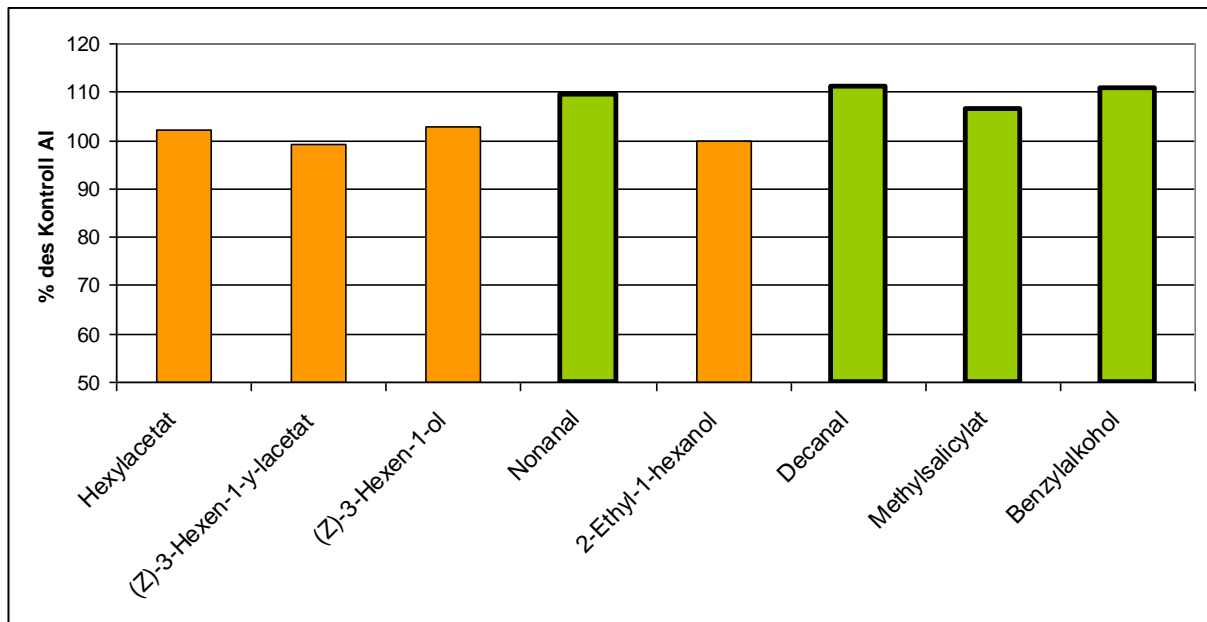


Abbildung 3.14. Verhalten der Gabelschwanz Weibchen auf die Duftstoffkonzentration 10^{-3} in Paraffinöl (g/g) im Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung. Attraktiv (grün) $>105\%$; Repellent (rot) $<80\%$.

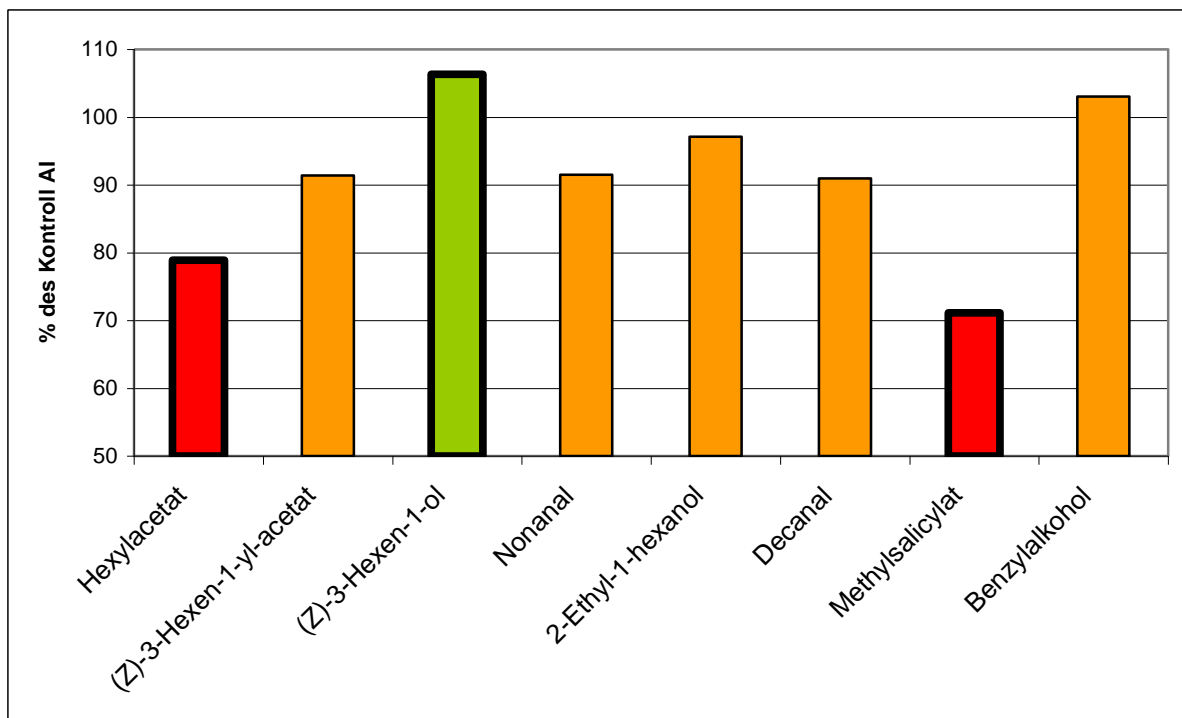


Abbildung 3.15. Verhalten der Gabelschwanz Männchen auf die Duftstoffkonzentration 10^{-3} in Paraffinöl (g/g) im Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung. Attraktiv (grün) $>105\%$; Repellent (rot) $<80\%$.

4.4.2 Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung

Die Falter konnten in diesem Versuch einen Eiablageplatz im großen Gazekäfig wählen. Als Eiablageplatz hatten sie vier Salweiden zu Verfügung. Auf einem Baum wurde eine zusätzliche Duftquelle (Ein Tropfen der Paraffinlösung des Duftstoffs auf einem Filterpapier) befestigt. Es wurden acht Gabelschwänze (fünf Weibchen und drei Männchen) verwendet, um

die drei Duftstoffe Nonanal, Benzylalkohol und Methylsalicylat je dreimal zu testen. Insgesamt wurden 129 Eier immer an den Käfigwänden abgelegt. Die Pflanzen wurden für die Eiablage nicht angenommen. Auf Grund der geringen Anzahl sowohl der untersuchten Falter als auch der abgelegten Eier (ein Weibchen kann 200-300 Eier ablegen) konnten keine signifikanten Tendenzen festgestellt werden.

4.4.3 Verhaltensversuch zur Fernbereichsorientierung

Für diesen Versuch wurde ein großer Gazekäfig gebaut und in die Gewächshauskammer gestellt. Alle Bäume wurden im Käfig wie in Abbildung 2.3 hineingestellt.

Im Gazekäfig wurden sieben Pärchen freigesetzt. Von den sieben Weibchen zeigten sechs selektives Eiablageverhalten. Es wurden insgesamt 198 Eier einzeln oder paarweise abgelegt. Sonnen-exponierte Salweiden wurden zur Oviposition hoch signifikant bevorzugt (Abbildung 3.16). Dagegen war die Salweide in der schattigen Exposition überhaupt nicht attraktiv für die Falter.

Bei sämtlichen verwendeten Faltern war der Entwicklungsplatz der Raupe bekannt. Es wurden vier Weibchen, die sich auf Salweide in sonniger Exposition, zwei die sich auf Zitterpappel in schattiger Exposition und ein Weibchen, das sich auf Salweide in schattiger Exposition entwickelt haben, in dem Wahlversuch eingesetzt. In diesem Experiment konnte man keinen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Fraßort der Raupe und dem Eiablageverhalten des Falters feststellen. Dieser interessante Ansatz ist leider an einer zu geringen Anzahl an verfügbaren Faltern gescheitert. Die Frage, ob der Fraßort der „Mutter“ ihr Eiablageverhalten beeinflusst, könnte weiter verfolgt werden, wenn eine stabile Zucht der Falter in großen Mengen (>100 Stück) möglich wäre. Beim Wahlversuch soll beachtet werden, dass die Falter möglichst wenige Versteckmöglichkeiten haben.

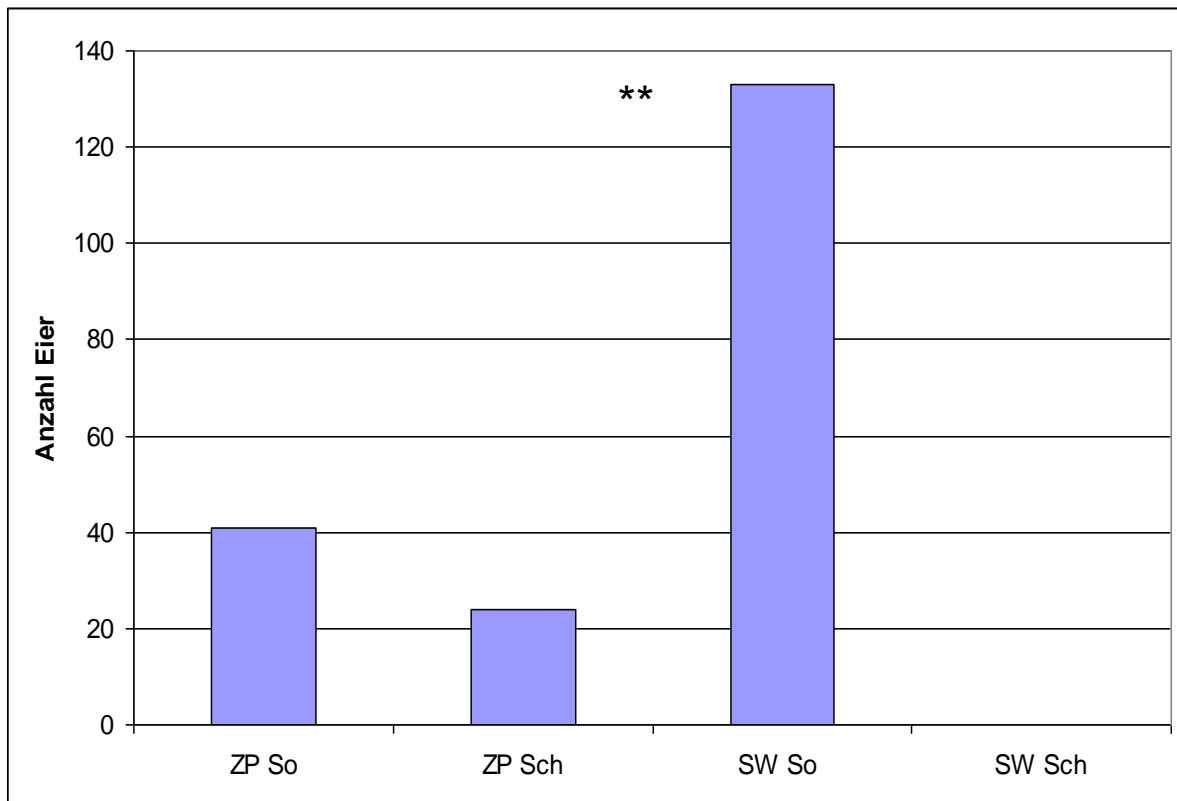


Abbildung 3.16. Wahlversuch am Gabelschwanz im Gewächshaus. Evaluierung mittels der Anzahl abgelegter Eier. χ^2 -Test. ** $p < 0,01$.

4.5 Larvalentwicklung

4.5.1 Laborfütterungsversuch

Von 20 Raupen haben sich sieben verpuppt, davon vier an Zitterpappel und drei an Salweide. Diese 35%ige Überlebensrate, die etwas niedriger als unter Freilandbedingungen war (43%), kann zum Teil auf experimentell bedingte Stressfaktoren (unnatürliche Umgebung, häufige Transporte, wöchentliche Wägung) zurückgeführt werden. Die Entwicklung dauerte zwischen 31 und 43 Tagen. Für Zitterpappel waren es durchschnittlich 35 Tage und für Salweide 34,3 Tage (t-Test, n.s). Beim Wiegen der Kotmenge wurde festgestellt, dass die Raupen an Zitterpappel signifikant geringere Mengen Kot ausscheiden (Abbildung 3.17)

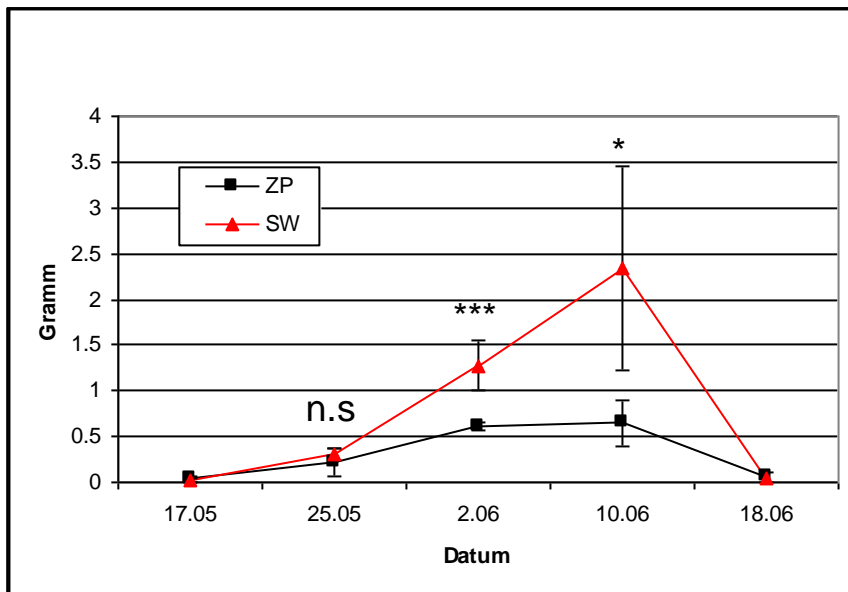


Abbildung 3.17. Kotmasse bei den untersuchten Raupen an Zitterpappel (ZP) und an Salweide (SW), n zwischen zehn am 17.05. bis vier am 10.06.; t-Test * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Die Raupen haben durchschnittlich bis zur Verpuppung 13,14g Frischfutter gefressen. Die Mittelwerte für die Zitterpappel lagen bei 10,52g und für die Salweide bei 15,75g (Abbildung 3.18), welches ein statistisch signifikanter Unterschied ist (t-Test, $p=0,04$).

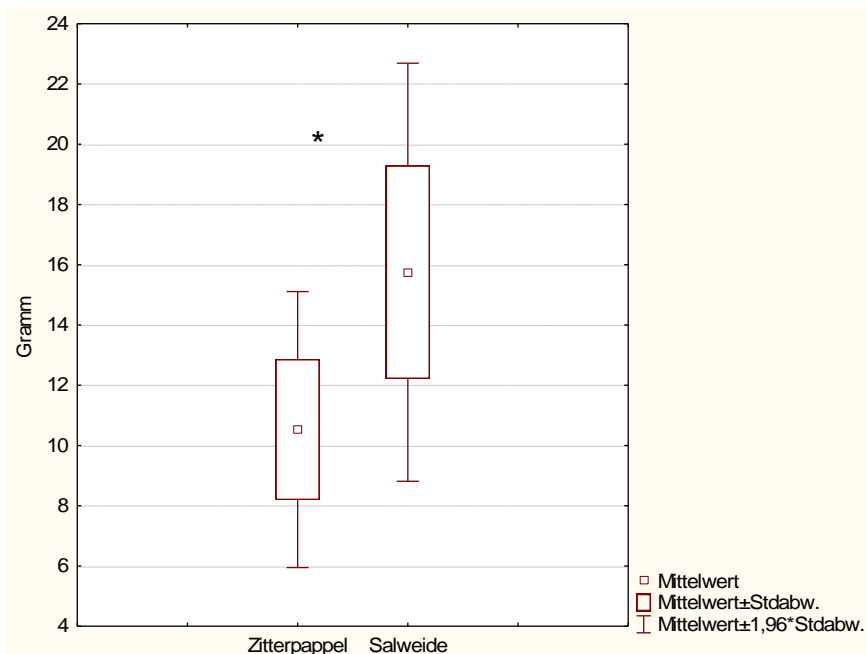


Abbildung 3.18. Die gesamte frische Blattmasse in Gramm die während der Entwicklung verzehrt wurde (nur die Raupen die sich verpuppt haben oder kurz vor der Verpuppung gestorben sind), $n=4$.

Abbildung 3.19 zeigt wie viel Frischmasse jede einzelne Raupe wöchentlich zu sich genommen hat. Es wurden hier nur die Raupen berücksichtigt, die sich erfolgreich verpuppt haben. Alle drei Raupen an Salweide haben in der Endphase der Entwicklung eine ähnliche Menge Blätter gefressen. Die Raupen an der Zitterpappel zeigten zu diesem Zeitpunkt (10.06.) größere Unterschiede. Die Raupe Nummer 8 an Zitterpappel hat deutlich mehr Zeit

bis zur Verpuppung gebraucht als die anderen Raupen. Eine Woche nach dem Kokonbau der anderen Raupen hat sie noch gefressen und Kot ausgeschieden.

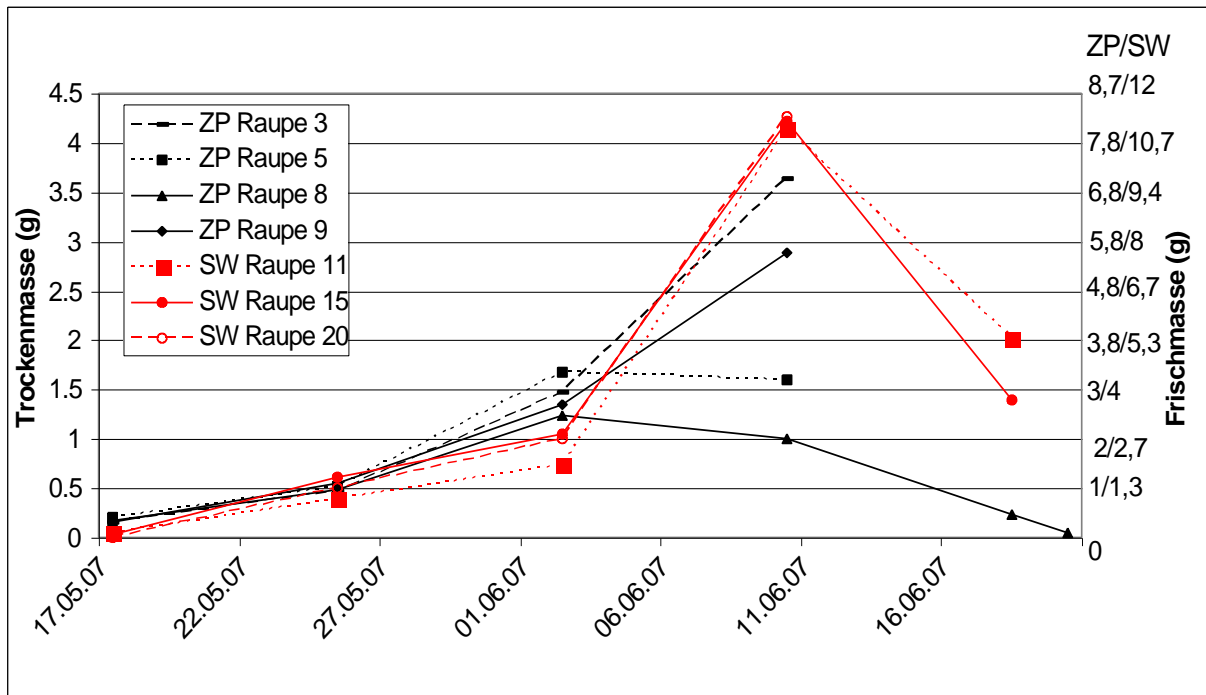


Abbildung 3.19. Gefressene frische Blattmasse an einzelnen Messtagen nur für die Raupen, die sich erfolgreich verpuppt haben.

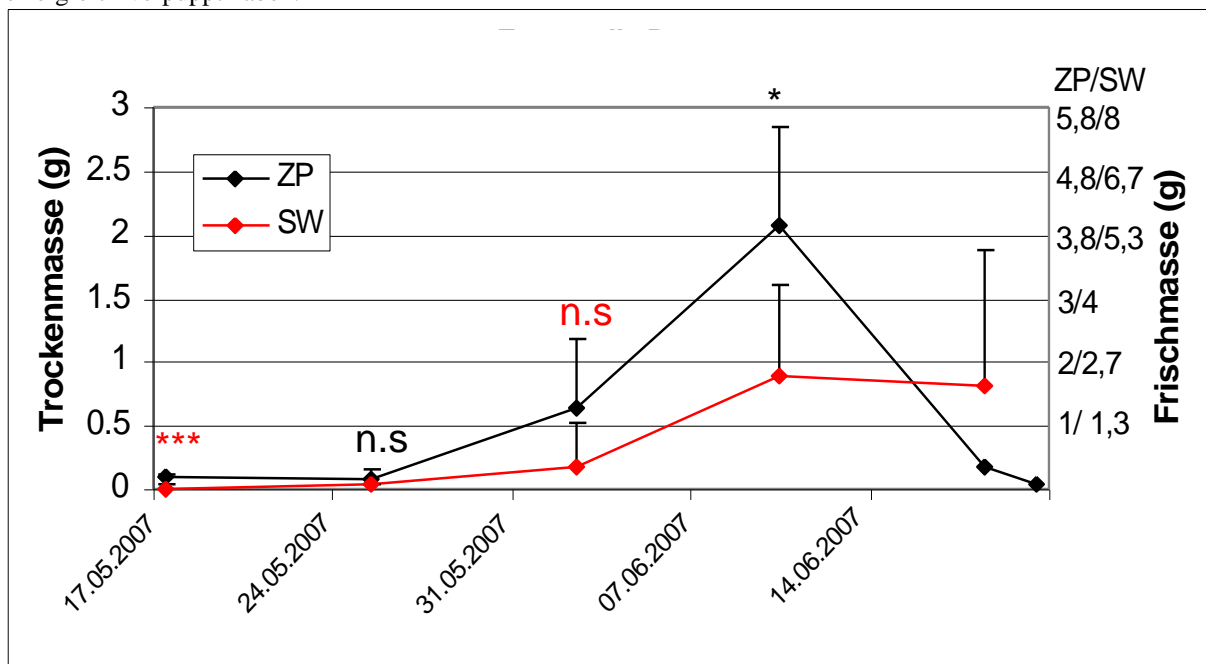


Abbildung 3.20. Verwertete Futtermenge für alle Raupen. Y-Achse: links Trockenmasse, rechts Frischmasse, getrennt für Salweide und Zitterpappel. Rote Sterne=U-Test, schwarze Sterne=t-Test. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

In der Tabelle 3.6 sind die beiden Futtermassennutzungsindizes dargestellt.

Tabelle 3.6. Futtermittlungsindizes für Gabelschwanzlarven. A.D.= Verdaubarkeit. E.C.I.= die Effizienz der Futterumsetzung.

| | Futterpflanze | A.D. (basiert auf Trockenmassen)±SA | E.C.I. (basiert auf Frischmassen) ±SA |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|--|
| <i>Cerura vinula</i> n=4 | <i>Populus tremula</i> | 61±7 | 15±7 |
| <i>Cerura vinula</i> n=3 | <i>Salix caprea</i> | 11±9 | 7±5 |

Es zeigte sich auch, dass die Raupen mehr Blattmasse von den Zitterpappel verdaut haben (A.D. *Populus tremula* > A.D. *Salix caprea*) (Abbildung 3.19 und Tabelle 3.6). Auch der E.C.I. zeigt, dass von Zitterpappelblättern mehr in die Körpermasse umgewandelt wurde als von Salweideblättern. Demzufolge ist die Kotmenge bei den Raupen an Zitterpappel deutlich geringer als an Salweide. Die Unterschiede waren an dem dritten und vierten Messtermin hochsignifikant bzw. signifikant (Abbildung 3.17). Die Aufschließung und Verdauung der Nahrung war also bei den Raupen an Zitterpappel effektiver (A.D.=61).

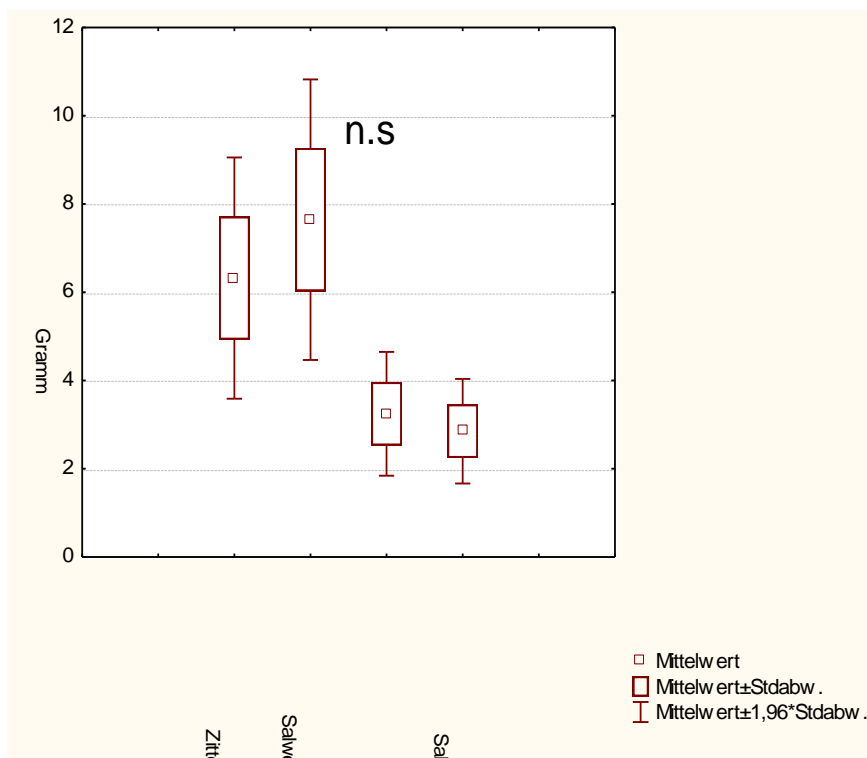


Abbildung 3.21. Die verwertete frische und trockene Blattmasse für die Raupen die sich erfolgreich verpuppt haben.

Wenn man aber die verdaute Blattmasse im gesamten Entwicklungszeitraum betrachtet kommt man zu unterschiedlichen Ergebnissen, je nachdem ob man die Trockenmasse oder die Frischmasse berechnet (Abbildung 3.21). Es liegt an den unterschiedlichen Umrechnungsgleichungen bzw. an der unterschiedlichen Feuchtigkeit der gefütterten Blätter. Die Salweidenblätter waren etwas trockener und deswegen wurde im Vergleich zu

Zitterpappel etwas mehr von der Frischmasse verwertet, aber etwas weniger im Bezug auf die Trockenmasse, wobei in beiden Fällen die Unterschiede statistisch nicht signifikant waren. Den Zusammenhang zwischen gefressener frischer Blattmasse und dem Körpergewicht zeigt Abbildung 3.22. Die Korrelationslinie für Zitterpappel verläuft steiler, was auf eine bessere Verwertung dieser Baumart hindeutet. Mit anderen Worten, die Salweidenblätter werden schlechter verdaut und deswegen brauchen die Raupen mehr davon um ähnlichen Körpermassenzuwachs zu erreichen.

Die wöchentliche Gewichtszunahme zeigt Abbildung 3.23. Interessant ist, dass die Raupen weniger Blattmasse von der Zitterpappel gefressen haben und trotzdem größere Gewichte zeigen. Aus statistischer Sicht waren die Raupengewichtsunterschiede an beiden Baumarten nicht signifikant (T-test, bzw. U-Test bei nicht normal verteilten Daten).

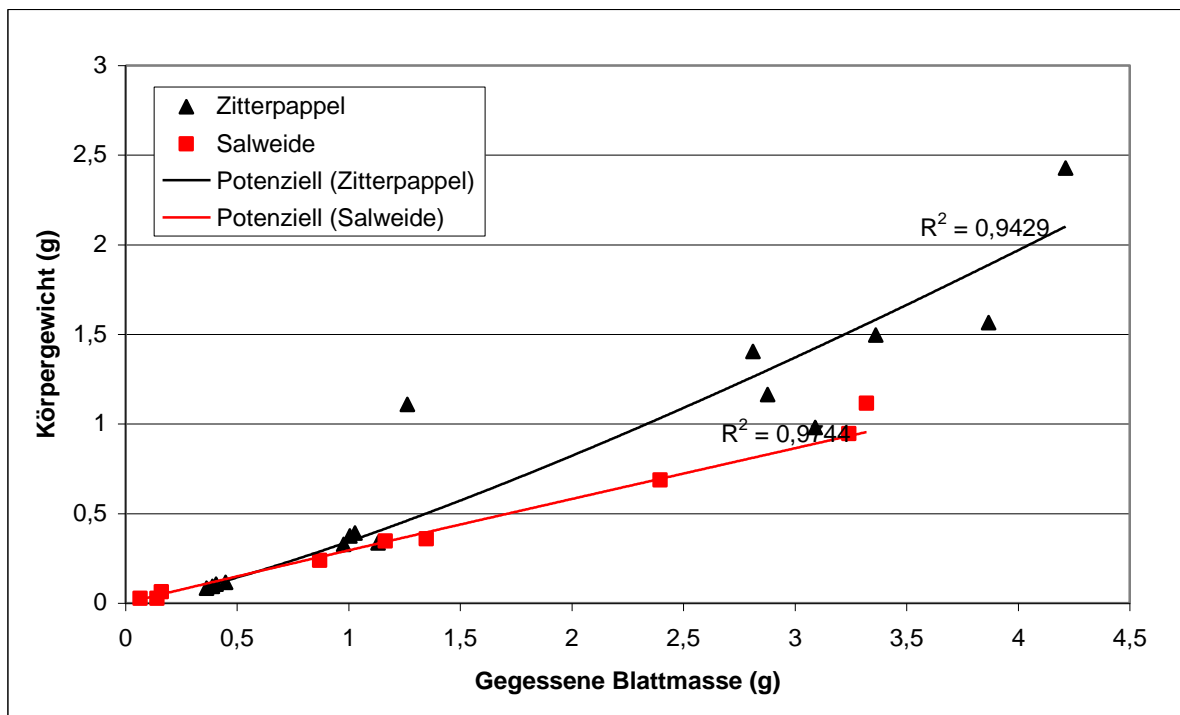


Abbildung 3.22. Die Korrelation zwischen gefressener frischer Blattmasse und dem Körpergewicht. Rot=Salweide, schwarz=Zitterpappel.

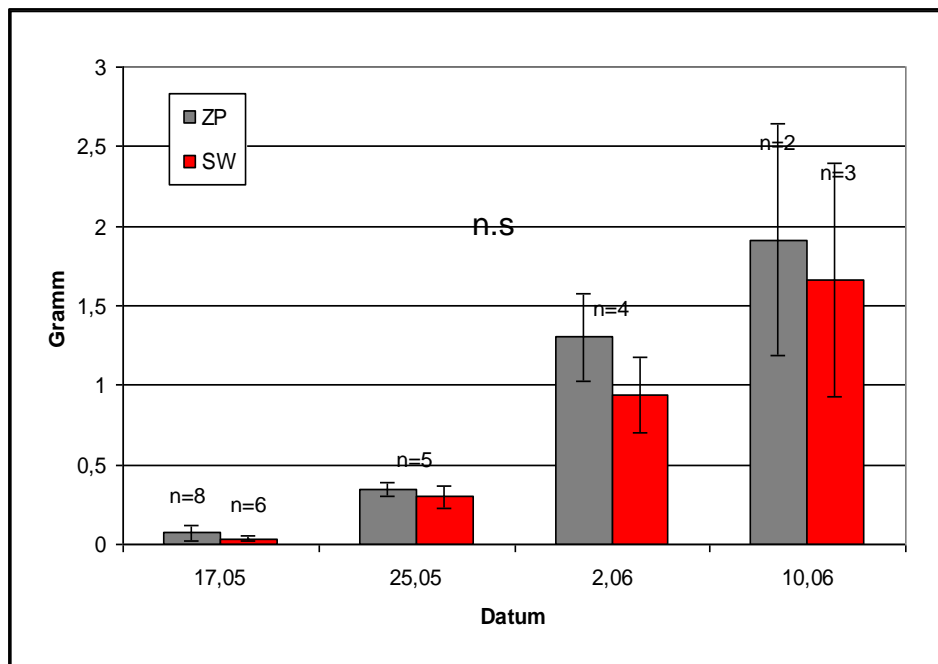


Abbildung 3.23. Raupengewichte der Laborzucht, n= Anzahl der Individuen. Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Baumarten (T-test bzw. U-Test bei nicht normal verteilten Daten).

4.5.2 Ausbindeversuch

Von 146 ausgebundenen Larven haben sich 63 erfolgreich verpuppt (Tabelle 3.7). Die Überlebensrate betrug 43%. Unter natürlichen Umständen überlebt nur ein geringer Anteil der geschlüpften Larven (Zalucki et al., 2002). Die Ursache der vielen Ausfälle (vor allem in der Exposition Zitterpappel, Sonne) waren Ameisen und Ohrenkneifer, die trotz des Klettverschlusses in die Gaze Käfige eingedrungen waren und viele Larven in den ersten Stadien (L1-L2) getötet haben. In den mittleren Überlebensraten an verschiedenen Standorten wurden statistisch signifikante Unterschiede festgestellt (χ^2 Test, $\alpha=1\%$ **) (Abbildung 3.24). Die Larvalentwicklung war erfolgreicher an Zitterpappeln im Schatten und Salweiden in der Sonne.

Tabelle 3.7. Ausbindeversuch 2006-2007 *Cerura vinula*

| | Ausgebundene Laven | | | Anzahl der verpuppten Larven | | | Prozentsatz der verpuppten Larven | | |
|------------------|--------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|-----------------------------------|---------|---------|
| | Stück | Innen | Außen | Stück | Innen | Außen | % Gesamt | % Innen | % Außen |
| ZP/Schatten | 37 | 19 | 18 | 21 | 11 | 10 | 56.8 | 57.9 | 55.6 |
| ZP/Sonne | 39 | 19 | 20 | 11 | 6 | 5 | 28.2 | 31.6 | 25.0 |
| SW/Schatten | 30 | 15 | 15 | 11 | 5 | 6 | 36.7 | 33.3 | 40.0 |
| SW/Sonne | 40 | 20 | 20 | 20 | 12 | 8 | 50.0 | 60.0 | 40.0 |
| Summe/Mittelwert | 146 | 73 | 73 | 63 | 34 | 29 | MW=42,9 | MW=45,7 | MW=40,1 |

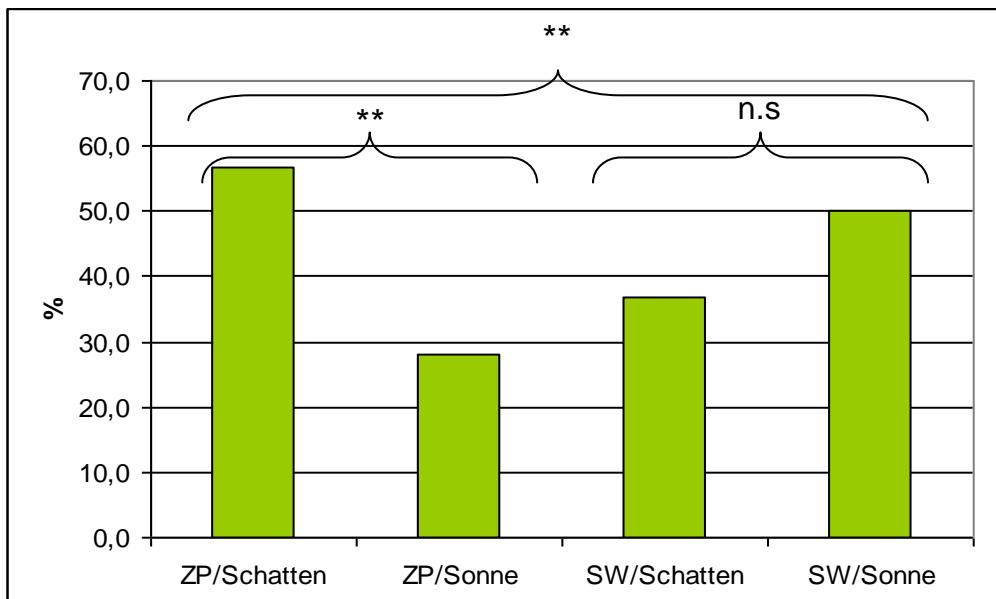


Abbildung 3.24. Ausbindeversuch 2006-2007, Prozentsatz der verpuppten Larven an unterschiedlich exponierten Bäumen. Signifikanter Einfluss des Standortes (χ^2 Test).

Die Position innerhalb der Baumkrone hat in den meisten Fällen die Überlebensrate nicht beeinflusst. Nur in der Position Salweide Sonne waren die Unterschiede zwischen der Innen- und Außenkrone statistisch signifikant (χ^2 Test, $\alpha=5\%$) (Abbildung 3.25).

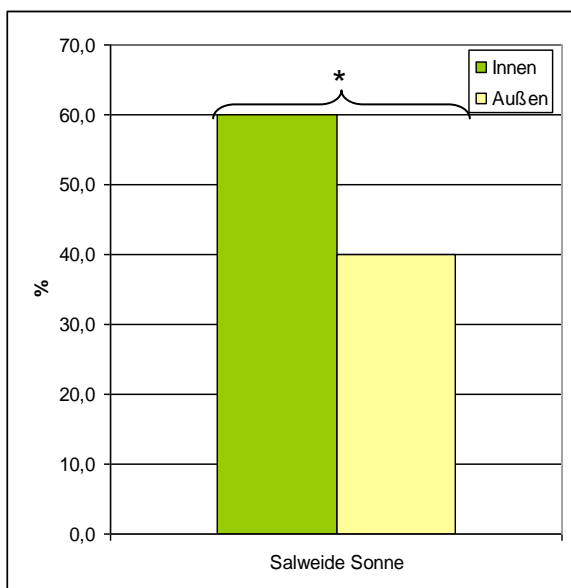


Abbildung 3.25. Einfluss der Position innerhalb der Krone auf die Überlebensrate, bzw. die Verpuppungsrate) der Raupen.

Die Entwicklung von L1 bis zur Verpuppung dauerte zwischen 47 und 62 Tagen und zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Standorten, weder im Jahr 2006 noch 2007 (t-Test, bzw. U-Test bei nicht normal verteilten Daten) (Abbildung 3.26).

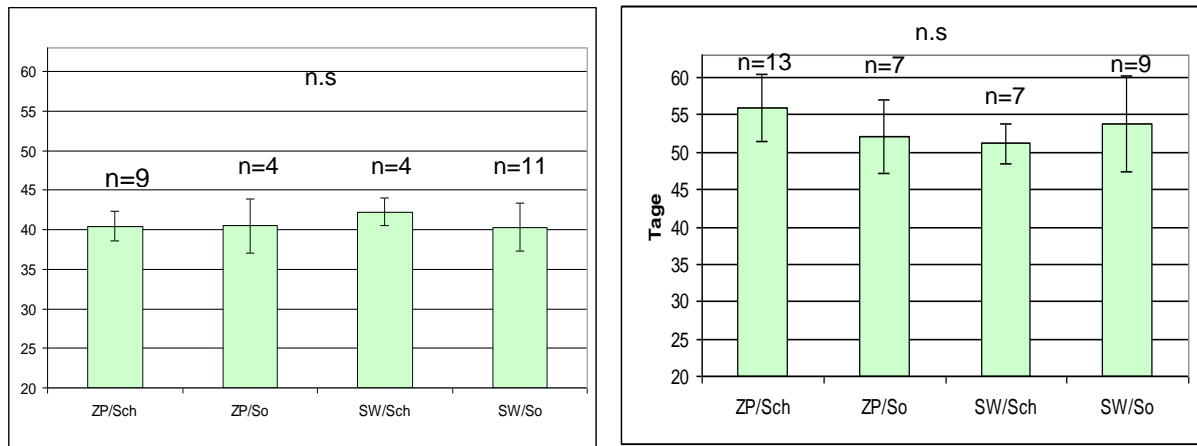


Abbildung 3.26. Entwicklungsdauer von verpuppten Larven (in Tagen). Links 2006, rechts 2007. Mittelwerte \pm Standardabweichungen.

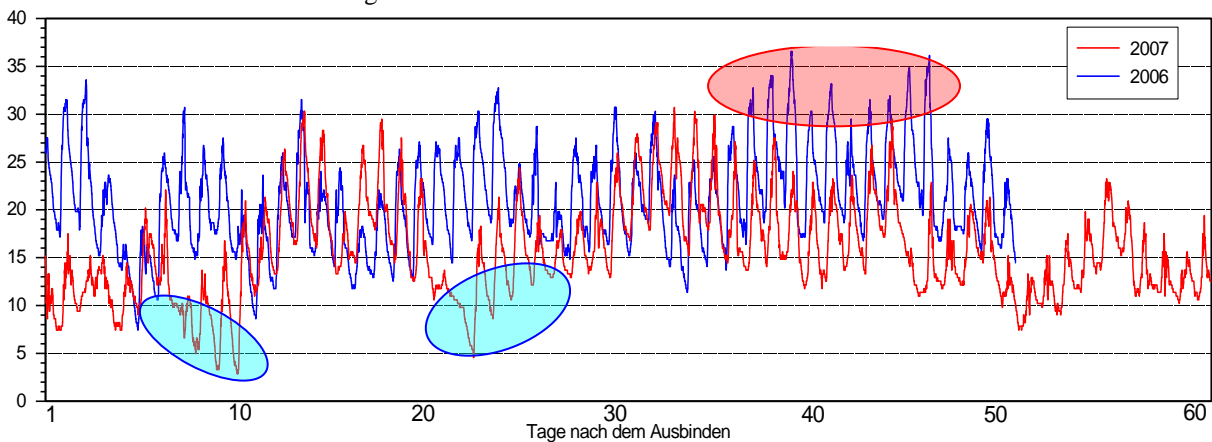


Abbildung 3.27. Temperaturverlauf während der Ausbinderversuche 2006 (03.06-30.07); 2007 (08.05-07.07). In den Kreisen: Wärmeperiode im Jahr 2006 und Kälteeinbrüche im Jahr 2007. Messabstand: 10 Minuten.

Aufgrund sehr unterschiedlicher Witterungsbedingungen in den beiden Versuchsjahren (Abbildung 3.27) müssen die Daten separat betrachtet werden. Im Jahr 2006 war es wärmer, die Temperatursumme während des Versuchs war um 10% höher, obwohl die Dauer des Experimentes kürzer war (24% mehr Temperaturminuten pro Tag). Im Jahr 2007 sank die Temperatur nachts bis unter 5°C, was für die Jahreszeit sehr kalt ist. Dagegen hatten die Raupen im Jahr 2006 einige richtig heiße Perioden mit Tagestemperaturen bis 36°C und Nachttemperaturen zwischen 15°C und 20°C. Diese warmen Bedingungen haben 2006 die Larvalentwicklung der Schmetterlinge deutlich beschleunigt. Im Jahr 2006 wurde der Versuch im Zeitraum 3. Juni bis 30. Juli und im Jahr 2007 von 8. Mai bis 7. Juli durchgeführt. Diese zeitliche Verschiebung war durch die Phänologie der Falter bedingt. Im Jahr 2006 sind sie später geschlüpft und hatten dadurch günstigere Temperaturbedingungen. Der Standort hatte weder im Jahr 2006 noch im Jahr 2007 einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer der Raupen gezeigt (Abbildung 3.28).

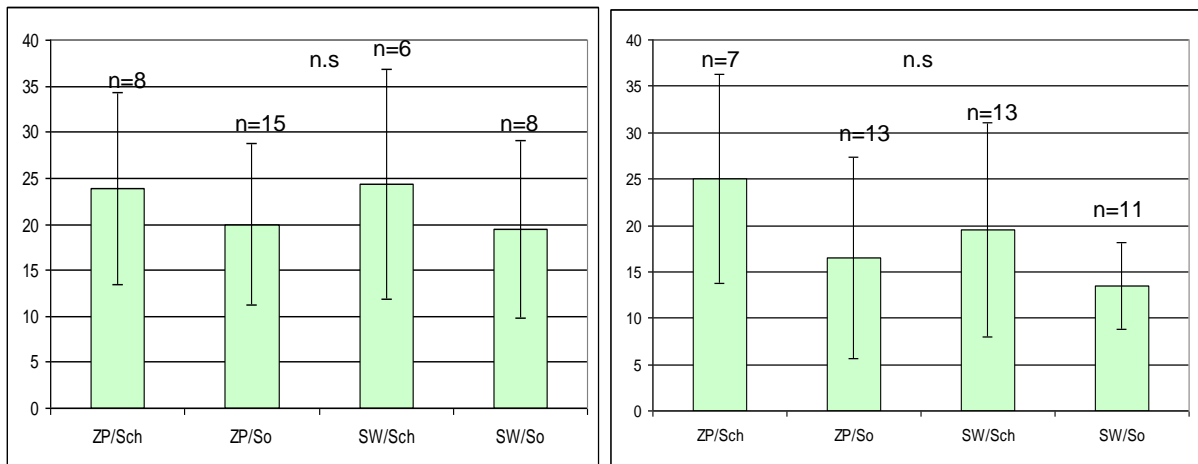


Abbildung 3.28. Lebensdauer der Raupen die nicht überlebt haben (in Tagen). Links 2006, rechts 2007; MW \pm SA.

In den beiden Versuchsjahren wurden die meisten Ausfälle (ca. 30%) während der ersten sieben bis neun Tage festgestellt. Im Jahr 2007 starben weitere 15% der Raupen nach der Kälteperiode etwa 23-28 Tage nach dem Ausbringen (Abbildung 3.29). Um die Ergebnisse für die beiden Versuchsjahre zu standardisieren wurden sog. Temperaturtage an allen Standorten berechnet. Auf diese Art war eine gemeinsame Betrachtung beider Versuchsjahre möglich. Aber auch hier ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede (Abbildung 3.30).

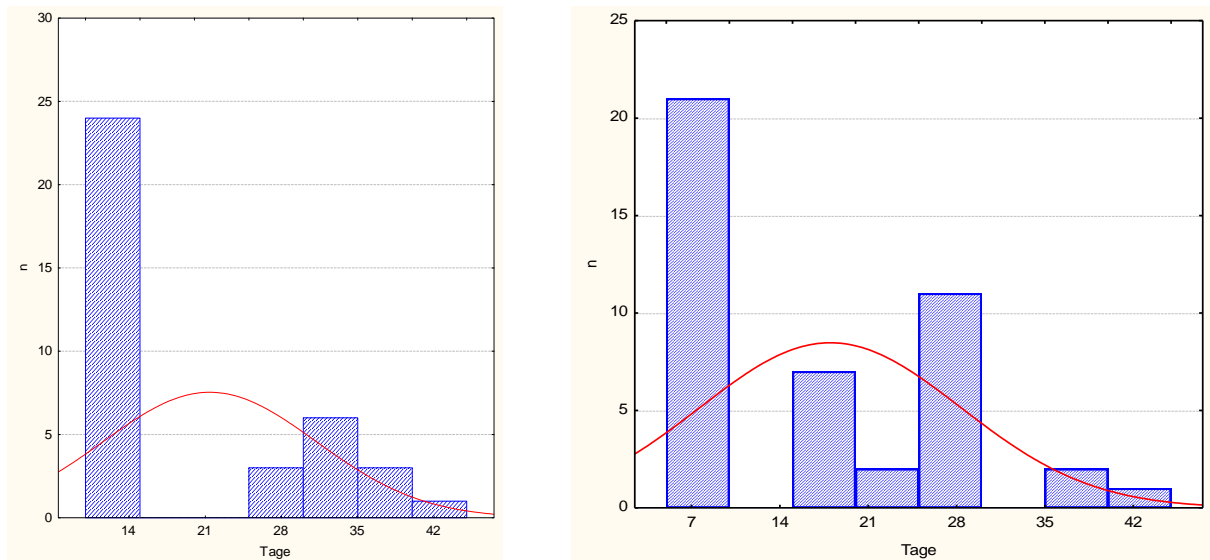


Abbildung 3.29. Todeszeitpunkt der Raupen während des Ausbindeversuchs auf allen Standorten zusammen. Links für das Jahr 2006 rechts für 2007.

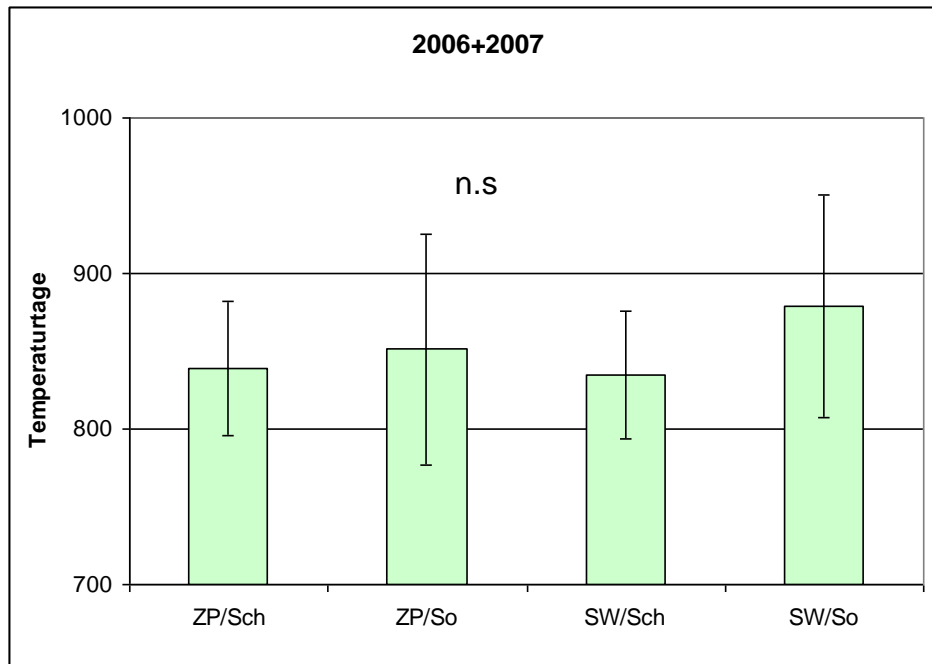


Abbildung 3.30. Temperaturtage bis zur Verpuppung an verschiedenen Standorten. MW ± SA.

5 Diskussion

5.1 REM Aufnahmen

Der Aufbau der Antenne ähnelt sehr dem des Seidenspinners *Bombyx mori* L.. An diesem Falter wurden die ersten elektrophysiologischen Geruchsuntersuchungen schon in den 1950er Jahren durchgeführt (Schneider und Hecker, 1956). Später wurden sehr genaue morphologische Untersuchungen den Sinneshaaren gemacht. Es wurde die Anzahl und die Verteilung der Sensillen auf der Antenne untersucht (Steinbrecht, 1970). Obwohl der Gabelschwanz und der Seidenspinner zu verschiedenen Familien gehören, wurden hier viele Ähnlichkeiten festgestellt. In eigenen Untersuchungen konnten nur äußere morphologische Merkmale berücksichtigt werden. Deswegen war der Vergleich mit anderen Lepidopteren-Sensillen besonders wichtig. Es wurden sechs verschiedene Sensillentypen beobachtet, welche nur den vier unten beschriebenen Typen zugeordnet werden konnten. Diese waren *S. trichodea*, *S. chaetica*, *S. basiconica* und *S. coeloconica*.

S. trichodea sind lange (30-600µm) scharf zugespitzte Haare. Normalerweise sind im Inneren Dendriten von ein bis drei Neuronen (Keil, 1999). Im Jahr 1964 zeigten TEM-Schnittaufnahmen Dendriten im Haar und weiterhin wurde eine olfaktorische elektrophysiologische Aktivität der *S. trichodea* nachgewiesen (Schneider et al., 1964).

S. basiconica sind kurze (10-80µm) Haare mit abgerundeter Spitze. Sie sind unflexibel und haben dünne Wände mit zahlreichen Poren. Sie haben vor allem eine olfaktorische Funktion.

Im Inneren befinden sich zwischen ein und 50 Dendriten von Nervenzellen. Manchmal ist die Abgrenzung zwischen *S. trichodea* und *S. basiconica* sehr unscharf (Keil, 1999).

S. chaetica sind starre Borsten, bis zu 150 µm lang und eingelenkt in einer elastischen Membran. Es sind zwar typische Mechanorezeptoren, aber selbst hier wurde auch eine Aktivität bei olfaktorischen Stimuli nachgewiesen (Städler und Hansson, 1975).

S. coeloconica sind kurze Haare (6-12µm) die zusammen in einer Grube stehen. Sie haben eine dicke Wand ohne Poren. Dendriten von bis zu fünf Nervenzellen befinden sich in einer *S. coeloconicum*. Funktionell können es olfaktorische, hygrosensorische oder thermosensorische Organe sein (Keil, 1999).

Diese vier beschriebenen Sensillentypen kommen auch bei anderen Lepidopteren häufig zusammen vor (Steinbrecht, 1970; Hallberg et al., 1994).

Die Sensillen waren beim Gabelschwanz ähnlich wie bei *Bombyx mori* angeordnet, die langen haarförmigen auf der Körbcheninnenseite und die kurzen auf der Außenseite. Die langen haarförmigen Sensillen (a,b, Tabelle 3.2) können *S. trichodeum* oder *S. chaeticum* sein. Man konnte zwar keine Wandporen sehen, dies schließt jedoch nicht die olfaktorische Funktion aus (ähnlich wie bei *Bombyx mori*). An der Antennenspitze spielen die Sensillen a und b möglicherweise eine Rolle als Mechanorezeptoren und sind so als *S. chaeticum* einzuordnen. Eine Verstärkung des olfaktorischen Sinns können auch kurze haarförmige Sensillen wie „c“ und „d“ (Tabell 3.2) gewährleisten. Ähnlich aussehende Sensillen wurden bei *Bombyx mori* zu *S. basiconica* zugeordnet. (Steinbrecht, 1970). Auch bei den Kaktusmotten *Cactoblastis cactorum* wurden ähnliche Sensillentypen beobachtet. *S. trichodea* waren hier bei Weibchen etwa 55µm lang, bei Männchen waren sie länger (Pophof et al., 2005). Das entspricht den eigenen Längenmessungen. Wesentlich kürzere *S. basiconicum* waren etwa 30µm lang und oft leicht gekrümmt (Pophof et al., 2005). Beim Gabelschwanz wurden auch kurze Sinneshaare gesichtet, die zwar nicht gekrümmt aber ähnlich groß waren. Alle Sinneshaare liegen beim Gabelschwanz tief in der Oberflächenstruktur. Deswegen konnte man die Basis der Sensille nicht sehen. Das erschwerte sowohl die Längenmessung als auch die Abschätzung der Funktion des Haares. Welche Sensillen eine olfaktorische Funktion haben bleibt ohne weitere Experimente und Schnittaufnahmen eine Vermutung. Nur wenn sie Wandporen aufweisen, können die Duftmoleküle in die Sensillenlymphe mit Proteinen (OBPs) und weiter zu den Rezeptoren in der Zellmembran der Nervenzelle diffundieren. Ein Nachweis dafür wäre ein Signal von einem Sensillum in Einzelzelleitung auf einen VOC Reiz. Dies wurde bisher am Gabelschwanz nicht gemacht aber an anderen Lepidopteren schon. Die Anwesenheit von GOBPs (General odor binding proteins) in *S. basiconica* und

PBPs (Pheromon binding proteins) in *S. trichodea* in der Sensillenlymphe deutet daraufhin, dass die *S. trichodea* die Pheromone und *S. basiconica* andere Duftstoffe aufnehmen (Hansson, 1995). Die Untersuchungen an der Kaktusmotte *Cactoblastis cactorum* bestätigen diese Rollenteilung (Pophof et al., 2005). Die letzte Sensille (f) wurde wegen morphologischen Ähnlichkeiten zu den anderen Lepidopteren-sensillen, z.B. bei *Ostrinia furnalis* (Takanashi et al., 2006) und *O. nubilalis* (Hallberg et al., 1994; Hansson, 1995) *S. coeloconica* genannt.

5.2 VOC Wahrnehmung

Die Insekten nutzen zahlreiche Rezeptorzellen um ihre Umwelt zu erfassen. Zellen die auf verschiedene chemische Signale reagieren werden Chemorezeptoren genannt. Dazu gehören sowohl olfaktorische als auch gustatorische Rezeptoren. Die beiden Rezeptortypen ähneln sich sehr, jedoch reagieren die olfaktorischen auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) und die gustatorischen auf nichtflüchtige Verbindungen und brauchen dafür Kontakt mit einem flüssigen oder festen Medium (Hodgson, 1974). Diese Arbeit beschränkt sich auf die olfaktorische Wahrnehmung der ausgewählten Falter. Die Informationen, die über dem olfaktorischen Sinn gewonnen werden, dienen nicht nur der Wirts- und Habitatfindung sondern auch der Partnersuche, innerartlicher Kommunikation und Schutzmechanismen (Hodgson, 1974). Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Habitat- und Eiablageplatzfindung.

Viele Insekten nehmen nicht nur die VOCs der Wirtspflanzen sondern auch die VOCs von Nicht-Wirtspflanzen wahr (Bernays und Chapman, 1994). Auf diese Weise können sie auch die Nicht-Wirtspflanzen identifizieren, wie z.B. der Eukalyptusbohrer *Phoracantha semipunctata*, der zwischen 110 Eukalyptuspflanzen unterscheiden kann, obwohl nicht alle Eukalyptuspflanzen von ihm besiedelt werden (Barata et al., 2000). Dieser Käfer befällt vor allem gestresste Bäume (Chararas et al., 1969). Auch die Experimente an vier Grashüpferarten und zehn Pflanzenarten zeigten, dass selbst bei den Monophagen die größten elektrophysiologischen Reaktionen nicht der Duft der Wirtspflanze sondern Lavendelduft (*Hyptis* sp.) auslöste. Alle vier Grashüpferarten reagierten am stärksten auf Lavendelduft, obwohl drei von ihnen kein Lavendel fressen (White und Chapman, 1990). Es heißt, der olfaktorische Sinn dient nicht nur der Nahrungssuche sondern liefert viel mehr Informationen über die Umwelt. So reagieren zum Beispiel viele Borkenkäfer auch auf Nichtwirtsvolatile wie Nonanal, Benzaldehyd, Linalool, Methylsalicylat und Benzylalkohol (Zhang und Schlyter, 2004). Deswegen ist die elektrophysiologische Reaktion (EAD) allein kein Hinweis

auf die Wirtspflanze. Es ist also nicht auszuschließen, dass der Große Gabelschwanz (*Cerura vinula*) noch mehr Duftstoffe, als in den EAD Experimenten nachgewiesen wurde, wahrnimmt, da im Rahmen dieser Arbeit nur die Wirtsbaum Duftspektren analysiert wurden. Weiterhin können erst anschließende Verhaltensversuche die konkrete Rolle der Duftstoffe klären.

Zwei häufige Methoden zur Untersuchung der elektrophysiologischen Aktivität der Insektenantennen sind EAG (Elektroantennogramm) und SCR (Einzelzelleableitung). Die EAG Methode leitet die elektrischen Signale von ganzen Antennen, also von allen Sensillen gleichzeitig ab. Die SCR ist selektiv und leitet Signale von einem bestimmten Sensillum ab. Die beiden Methoden wurden in einem Experiment an *Hylobius abietis* und an Fichtenduftspektren miteinander verglichen. Mit der SCR-Methode konnte man Reaktionen auf viele Terpene nachweisen, obwohl mit der EAG-Methode keine Signale bei diesen Duftstoffen zu sehen waren (Wibe, 2004). Vermutlich war dafür starkes Hintergrundrauschen im EAG-Signal verantwortlich. Die SCR-Methode ist empfindlicher, hier können schwächere Signale nachgewiesen werden. Nur wenige Stoffen lösten ein EAG Signal und kein SCR Signal aus (Wibe, 2004). Dies kann man auf die Sensibilität der Sensillen zurückführen. Nicht alle olfaktorischen Sensillen zeigen die gleiche Sensibilität gegenüber allen Stoffen (bzw. Stoffgruppen), wie sich ja auch in dieser Arbeit zeigte (Tabelle 3.3). Wie hoch die Antworten auf verschiedene Duftstoffe sind, hängt davon ab, welche Sensillentypen gerade gereizt werden. Beim Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata* L.) wurden olfaktorische Sensillen in fünf Gruppen eingeteilt, zwei davon zeigten deutliche Reaktion auf die Grünblattdüfte und eine Gruppe reagierte besonders sensibel auf Methylsalicylat (Ma und Visser, 1978). Beim Großen Gabelschwanz wurden keine SCR-Messungen durchgeführt, daher weißt man nicht, wo sich die besonders selektiven Sensillen befinden. Um die beste Vergleichbarkeit der erfassten Daten zu gewährleisten, wurde im EAD immer der gleiche Abschnitt der Antenne getestet.

Der Große Gabelschwanz (*Cerura vinula*) ist in der Lage, viele Duftstoffe aus verschiedenen Stoffgruppen wahrzunehmen. Eine recht große Gruppe bilden hier die Grünblattdüfte (Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat und 2-Ethyl-hexan-1-ol). Diese Duftstoffe werden von vielen Insekten aus verschiedenen Ordnungen wahrgenommen. Sowohl Lepidoptera als auch Hymenoptera, Hemiptera, Diptera und Coleoptera riechen diverse C6 Verbindungen (Bruce et al., 2005).

(Z)-3-Hexen-ol und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wurden nicht nur in den grünen Teilen der Pflanzen, sondern auch in den Blütenständen von *Salix repens* gefunden. Vor allem in

weiblichen Blüten war ein hoher Anteil an (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat vorhanden (Tollsten und Knudsen, 1992). (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wurde in vielen anderen Blütendüften identifiziert (Kaiser, 1991). Jedoch zum Zeitpunkt der Flugaktivität des Gabelschwanzes (*Cerura vinula*) sind keine Weidenblüten mehr zu sehen und zu riechen, deswegen kann man davon ausgehen, dass der Falter sich nur nach dem Blattgeruch orientieren muss. Er ist darauf angewiesen mit Hilfe seines Geruchsvermögens ein passendes Blatt als Eiablageplatz zu finden. Die Anwesenheit der anderen Blattfresser macht die Suche und die Entscheidung umso komplizierter, weil einige Grünblattdüfte nur nach dem Insektenfraß emittiert werden (Takabayashi et al., 1991; McCall et al., 1994; Loughrin et al., 1996). Mit der Frage, wann und in welcher Menge die Grünblattdüfte unter Laborbedingungen ausgesendet werden, haben sich schon einige Autoren befasst (McCall et al., 1994; Ruther, 2000). Je nachdem, ob die Blätter verletzt oder intakt sind, ob die Wunden frisch oder alt sind, variiert die Menge und die Zusammensetzung der Duftstoffe. Bei der zeitlichen Betrachtung ist Vorsicht geboten. Jeder Autor definiert für seine Experimente, wie lange eine Verletzung „frisch“ ist und wann sie als „alt“ betrachtet wird. Das macht Vergleiche schwierig. Bei Ruther (2000) wird eine Verletzung an Hainbuchenblättern (*Carpinus betulus*) nur für den Zeitraum von einer Stunde als „frisch“ bezeichnet. Anders wurde es bei McCall et al. (1994) definiert. Hier wurde die Verletzung noch bis zwei Stunden nach der Verletzung als „frisch“ benannt. Auch die Art der Verletzung (mechanische oder durch Raupenfraß) hat Einfluss auf die Emission der Duftstoffe. Nach der mechanischen Verletzung der Hainbuchenblätter (*Carpinus betulus*) waren die Emissionen von Hexenal, (Z)-3-Hexenal, (E)-3-Hexenal, (Z)-2-Hexenal, (E)-2-Hexenal und (Z)-3-Hexen-1-ol in den ersten zehn Minuten deutlich höher als nach einer Stunde. Nach dem schnellem Wundverschluss blieben nach einer Stunde nur noch recht hohe Emissionen von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und weniger von (Z)-3-Hexen-1-ol (Ruther, 2000). Dagegen wurden bei der Baumwollpflanze *Gossypium hirsutum* L. nach einem etwa zwei Stunden langen Raupenfraß von *Helicoverpa zea* (hier „frische Verletzung“ genannt), sämtliche Terpene (z.B. α -Pinen, β -Pinen, Myrcen und (E)- β -Caryophyllen) emittiert. Doch wurden die Emissionen nach 15 Stunden Raupenfraß nicht geringer, wie bei Ruther (2000), sondern stattdessen für folgende Stoffe signifikant höher : (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, Hexylacetat, (E)- β -Ocimen, (3E)-4,8-Dimethyl-1,3,7-nonatrien, (Z)-3-Hexen-1-yl-butytrat, (E)-2-Hexen-1-yl-butytrat, (Z)-3-Hexen-1-yl-2-methylbutytrat, (E)-2-Hexen-1-yl-2-methylbutytrat und Indol (McCall et al., 1994). Drei von den genannten Stoffen (Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und (Z)-3-Hexen-1-yl-butytrat) sind für den Gabelschwanz im EAG wahrnehmbar. Es wurde schon festgestellt, dass sowohl Trockenstress als auch Salzstress die

Emission von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat bei den Pappeln (*Populus x canescens*) reduziert (Paczkowska et al., 2006). Es ist denkbar, dass der Große Gabelschwanz einerseits dadurch eine Konkurrenzart auf der Blattoberfläche wahrnehmen kann und andererseits die vitalen Bäume von den durch Stress geschwächten Bäumen unterscheidet.

Die Gabelschwanzfalter haben eine relativ kurze Lebenszeit, deswegen mussten alle EAD- und EAG-Messungen in einem kurzen Zeitfenster durchgeführt werden. Der Schlüpftermin der Falter konnte durch eine verlängerte Kaltlagerung nicht länger als vier Wochen künstlich verzögert werden. Wichtig war auch, dass die Antennen des Falters (bzw. die Rezeptoren) einen Reifungsprozess benötigen, um eine maximale physiologische Leistung zu zeigen. Bei anderen Lepidopteren (*Manduca sexta* und *Pseudaletia unipuncta*) wurde die Zeit der maximalen elektrophysiologischen Reaktion experimentell nachgewiesen. Bei *Manduca sexta* waren es je nach Duftstoff zwischen zwei oder vier Tage (Seabrook et al., 1979). Bei *Pseudaletia unipuncta* lag die Zeit der morphologischen und physiologischen Reife der Antennen bei 15 bis 16 Tagen (Sanes und Hildebrand, 1976a, b; Schweitzer et al., 1976). Diese Tatsache ist eine plausible Erklärung für eine geringe Falteraktivität direkt nach dem Schlupf. Die besten Ergebnisse in den hier gezeigten Experimenten lieferten zwei bis vier Tage alte Falter. Ältere Falter oder Weibchen nach der Eiablage zeigten geringere elektrophysiologische Aktivität.

Bei vielen Insektenarten beobachtet man Geschlechtsdimorphismus, der sich oft in der Antennenmorphologie äußert. Bei vielen Falterarten haben Männchen größere und stärker gefiederte Fühler. Solche Antennen mit riesiger Oberfläche können sehr effizient Duftmoleküle aus der Luft filtern. Jedoch richtet sich die Spezialisierung des Geruchsorgans nach den Aufgaben, die jedes Geschlecht zu erfüllen hat. Bei den meisten Lepidopteraarten müssen die Männchen möglichst schnell ein Weibchen finden und es befruchten. Das tun sie in der Regel mittels der Pheromonwahrnehmung. Das Weibchen muss nach dem Befruchten einen optimalen Eiablageplatz finden. Damit die Partnersuche und die Eiablageplatzsuche möglichst schnell geschehen macht es Sinn, dass beide Geschlechter ihr gemeinsames Habitat finden. Deswegen wurde die Problematik der Habitatfindung auch an männlichen Tieren untersucht. Auch beim Gabelschwanz ist der Geschlechtsdimorphismus in der Antennenmorphologie sichtbar. In dieser Arbeit wurden auch geschlechtsbezogene Unterschiede in der Empfindlichkeit der Antennen untersucht. Die EAD-Ergebnisse für weibliche und für männliche Falter wurden gegenüber gestellt. Es zeigten sich deutliche Unterschiede, obwohl bei der Antwortintensität der weiblichen und männlichen Gabelschwänze auf den (Z)-3-Hexen-1-ol Standard in 10^{-3} Konzentration keine signifikanten

Unterschiede festgestellt wurden. Die Intensität der sonstigen EAD-Signale war beim Gabelschwanz bei beiden Geschlechtern gleich aber die Häufigkeit der Reaktionen auf getestete Duftstoffe war unterschiedlich für beide Geschlechter. Als Vergleich reagierten z.B. bei Wanzen (*Lygocoris pabulinus*) reagierten weibliche Tiere stärker auf bestimmte Duftstoffe (Hexan-1-ol, Heptan-1-ol, 1-Octen-3-ol, Heptan-2-on, (R)-Carvone, Linalool, Geraniol, Nerol, und Methylsalicylat), obwohl die männlichen Antennen zweimal stärkere Signale auf den Standard (E)-2-Hexenal zeigten (de Groot et al., 1999).

Der Gabelschwanz hat einen sehr empfindlichen Geruchssinn im Vergleich zur Kastanienminiermotte *Cameraria ohridella*, die mit der gleichen Methodik wie in der vorliegenden Arbeit untersucht wurde. Diese kleine Motte zeigte keine signifikanten Antennenreaktionen, wenn die Duftstoffverdünnung geringer als 10^{-5} (g/g) in Paraffinöl war. Bei Benzylalkohol und Methylsalicylat beobachtet man den Anstieg der Dosis-Antwort Kurve ab einer Verdünnung von 10^{-5} (g/g) in Paraffinöl (Johne et al., 2008). Der Gabelschwanz konnte diese beiden Stoffe (Methylsalicylat und Benzylalkohol) und noch drei weitere (Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-ol und Linalool) sogar in der Verdünnung 10^{-7} (g/g) in Paraffinöl riechen. Die Reaktionen auf die Grünblattdüfte (Z)-3-Hexen-1-ol und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat beginnen beim Gabelschwanz sehr früh im Vergleich zum Blattkäfer *Phratora vulgatissima*. Dieser Käfer reagierte signifikant auf (Z)-3-Hexen-1-ol bei einem Impuls von 100µg, was in etwa der Verdünnung 10^{-2} (g/g) in Paraffinöl entspricht. Auf (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat reagierte *Phratora vulgatissima* etwas empfindlicher und zwar ab 10µg (also ab einer Verdünnung von 10^{-3} (g/g) in Paraffinöl) (Fernandez et al., 2007). Nach diesen Erkenntnissen wird vermutet, dass der Gabelschwanz mit seinem empfindlichen Geruchssinn sehr präzise und gezielt sein Habitat findet. Selten wird die Wirtspflanze anhand von einem einzelnen Kairomon gefunden und erkannt, viel häufiger spielt auch die Kombination von mehreren nicht artspezifischen Duftstoffen wie z.B. Grünblattvolatilen (Bruce et al., 2005) eine Rolle. Auch der Gabelschwanz braucht eine Reihe von komplexen Informationen um sich für eine Wirtspflanze bzw. Eiablageplatz zu entscheiden.

5.3 Verhaltensversuche

Die Verhaltensversuche wurden in drei unterschiedlichen Experimenten getestet. Im kleinen Gazekäfig wurde die Nahorientierung des Falters untersucht. Hier wurde die Wirkung der einzelnen Duftstoffe beobachtet. Im Versuch für die Mittelbereichsorientierung wurden im großen Käfig die ganzen Pflanzen mit einem Duftzusatz getestet. Im Gewächshaus hatten die Falter mehrere unterschiedlich exponierte Bäume zur Auswahl. Hier spielten viele Faktoren

eine Rolle. Sowohl optische als auch olfaktorische und gustatorische Sinne waren hier im Spiel. Man konnte auch nicht alle Störfaktoren (Luftströmung, Geruchsquellen von ausserhalb, Kunstlicht, VOCs aus der Blumenerde) ausschließen.

Es wurde schon nachgewiesen, dass viele andere Insektenarten, wie z.B. Kartoffelkäfer (Schütz et al., 1997), parasitische Wespen (Smid et al., 2002; Chen und Fadamiro, 2007) und Schmetterlinge (Anderson et al., 2000; Johne et al., 2006) sich nach Grünblattdüften (GLOs-Green Leaf Odours) orientieren. Die Grünblattdüfte spielen sehr unterschiedliche Rollen bei der Orientierung von Insekten. Manchmal wirken sie anziehend (Visser und Ave, 1978; Schütz et al., 1997) oder erhöhen die Attraktivität von Pheromonen (Dickens et al., 1990; Light, 1993) und manchmal hemmen sie die Antwort auf Sexuallockstoffe (de Groot und MacDonald, 1999) oder dienen direkt der Partnerfindung (Ruther et al., 2000). Eine durch Larvenfraß (*Heliothis virescens*) erhöhte Emission von (Z)-3-Hexen-1-ol, (Z)-3-Hexen-1-ylacetat und Linalool wirkt repellent für die adulten Weibchen der gleichen Art, die ebenfalls nach einem Eiablageplatz suchen (De Moraes et al., 2001) und wirkt gleichzeitig attraktiv für die Parasitoide der Larven (De Moraes et al., 1998). Von den vielen elektrophysiologisch aktiven Substanzen wirkten beim Gabelschwanz Weibchen vier Stoffe (Nonanal, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol) und bei den Männchen nur einer ((Z)-3-Hexen-1-ol) bei der Nahbereichsorientierung attraktiv. Repellente Wirkung konnte man auf Hexylacetat und Methylsalicylat bei den Männlichen Faltern feststellen. Für einen anderen sehr ausführlich untersuchten Falter *Bombyx mori* sind (Z)-3-Hexen-1-ol und (E)-2-Hexenal attraktiv (Watanabe, 1958).

Ein weiterer Aspekt, der bei den Verhaltensversuchen zu beachten ist, sind Hintergrundgerüche. Diese können das Verhalten und die EAG-Signale der Insekten beeinflussen. Dies betrifft vor allem die Tiere die lange vor dem Experiment im Labor gehalten wurden. Möglicherweise gewöhnen sich ihre Riechrezeptoren an geringe Konzentrationen von Duftstoffen und reagieren anders als „frische“ Insekten (Ziesmann et al., 2000). Auch die Hintergrundkonzentration von Kohlenstoffdioxid (CO₂) kann die Reaktionen auf Duftstoffe beeinflussen wie sowohl bei der Schmetterlingsfamilie Pieridae (Bogner, 1990) als auch bei Termiten (Ziesmann, 1996) nachgewiesen werden konnte. Nach den eigenen Verhaltensversuchen wurde auch eine Raumluftanalyse durchgeführt. Hier wurden geringe Mengen der getesteten Stoffe gefunden (Nonanal und Benzaldehyd, dass nach der Oxidation von Benzylalkohol entstehen kann). Jedoch waren die Mengen dieser Duftstoffe deutlich geringer als in den Baumduftproben. Da aber die Falter ein kurzes Leben haben (Templin,

1955) und vor dem Versuch nicht im Labor sondern im Zuchtraum gehalten wurden kann man diesen Störfaktor als marginal betrachten.

Bei einigen Insekten zeigte nicht ein Duftstoff sondern ein Duftstoffgemisch eine anziehende Wirkung. Wie z.B. beim Kartoffelkäfer, der im Windkanal vom Geruch der Kartoffelpflanze angezogen wird, nicht aber von den einzelnen Grünblattdüften (Z)-3-Hexen-1-ol, (E)-3-Hexen-1-ol, (Z)-2-Hexen-1-ol, (E)-2-Hexenal, (E)-2-Hexen-1-ol, Linalool, Hexan-1-ol, Hexan-2-ol oder Hexan-3-ol. Im modifizierten Versuch, wo eine Kartoffelpflanze gegen eine andere Kartoffelpflanze mit zusätzlichem Duftstoff getestet wurde, zeigten folgende Grünblattdüfte eine signifikant anziehende Wirkung: (E)-3-Hexen-1-ol (10^{-4} und 10^{-3}), (Z)-2-Hexen-1-ol, (E)-2-Hexen-1-ol und (E)-2-Hexenal. Dieses Experiment zeigte, dass hier eher ein Duftstoffgemisch und nicht ein einziger Stoff wichtig für olfaktorische Orientierung ist (Visser und Ave, 1978). Möglicherweise kann man auch beim Gabelschwanz noch mehr attraktive Stoffe identifizieren indem man sie in Kombinationen oder mit den Wirtspflanzen testet. Diese Methode wurde im Versuch für die Mittelbereichsorientierung angewandt. Es fand aber keine Dauerbeobachtung statt und die Anzahl der abgelegten Eier war sehr gering. Im Verhaltensversuch für den Nahorientierungsbereich konnten wegen der Käfiggröße keine ganzen Pflanzen getestet werden, doch wurden die Duftstoffe auf ein Pappelblatt gelegt wodurch hier ebenfalls ein Duftgemisch entstand.

Die hier gezeigten Experimente beweisen, dass der Gabelschwanz auch auf Aldehyde wie Nonanal und Decanal reagiert. Die beiden Aldehyde wurden in den stark verbräunten Blättern mit deutlichen Grünmasseverlusten festgestellt und gelten als sog. Seneszenzmarker (Schütz, 2001; Johne et al., 2006). Für Gabelschwanz-Weibchen waren beide Aldehyde im getesteten Verdünnungsbereich 10^{-3} (g/g) attraktiv. Auch eine andere Motte (*Cactoblastum cactorum*) reagierte auf Nonanal mit Zuneigung (Pophof et al., 2005). Zwei weitere für die Gabelschwanz-Weibchen attraktive Stoffe, Methylsalicylat und Benzylalkohol, wurden in Kastanienblättern mit Pilzbefall nachgewiesen und es wurde weiterhin nachgewiesen, dass diese beiden Stoffe zur Reduzierung der Eiablage bei der Kastanienminiermotte führen (Johne et al., 2006; Johne et al., 2008). Dank der Wahrnehmung von Methylsalicylat, Benzylalkohol und den beiden Aldehyden könnte der Gabelschwanz die etwas weniger vitalen Bäume mit geschwächten Abwehrkräften auffinden. Diese Substanzen sind auch wichtig für die Abschätzung des Alters der Pflanze. Es wurde schon nachgewiesen, dass ausgewachsene Kartoffelpflanzen attraktiver als Jungpflanzen sind (Visser, 1976). Ob dieser Zusammenhang auch für Salweiden und Zitterpappeln gilt, hat man bisher nicht untersucht.

Die Gabelschwanzfalter haben eine relativ kurze Lebenszeit und diese Tatsache hat es deutlich erschwert repräsentative Ergebnisse in den Verhaltensversuchen zu erreichen. Direkt nach dem Schlüpfen waren die Falter passiv und zeigten keine Reaktionen. Erst ab dem zweiten Tag konnte man Verhaltensexperimente durchführen. Aber nach vier Tagen ließen die Reaktionen wieder nach. Nachdem die Weibchen ihre Eier abgelegt haben zeigten sie sehr geringe Aktivitäten.

Nach all den Erkenntnissen merkt man, wie komplex die Aufgabe des Falters ist, einen optimalen „Wohnort“ für seine Nachkommen anhand von einem Duftbuket zu finden. Der Große Gabelschwanz nutzt dafür seine Fähigkeit viele Volatile aus verschiedenen Stoffgruppen sowie deren Konzentrationen und Zusammensetzung zu erkennen.

5.4 Larvalentwicklung

Insektenlarven sind kleine „Fressmaschinen“ und ganz besonders die Schmetterlingsraupen. Sie müssen genug Nahrung aufnehmen, um die Häutungsperioden zu überstehen und oft, wie beim Gabelschwanz, genug Energie für das Adultstadium, das keine Nahrung zu sich nimmt, zu speichern (Backhaus et al., 1995). Deswegen sind Futtermenge und die Futterqualität entscheidend für deren Entwicklungserfolg. Sowohl der Ausbindeversuch als auch der Labor-Fütterungsversuch beziehen sich auf die Larvalentwicklung des Gabelschwanzes und werden deswegen in diesem Kapitel zusammen betrachtet und verglichen. Die Überlebensraten der Raupen waren sowohl im Freiland (etwa 40%) als auch im Labor (35%) relativ hoch (Mortalität etwa 60%). Nach Lebenstafel-Experimenten im Labor an 105 Lepidopteren Arten wurde festgestellt, dass durchschnittlich 41% der Eier und 54% der L1-Larven sterben, wobei die L1-Mortalität oft unterschätzt und Eimortalität überschätzt wird (Zalucki et al., 2002). In Vergleichsexperimenten mit *Danaus plexippus*, wo die Falter im Freiland und im Labor gezüchtet wurden, stellte man fest, dass die Mortalität des L1 Stadiums von 66-82% im Labor auf 88-97% im Freiland gestiegen ist (Zalucki and Brower, 1992). Bei Zalucki et al. (2002) wurden verschiedene Arten in Gruppen mit ähnlicher Ökologie (Eiablageverhalten, Art der Ernährung und Spezialisierung) zusammengefasst. In den Gruppen, in die man den Gabelschwanz (*Cerura vinula*) einordnen konnte, betrug die Mortalitäten der L1-Larve zwischen 43% und 53%. In den eigenen Experimenten sollte die Gefahr durch Antagonisten ausgeschlossen werden, denn gerade dieser Faktor wird als häufigste Mortalitätsursache im Freiland genannt. Dies ist jedoch umstritten, weil nur in wenigen Fällen direkte Beobachtungen, die eindeutig auf Räuber hinweisen, durchgeführt worden sind. Meistens wurde ein Verschwinden von Larven als Räuberangriff interpretiert. In

Laborversuchen konnte man die Räuber sicher von den Raupen fernhalten, was sich im Freiland als unmöglich gezeigt hat. Trotz aller Maßnahmen (Klettverschluss und Klebeband) sind Ameisen und Ohrenkneifer in die Netze eingedrungen. Teilweise wurden die Netze sogar durchgebissen. Eher unwahrscheinlich sind Parasitisierung und Angriffe durch Vögel. Die Raupen im Labor entwickelten sich in einer künstlichen Umgebung, wurden von Menschen berührt und litten deswegen sicher unter Stress, der sich auf die Mortalität auswirkte. Die Raupen im Freiland hatten dagegen im Vergleich zu ihren frei lebenden Artengenossen weniger Rückzug- und Versteckmöglichkeiten gegen ungünstige Wetterlagen wie Regen oder Wind.

Das Experiment im Labor dauerte deutlich weniger lang als das im Freiland. Vermutlich lag das an den konstanten Temperaturbedingungen, die eine bedeutende Rolle bei der Entwicklungsdauer spielen (Hintze, 1970). In beiden Fällen wuchsen die Raupen unter Langtagbedingungen auf. Das Wachstum wurde also nicht durch Dauerlichtbedingungen gehemmt (Hintze, 1970).

Die Raupen sind oligophag und fressen entweder Pappel- oder Weidenblätter. Im Labor hatten die Raupen kein Problem damit wenn man ihnen zwei Baumarten nacheinander angeboten hat. Sie haben beide Nahrungsquellen akzeptiert. Dagegen ist im Freiland ein Wirtsbaumwechsel eher unwahrscheinlich. In den beiden Versuchen sollten Qualitätsunterschiede zwischen den beiden Wirtspflanzen und im Freiland zusätzlich die standörtlichen Bedingungen untersucht werden. Eine sehr genaue Untersuchung der Nahrungsverwertung anhand der Kotabgabe wurden von Hintze (1970) durchgeführt. Hier wurde die Kotmenge alle vier Stunden unter verschiedenen Temperaturbedingungen bestimmt aber es wurde nicht zwischen den Wirtspflanzen bzw. der Futterqualität unterschieden. Alle Raupen bekamen Schwarzpappelblätter (*Populus nigra*) zu fressen. Die größte Kotabgabe erfolgt im L5 Stadium obwohl nur im ersten Viertel dieses Stadiums gefressen wird (Hintze, 1970). Die gesamten Kotmengen belaufen sich bei Hintze (1970) auf etwa 10-11g. In den eigenen Experimenten waren es 1,5g für Zitterpappel und 4g für Salweide (Abbildung 3.23). Zum Teil kann man diese Differenz mit der Tatsache erklären, dass die Kotbälle bei Hintze (1970) nicht getrocknet waren. Sie wurden zwar als relativ trocken bezeichnet und deren Feuchtigkeitsgehalt wurde auf 10% geschätzt, aber eigene Experimente weisen auf höhere Feuchtigkeitswerte (35-40%) hin. Man sieht große Unterschiede in der Kotmenge zwischen beiden Baumarten. Möglicherweise hat sowohl die Futterqualität als auch deren Feuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die ausgeschiedene Kotmenge aber nicht unbedingt auf das Körpergewicht der Raupe. Sowohl in eigenen Experimenten als

auch in ähnlichen Ausbindeversuchen von Damm (2003) waren die Körpergewichte der Raupen nicht größer als 2,5g. Bei tieferen Temperaturen (18°C) wird im Vergleich zu höheren Temperaturen (25°C bis 30°C) weniger gefressen, aber ein größerer Anteil der gefressenen Nahrung wird in Körpersubstanz umgewandelt. Die eigenen Ergebnisse bei Temperaturen von 22±2°C sollten zwischen den beiden Versuchsvarianten von Hintzepo (1970) liegen. Dies ist aber auf Grund der unterschiedlichen Nahrungsqualitäten nicht der Fall. Viele andere Autoren haben beobachtet, dass der quantitative Futterbedarf sehr von der Qualität der Nahrung abhängt (Tabelle 4.1.) Auch der A.D.-Index weist auf die Verdaulichkeit der Nahrung hin. Dieser Index ermöglicht, unabhängig von der Larvengröße und Larvalentwicklungszeit, die Verdaulichkeit verschiedener Futterarten zu vergleichen. Es ist auch möglich diesen Index in kurzer Zeit, z.B. für ein Larvalstadium, zu ermitteln. Der zweite berechnete Index (E.C.I.) sagt aus, wie viel von dem gefressenem Futter in Körpermasse umgewandelt wird. Der Rest wird entweder unverdaut ausgeschieden oder in Energie umgewandelt. Jedoch sagt sowohl der A.D.- als auch der E.C.I. Index nichts über den absoluten Nahrungsbedarf der Arten aus. Dieser wurde für einige forstliche Schadinsekten ermittelt (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1. Absoluter Nahrungsbedarf der Larvalstadien verschiedener Schmetterlingsarten;
^a anhand der Quelldaten errechnet

| Falterart | Futterpflanze | Frischmasse | Autor |
|--------------------------|---------------|-------------------|------------------------------|
| <i>Lymantia monacha</i> | Fichte | 3-6g | (Niemeyer, 1998) |
| | Kiefer | 6-8g | (Niemeyer, 1998) |
| <i>Dendrolimus pini</i> | Kiefer | 38g | (Niemeyer, 1998) |
| | Kiefer | 25-35g | (Szujecki, 1998) |
| <i>Panolis flammea</i> | Kiefer | 7-8g | (Niemeyer, 1998) |
| <i>Bupalus piniarius</i> | Kiefer | 3,5g | (Szujecki, 1998) |
| <i>Lymantia dispar</i> | Zitterpappel | 7,6g ^a | (Hemming und Lindroth, 1999) |

Tabelle 4.2. Futterverwertungsindices für Lepidoptera; ^a an Trockenmassen berechnet; ^b an Frischmassen berechnet; ^c basiert auf Nettogewichtszunahme, Exuvien in der Kotmasse; ^d für L5 und L6 gerechnet; ^e Futter mit verholzten Zweigen gewogen; ^f nur für L5; ^g 24h an letztem Larvalstadium gemessen

| Falterart | Familielie | Futterpflanze | A.D | E.C.I | Quelle |
|----------------------|--------------|------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| <i>Cerura vinula</i> | Notodontidea | <i>Populus tremula</i> | 61 ^a | 15 ^b | Eigene Messung |
| <i>Cerura vinula</i> | Notodontidea | <i>Salix caprea</i> | 11 ^a | 7 ^b | Eigene Messung |
| <i>Hypantiria</i> | Arctidae | <i>Acer negundo</i> | 22 | 12 ^c | (Balogh und Gere, 1953) |

| | | | | | |
|--------------------------|--------------|------------------------|-----------------|-----------------|---|
| <i>cunea</i> | | | | | |
| <i>Hypantiria cunea</i> | Arctidae | <i>Malus pumila</i> | 31 | - | (Nagy, 1953) in (Waldbauer, 1968) |
| <i>Bombyx mori</i> | Bombycidae | <i>Morus alba</i> | 37 | 23 | (Hiratsuka, 1920) in (Waldbauer, 1968) |
| <i>Lymantria monacha</i> | Lymatridae | <i>Fagus sp.</i> | 29 ^d | - | (Sattler, 1939) ^e |
| <i>Lymantria monacha</i> | Lymatridae | <i>Alnus</i> | 21 ^d | - | (Sattler, 1939) ^e |
| <i>Prodenia eridania</i> | Noctuidae | <i>Morus alba</i> | 50 ^f | 21 ^f | (Hoo and Fraenkel, 1966) |
| <i>Phalera bucephala</i> | Notodontidae | <i>Carpinus betula</i> | 35 ^g | - | (Evans, 1939) |

So wurde zum Beispiel bei dem wichtigem Forstschädling *Lymantria monacha* ein Bedarf von 3-6g Fichtennadeln und 6-8g Kiefernadeln gemessen (Niemeyer, 1998). Ein anderer Schädling *Dendrolimus pini* frisst 38g (Niemeyer, 1998) bzw. 25-35g (ca. 1000 Stück) Kiefernadeln (Szujewski, 1998). Seine Hauptfraßphase (97% der gefressenen Nadelmasse) findet nach der Überwinterung im Raupenstadium statt. Auch andere Schmetterlingsarten z.B. *Bombyx* oder *Protoparce* fressen etwa 97% der Blätter in den letzten zwei Larvalstadien (Waldbauer, 1968). Auch die Kohlweißlingslarve *Pieris brassicae* vertilgt die größte Blattmasse (85,7% des Gesamtfraßes) im letzten L5 Stadium (David und Gardiner, 1962). Weiterhin wurden auch Laubbaumschädlinge wie *Lymantria dispar* untersucht. Hier wurde ein täglicher Nahrungsbedarf der einzelnen Larvalstadien ermittelt. Im letzten Stadium benötigen die Raupen 0,63g Blattmasse pro Tag. Mit der Information, dass bei 25°C die Entwicklung 34-39 Tage dauert (Ilinski, 1965) und dass das letzte Larvalstadium länger als die ersten vier Stadien zusammen dauert (Hintzapo, 1970) kann man versuchen den gesamten Nahrungsverbrauch zu schätzen. Man kommt so auf die Summe von etwa 13g. Ilinski (1965) bemerkt auch, dass *L. dispar* einen nicht „ökonomischen“ Fraß betreibt und etwa 1/3 der Blattmasse auf dem Boden fällt. Bei *Lymantria dispar* wurde für das gesamte L4 Stadium der Konsum von 0,2-0,25g Trockenmasse der Pappelblätter angegeben (Hemming und Lindroth, 1999). Dies entspricht etwa 0,65g Frischblattmasse dieser Baumart. Mit der Annahme, dass das L4 Stadium bei vielen Falterarten etwa 8-9% der Gesamtfuttermenge frisst (Kasting und McGinnis, 1959) kann man den Gesamtnahrungsbedarf auf 7,6g hochrechnen. Für eine

bessere Visualisierung dieser Zahlen kann man mit der LbT-Methode nach Paczkowska et al. (2009) berechnen, dass 7,6g Frischblattmasse etwa 75 mittleren Zitterpappel Blättern entsprechen. Die oben genannten Daten zeigen eine große Variabilität. Die Ermittlung des absoluten Nahrungsbedarfs ist nicht nur aufwendig sondern auch methodisch schwierig. Dieser Parameter ist von vielen Umweltfaktoren wie Futterqualität, Temperatur, Entwicklungsdauer, Konkurrenz und Inhaltstoffen der Pflanze abhängig. Die Tatsache, dass einige Arten einen großen Teil der Pflanzenmasse verschwenden macht es noch schwieriger. In solchen Fällen ist der Nahrungsbedarf dem Nahrungsverbrauch nicht gleich.

In eigenen Laborexperimenten sollte die Frage, welche Baumart die bessere Nahrungsqualität bietet beantwortet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl Zitterpappel als auch Salweide ein sehr nahrhaftes Futter im Vergleich zur Schwarzpappel sind. Von den beiden untersuchten Baumarten scheint die Zitterpappel auf Grund besserer Verdaulichkeit (A.D.) die günstigere Futterpflanze zu sein. Aus ernährungsphysiologischer Sicht ist die Verwertung der Zitterpappel effizienter und es wird mehr Futtermasse in die Körpermasse umgewandelt (E.C.I.) (Abbildung 3.20). Daher muss weniger Blattmasse gegessen werden um das gleiche Körpergewicht zu erreichen (Abbildung 3.22). Dabei wird weniger Kot ausgeschieden. Die Körpergewichte sind bei der Zitterpappelfütterung etwas höher, aber nicht statistisch signifikant höher (Abbildung 3.23). Im Freiland konnte man einen statistisch signifikanten Einfluss des Standortes auf die Überlebensrate beobachten. Dieser Einfluss wurde aber stark durch die Baumart moduliert, so dass die erfolgreichsten Stellen an der Zitterpappel im Schatten und an der Salweide in der Sonne waren. Hier spielten außer der Futterqualität auch andere Faktoren, wie z.B. das Mikroklima, eine bedeutende Rolle. In der Arbeit von Damm (2003) wurden an den Zitterpappel in Schattenposition die höchsten Überlebensraten (bzw. Verpuppungsraten) beobachtet. Jedoch wurde kein Zusammenhang zwischen den Entwicklungsparameter Gewicht und Verpuppungsgrad und der Himmelsrichtungsexposition festgestellt. Die beiden Entwicklungsparameter Raupengewicht und Verpuppungsgrad waren sehr schwach miteinander korreliert. Das Gewicht kann ein Hinweis auf das Geschlecht des Tieres geben. Die weibliche Puppen sind in der Regel schweren und größer. Da das Raupengewicht keine Relevanz bezüglich der Überlebensquote hat wurde in eigenen Experimenten auf die Bestimmung von diesem Parameter verzichtet. Es wurde auch kein Zusammenhang zwischen der Sonnenscheindauer und dem Raupengewicht festgestellt (Damm, 2003). Ähnlich war es in den eigenen Experimenten. Trotz vereinfachten Kriterien zur Sonnenscheindauer konnte man keinen eindeutigen Einfluss der Sonnen- oder der Schattenexposition auf die Entwicklungsdauer oder auf die Lebensdauer der Tiere feststellen.

Ein besonderer Aspekt, der den Vergleich und die Interpretation solcher Freilandversuche erschwert, ist die Wetterlage während des Versuchs. Im Labor ist es möglich konstante Bedingung zu schaffen was im Freiland nicht möglich ist. Da die Temperatur einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklungsdauer der Larven hat (Karolewski et al., 2007), wurden die Temperaturtage für alle erfolgreich verpuppte Raupen an jedem Standort berechnet. Es zeigten sich aber keine statistisch signifikanten Unterschiede. Das bedeutet, dass die Unterschiede in den absoluten Entwicklungslängen auf die signifikant unterschiedlichen Temperaturbedingungen an verschiedenen Standorten zurückzuführen sind (Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3). Der Standort hat auch einen signifikanten Einfluss auf die Überlebensrate (Abbildung 3.24). Möglicherweise führt die Qualität der Nahrung oder die Besonnung, die stark mit der Temperatur korreliert ist, dazu, dass an der Zitterpappel im Schatten und an der Salweide in der Sonne die meisten Raupen überlebt haben.

Viele Aspekte dieser Arbeit sind durch eine geringe Anzahl verfügbarer Tiere erschwert worden. Die Anzahl der Tiere (Imagines) sollte im Hunderterbereich liegen damit die Messungen und Verhaltensversuche an Imagines statistisch abgesichert sind. Nur wenn man die Freilandversuchen bzw. die Laborversuche an tausenden Raupen durchführt, besteht eine realistische Chance auf eine ausreichende Anzahl der Falter für die Eiablage/Verhaltensversuche. Die Betreuung der Zucht soll durch erfahrenes, qualifiziertes Personal erfolgen. Selbst kleine Fehler führen hier zu großen Verlusten. Trotzdem kann man Ereignisse wie eine Krankheit in der Laborzucht oder ein Wandalismusakt im Freiland nicht ausschließen. Die Forschung an diesen sehr empfindlichen Lebewesen ist sehr anspruchsvoll.

6 Zusammenfassung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit wurde auf Grundlagenwissenschaftliche Fragen wie: welche Stoffe werden vom Gabelschwanz wahrgenommen und welche Auswirkung haben diese auf sein Verhalten, gelegt. Es wurde auch untersucht, welchen Einfluss die Futterqualität der beiden Baumarten und der Fraßort (Exposition) auf die Raupenentwicklung haben. Dieses Vorwissen bildete eine Basis für das Untersuchen weiterer Zusammenhänge, wie z.B. ob der Fraßort der Raupe die Selektivität der weiblichen Falter beim Eiablageverhalten beeinflusst. Der Große Gabelschwanz gehört zu den oligophagen Insekten und bevorzugt laut Literatur sonnenexponierte Waldränder mit Zitterpappeln- und Salweidenjungwuchs (Ebert et al., 1994). Seine Wirtsfindung basiert auf dem olfaktorischen Sinn. Dank der Wahrnehmung eines breiten Volatilspektrums hat der Gabelschwanz die Möglichkeit nicht nur seine Wirtspflanzen zu finden und deren Kondition zu erkennen, sondern auch die Anwesenheit

von Konkurrenten zu bemerken. Sowohl überall vorhandene Grünblattdüfte, z.B. (Z)-3-Hexen-1-ol, als auch hoch spezifische Stressmarker (Methylsalicylat) werden von Imagines wahrgenommen. Es wurden auch geschlechtsspezifische Unterschiede im Geruchssinn des Falters festgestellt. Nur weibliche Tiere haben auf Methylsalicylat, Linalool, Benzaldehyd, Decanal und (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat in EAD Messungen reagiert. Fünf von den EAD aktiven Stoffen (Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Linalool, Methylsalicylat und Benzylalkohol) zeigten bei den weiblichen Faltern schon in der niedrigsten Verdünnung 10^{-7} (g/g) eine signifikante Reaktion. Diese Stoffe können also der weiträumigen Orientierung dienen. Nonanal und 2-Ethyl-hexan-1-ol wurden erst in der Konzentration 10^{-4} (g/g) in Paraffinöl signifikant wahrgenommen und können deswegen das Falterverhalten in der Nahorientierung (innerhalb eines Baumes) beeinflussen. Im Verhaltensversuch waren Nonanal, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol für die weiblichen Falter attraktiv. Bei den Männchen war (Z)-3-Hexen-1-ol attraktiv aber Hexylacetat und Methylsalicylat waren repellent.

Die Laborversuche weisen darauf hin, dass die Zitterpappel aus ernährungsphysiologischer Sicht eine bessere Futterpflanze darstellt. Ihre Verwertung ist effizienter und es wird daher weniger Blattmasse benötigt, um die gleichen Körpermassen zu erreichen. Im Freiland konnte man einen signifikanten Einfluss des Standortes auf die Überlebensrate beobachten. Die erfolgreichsten Standorte waren Zitterpappel Schatten und Salweide Sonne. Die Unterschiede in der Entwicklungsdauer auf verschiedenen Standorten ließen sich auf kleinräumige Temperaturunterschiede zurückführen. Die Lebensdauer war an gewählten Standorten nicht signifikant unterschiedlich. Zwischen den Expositionen in der Innenkrone und der Außenkrone konnte man nur am Standort Salweide Sonne einen Unterschied feststellen. Hier überlebten mehr Raupen in der Innenkrone, die etwas weniger der Sonne ausgesetzt war.

Literaturverzeichnis:

- Anderson, P., Hallberg, E., Subchev, M., 2000, Morphology of antennal sensilla auricillica and their detection of plant volatiles in the Herald moth, *Scoliopteryx libatrix* L. (Lepidoptera : Noctuidae). *Arthropod Structure & Development* 29, 33-41.
- Backhaus, W., Boeckh, J., Bückmann, D., Elsner, N., Fleissner, G.u.G., Gewecke, M., Hamdorf, K., Hoffmann, K.H., Huber, F., Kraus, O., Menzel, R., Roeder, T., 1995, *Physiologie der Insekten*. Gewecke, M., Stuttgart, Jena, New York.
- Balogh, J., Gere, G., 1953, Über die Ernährungsbiologie und Luftstickstoffbindung der *Hyphantria*- Raupen. *Acta biol. Hung.* 4, 431-452.
- Barata, E.N., Pickett, J.A., Wadhams, L.J., Woodcock, C.M., Mustaparta, H., 2000, Identification of host and nonhost semiochemicals of eucalyptus woodborer *Phoracantha semipunctata* by gas chromatography-electroantennography. *Journal of Chemical Ecology* 26, 1877-1895.

- Bernays, E.A., Chapman, R.F., 1994, Host-plant selection by phytophagous insects. Chapman and Hall, New York.
- Bogner, F., 1990, Sensory physiological investigation of carbon-dioxide receptors in Lepidoptera. *Journal of Insect Physiology* 36, 951-957.
- Boland, W., Ney, P., Jaenicke, L., Gassmann, G., 1984, A "closed-loop-stripping" technique as a versatile tool for metabolic studies of volatiles. Walter de Gruyter & Co, Berlin.
- Bruce, T.J.A., Wadhams, L.J., Woodcock, C.M., 2005, Insect host location: a volatile situation. *Trends in Plant Science* 10, 269-274.
- Buckmann, D., 1959, Die Auslösung der Umfärbung durch das Häutungshormon bei *Cerura vinula* L. (Lepidoptera, Notodontidae). *Journal of Insect Physiology* 3, 159-189.
- Chararas, C., Schoenen, A., Poupon, H., 1969, Variations in vitality and osmotic pressure in different Eucalyptus as a function of ecological conditions and role of *Phoracantha semipunctata* Fabr. (Coleoptera Cerambycidae Xylophaga). *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Seances De L Academie Des Sciences Serie D* 268, 2697-2711.
- Chen, L., Fadamiro, H.Y., 2007, Differential electroantennogram response of females and males of two parasitoid species to host-related green leaf volatiles and inducible compounds. *Bulletin of Entomological Research* 97, 515-522.
- Damm, M., 1999, Untersuchung von Insektenpopulationen über eine Vegetationsperiode an Zitterpappel (*Populus tremula* L.) in unterschiedlichen Waldmantelstrukturen bei Ebergötzen/Waake unter besonderer Beachtung der Lepidoptera. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Damm, M., 2003, Faunistische Erfassung phytophager Insekten an ausgewählten Waldaußen- und Waldinnenrändern des Sollings unter besonderer Berücksichtigung der Macrolepidoptera und von Waldrandstrukturen, Vol PhD. Georg-August-Universität, Göttingen, 182 p.
- David, W.A.L., Gardiner, B.O.C., 1962, Observation on the larvae and pupae of *Pieris brassicae* (L.) in laboratory culture. *Bull. ent. Res.* 53, 417-436.
- de Groot, A.T., Timmer, R., Gort, G., Lelyveld, G.P., Drijfhout, F.P., Van Beek, T.A., Visser, J.H., 1999, Sex-related perception of insect and plant volatiles in *Lygocoris pabulinus*. *Journal of Chemical Ecology* 25, 2357-2371.
- de Groot, P., MacDonald, L.M., 1999, Green leaf volatiles inhibit response of red pine cone beetle *Conophthorus resinosae* (Coleoptera:Scolytidae) to a sex pheromone. *Naturwissenschaften* 86, 81-85.
- De Moraes, C.M., Lewis, W.J., Pare, P.W., Alborn, H.T., Tumlinson, J.H., 1998, Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids. *Nature* 393, 570-573.
- De Moraes, C.M., Mescher, M.C., Tumlinson, J.H., 2001, Caterpillar-induced nocturnal plant volatiles repel conspecific females. *Nature* 410, 577-580.
- Dickens, J.C., Jang, E.B., Light, D.M., Alford, A.R., 1990, Enhancement of insects pheromone responses by green leaf volatiles. *Naturwissenschaften* 77, 29-31.
- Ebert, G., Hirneisen, N., Krell, F.T., Mörtter, R., Ratzel, U., Siepe, A., Steiner, A., Traub, B., 1994, Die Schmetterlinge Baden-Württenbergs, Vol 4. Eugen Ulmer, Stuttgart, 535 p.
- Ernst, W.H.O., 1992, Nutritional aspects in the development of *Buchidius sahlbergi* (Coleoptera, Bruchidae) in seeds of *Acacia erioloba*. *Journal of Insect Physiology* 38, 831-838.
- Evans, A.C., 1939, The utilization of food by certain lepidopterous larvae. *Trans. R. ent. Soc. Lond.* 89, 13-22.
- Fernandez, P.C., Meiners, T., Bjorkman, C., Hilker, M., 2007, Electrophysiological responses of the blue willow leaf beetle, *Phratora vulgatissima*, to volatiles of different *Salix viminalis* genotypes. *Entomologia Experimentalis Et Applicata* 125, 157-164.
- Freina, J.J., Witt, T.J., 1987, Die Bombyces und Sphinges der Westpalearktis (Insecta, Lepidoptera), Vol 1. Edition Forschung & Wissenschaft, München, 708 p.

- Gerold, P., Striepen, B., Reitter, B., Geyer, H., Geyer, R., Reinwald, E., Risse, H.J., Schwarz, R.T., 1996, Glycosyl-phosphatidylinositols of *Trypanosoma congolense*: Two common precursors but a new protein-anchor. *Journal of Molecular Biology* 261, 181-194.
- Godfray, H.C.J., 1987, The evolution of clutch size in parasitic wasps. *American Naturalist* 129, 221-233.
- Hallberg, E., Hansson, B.S., Steinbrecht, R.A., 1994, Morphological-characteristics of antennal sensilla in the european corborer *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera, Pyralidae). *Tissue & Cell* 26, 489-502.
- Hansson, B.S., 1995, Olfaction in Lepidoptera. *Experientia* 51, 1003-1027.
- Hemming, J.D.C., Lindroth, R.L., 1999, Effects of light and nutrient availability on aspen: Growth, phytochemistry, and insect performance. *Journal of Chemical Ecology* 25, 1687-1714.
- Henkel, W., 1975, Zur Problematik der Beseitigung "gefährdender" oder "schädigender" Mischbaumarten, besonders in Fichten- und Kiefernbeständen. *Die sozialistische Forstwirtschaft* 25, 152-153.
- Hintze-Podufal., C., 1970, Quantitative changes of defecation during larval development of *Cerura vinula* L. (Lepidoptera). *Oecologia* 5, 334-346.
- Hintze, C., 1970, Effect of temperature on larval development of *Cerura vinula* L. (Lepidoptera). *Oecologia* 4, 374-380.
- Hintzepo, 1970, Quantitative changes of defecation during larval development of *Cerura vinula* L. (Lepidoptera). *Oecologia* 5, 334-346.
- Hiratsuka, E., 1920, Researches on the nutrition of the silk worm. *Bull. ser. Exp. Sta. Japan* 1, 257-315.
- Hodgson, E.S., 1974, Chemoreception, In: Rockstein, M. (Ed.) *The physiology of insecta*. Academic Press, New York and London.
- Hoo, C.F.S., Fraenkel, G., 1966, Consumption digestion and utilization of food plants by a polyphagous insect *Prodenia eridania* (Cramer). *Journal of Insect Physiology* 12, 711-730.
- Ilinski, A.I., Tropin, I.W., 1965, Nadzor, ucet i prognoz massowych rozmnozenia chwoje- i listogryzuszczich nasiekomych w liesach sssr. *Liesnaja Promyszlennost SSSR*, Moskwa.
- Johne, A.B., Weissbecker, B., Schutz, S., 2008, Approaching risk assessment of complex disease development in horse chestnut trees: a chemical ecologist's perspective. *Journal of Applied Entomology* 132, 349-359.
- Johne, A.B., Weissbecker, B., Schütz, S., 2006, Volatile emissions from *Aesculus hippocastanum* induced by mining of larval stages of *Cameraria ohridella* influence oviposition by conspecific females. *Journal of Chemical Ecology* 32, 2303-2319.
- Kaiser, R., 1991, Trapping, investigation and reconstitution of flower scents, In: Müller, P.M., Lamparksy, D. (Ed.) *Perfums: art, science and technology*. Elsevier Applied Science, London, New York, pp. 213-250.
- Kaissling, K.E., Thorson, J., 1980, Insect olfactory sensilla: structural, chemical and electrical aspects of the functional organisation. Elsevier/North-Holland Biomedical Press Amsterdam (The Netherlands), p. 261-282. pp.
- Karolewski, P., Grzebyta, J., Oleksyn, J., Giertych, M.J., 2007, Effects of temperature on larval survival rate and duration of development in *Lymantria monacha* (L.) on needles of *Pinus sylvestris* (L.) and in *L. dispar* (L.) on leaves of *Quercus robur* (L.). *Polish Journal of Ecology* 55, 595-600.
- Kasting, R., McGinnis, A.J., 1959, Nutrition of the pale western cutworm *Agrostis orthogonia* Morr. (Lepidoptera: Noctuidae). II. Dry matter and nitrogen economy of larvae fed on sprouts of a hard red spring and durum wheat. *Can. J. Zool.* 37, 713-720.

- Keil, T.A., 1999, Morphology and development of the peripheral olfactory organs., In: Hansson, B.S. (Ed.) Insect olfaction. Springer Verlag, Berlin.
- Leder, B., 1993, Zur Geschichte einer Einbeziehung von Weichlaubhölzer in die waldbauliche Praxis. Forst und Holz 48, 337-343.
- Light, D.M., Flath, R. A., Buttery, R. G., Zalom, F. G., Rice, R. E., Dickens, J. C. and Jang, E. B. , 1993, Host-plant green-leaf volatiles synergize the synthetic sex pheromones of the corn earworm and codling moth (Lepidoptera) Chemoecology 4, 145-152.
- Loughrin, J.H., Potter, D.A., Hamilton Kemp, T.R., Byers, M.E., 1996, Volatile compounds from crabapple (*Malus* spp.) cultivars differing in susceptibility to the Japanese beetle (*Popillia japonica* Newman). Journal of Chemical Ecology 22, 1295-1305.
- Ma, W.C., Visser, J.H., 1978, Single unit analysis of odor quality coding by the olfactory antennal receptor system of the Colorado beetle. Entomologia Experimentalis Et Applicata 24, 520-533.
- Matsumoto, Y., Sugiyama, S., 1960, Attraction of leaf alcohol and some aliphatic alcohols to the adult and larva of the vegetable weevil. Ber. Ohara Inst. Landwirtschaft. Biol. 11, 359-364.
- Mayhew, P.J., 1997, Adaptive patterns of host-plant selection by phytophagous insects. Oikos 79, 417-428.
- McCall, P.J., Turlings, T.C.J., Loughrin, J., Proveaux, A.T., Tumlinson, J.H., 1994, Herbivore-induced volatile emissions from cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings. Journal of Chemical Ecology 20, 3039-3050.
- Meineke, T., Brunken, G., Menge, K., 1993, Landschaftsökologische Bestandsaufnahme Kerstlingeröder Feld. Gutachten für die Stadt Göttingen.
- Moeser, J., Vidal, S., 2004, Response of larvae of invasive maize pest *Diabrotica virgifera virgifera* (Coleoptera : Chrysomelidae) to carbon/nitrogen ratio and phytosterol content of European maize varieties. Journal of Economic Entomology 97, 1335-1341.
- Nagy, B., 1953, Der Nahrungsverbrauch der Raupe der amerikanischen weissen Bärenspinner (*Hyphantria cunea* Drury) unter konstanten Verhältnissen. Acta agron. Hung. 3, 215-223.
- Niemeyer, H., 1998, Wichtige Forstschädlinge erkennen, überwachen und bekämpfen, 5. Edition. aid, Rainer Schretzmann, Thomas Meise, Bonn, 49 p.
- Paczkowska, M., Földner, K., Paczkowski, S., Schütz, S., 2009, The „Length of branches with leaves (LbT)“ as a scale for leaf mass and leaf area. Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent. 17, 339-342.
- Paczkowska, M., Földner, K., Weissteiner, S., Beniwal, R.S., Polle, A., Schütz, S., 2006, Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand. Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent. 13, 213-217.
- Park, K.C., Zhu, J.W., Harris, J., Ochieng, S.A., Baker, T.C., 2001, Electroantennogram responses of a parasitic wasp, *Microplitis croceipes*, to host-related volatile and anthropogenic compounds. Physiological Entomology 26, 69-77.
- Pophof, B., Stange, G., Abrell, L., 2005, Volatile organic compounds as signals in a plant-herbivore system: Electrophysiological responses in olfactory sensilla of the moth *Cactoblastis cactorum*. Chemical Senses 30, 51-68.
- Renwick, J.A.A., 1989, Chemical ecology of oviposition in phytophagous insects. Experientia 45, 223-228.
- Ruther, J., 2000, Retention index database for identification of general green leaf volatiles in plants by coupled capillary gas chromatography-mass spectrometry. Journal of Chromatography A 890, 313-319.
- Ruther, J., Reinecke, A., Thiemann, K., Tolasch, T., Francke, W., Hilker, M., 2000, Mate finding in the forest cockchafer, *Melolontha hippocastani*, mediated by volatiles from plants and females. Physiological Entomology 25, 172-179.

- Rutzen, H., Földner, K., 2002, Die Lepidopterenfauna des ehemaligen Standortübungsplatzes "Kerstlingeröder Feld" im südlichen Niedersachsen. *Entomologische Zeitschrift* 112, 341-348.
- Sanes, J.R., Hildebrand, J.G., 1976a, Acetylcholine and its metabolic enzymes in developing antennae of moth *Manduca sexta*. *Developmental Biology* 52, 105-120.
- Sanes, J.R., Hildebrand, J.G., 1976b, Origin and morphogenesis of sensory neurons in an insect antenna. *Developmental Biology* 51, 300-319.
- Sattler, H., 1939, Die Entwicklung der Nonne, *Lymantria dispar* in ihrer Abhängigkeit von der Nahrungsqualität. *Zeitschrift für angewandte Entomologie* 25, 543-587.
- Sauer, A.E., Karg, G., Koch, U.T., Dekramer, J.J., Milli, R., 1992, A portable eag system for the measurement of pheromone concentrations in the field. *Chemical Senses* 17, 543-553.
- Sauer, F., 1992, Die schönsten Raupen nach Farbphotos erkannt. Fauna Verlag, Karlsfeld.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2001, Lehrbuch der Bodenkunde, 15 Edition. Spectrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg-Berlin.
- Schipka, F., 2003. Wasserumsatz in Mitteldeutschland. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Schneider, D., Hecker, E., 1956, Zur Elektrophysiologie der Antenne des Seidenspinners *Bombyx mori* bei Reizung mit angereicherten Extrakten des Sexuallockstoffes. *Zeitschrift Für Naturforschung Part B-Chemie Biochemie Biophysik Biologie Und Verwandten Gebiete* 11, 121-124.
- Schneider, D., Kaissling, K.E., 1957, Der Bau der Antenne des Seidenspinners *Bombyx mori* L. II, Sensillen, cuticulare Bildungen und innerer Bau. *Zool. Jb., Abt. Anat. u. Ontog.* 76, 223-250.
- Schneider, D., Lacher, V., Kaissling, K.E., 1964, Die Reaktionsweise und das Reaktionsspektrum von Riechzellen bei *Antheraea pernyi* (Lepidoptera, Saturniidae). *Zeitschrift Für Vergleichende Physiologie* 48, 632-662.
- Schretzenmayr, M., Haupt, R., Ulrich, T., 1974, Zusammenhänge zwischen der Struktur des Waldes und dem Auftreten von Sturmschäden in der montanen Stufe des Ostharzes und sich daraus ergebende Hinweise zur Pflege von Waldrändern. *Die sozialistische Forstwirtschaft* 24, 116-120.
- Schütz, J.P., Brang, P., 1995, L'horizontoscope : un étonnant outil pratique de sylviculture notamment en haute montagne. *ONF Bull. Tech.* 28, 1-9.
- Schütz, S., 2001. Der Einfluss verletzungsinduzierter Emissionen der Kartoffelpflanze (*S. tuberosum*) auf die geruchliche Wirtspflanzenfindung und -auswahl durch den Kartoffelkäfer (*L. decemlineata*). Justus Liebig Universität, Gießen.
- Schütz, S., Weissbecker, B., Klein, A., Hummel, H.E., 1997, Host plant selection of the Colorado potato beetle as influenced by damage induced volatiles of the potato plant. *Naturwissenschaften* 84, 212-217.
- Schweitzer, E.S., Sanes, J.R., Hildebrand, J.G., 1976, Ontogeny of electroantennogram responses in the moth, *Manduca sexta*. *Journal of Insect Physiology* 2, 955-960.
- Schwenke, W., 1978, Die Forstschädlinge Europas. Ein Handbuch in fünf Bänden, Vol 3. Schmetterlinge, VIII Edition. Parey, Berlin & Hamburg, 467 p.
- Seabrook, W.D., Hirai, K., Shorey, H.H., Gaston, L.K., 1979, Maturation and senescence of an insect chemosensory response. *Journal of Chemical Ecology* 5, 587-594.
- Smid, H.M., van Loon, J.J.A., Posthumus, M.A., Vet, L.E.M., 2002, GC-EAG-analysis of volatiles from Brussels sprouts plants damaged by two species of *Pieris* caterpillars: olfactory receptive range of a specialist and a generalist parasitoid wasp species. *Chemoecology* 12, 169-176.
- Städler, E., Hansson, B.S., 1975, Olfactory capabilities of the gustatory chemoreceptors of the tabaco hornworm larvae. *J comp Physiol* 104, 97-102.

- Steinbrecht, R.A., 1970, Morphometric studies on antenna of Silk moth, *Bombyx mori* L.- Number and distribution of olfactory sensilla. Zeitschrift Fur Morphologie Der Tiere 68, 93-126.
- Szujecki, A., 1998, Entomologia leśna t.II Warszawa.
- Takabayashi, J., Dicke, M., Posthumus, M.A., 1991, Induction of indirect defense against spider-mites in uninfested Lima-bean leaves. Phytochemistry 30, 1459-1462.
- Takanashi, T., Ishikawa, Y., Anderson, P., Huang, Y.P., Lofstedt, C., Tatsuki, S., Hansson, B.S., 2006, Unusual response characteristics of pheromone-specific olfactory receptor neurons in the Asian corn borer moth, *Ostrinia furnacalis*. Journal of Experimental Biology 209, 4946-4956.
- Templin, E., 1955, Der Große Gabelschwanz (*Dicranula vinula* L.), Vol Merkblatt 19. Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin.
- Tollsten, L., Knudsen, J.T., 1992, Floral scent in dioecious *Salix* (Salicaceae) - a cue determining the pollination system. Plant Systematics and Evolution 182, 229-237.
- Visser, J.H., 1976, The design of a low-speed wind tunnel as an instrument for the study of olfactory orientation in the Colorado beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). Entomologia Experimentalis Et Applicata 20, 275-288.
- Visser, J.H., Ave, D.A., 1978, General green leaf volatiles in the olfactory orientation of the Colorado beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. Entomologia Experimentalis Et Applicata 24, 738-749.
- Waldbauer, G.P., 1968, The consumption and utilization of food by insects. Adv. Insect Physiol. 5, 229-288.
- Watanabe, T., 1958, Substances in mulberry leaves which attract silkworm larvae (*Bombyx mori*). Nature 182, 325-326.
- Weissbecker, B., Holighaus, G., Schütz, S., 2004, Gas chromatography with mass spectrometric and electroantennographic detection: analysis of wood odorants by direct coupling of insect olfaction and mass spectrometry. Journal of Chromatography A 1056, 209-216.
- Weissbecker, B., Schütz, S., Klein, A., Hummel, H.E., 1997, Analysis of volatiles emitted by potato plants by means of a Colorado beetle electroantennographic detector. Talanta 44, 2217-2224.
- White, P.R., Chapman, R.F., 1990, Olfactory sensitivity of gomphocerine grasshoppers to the odors of host and nonhost plants. Entomologia Experimentalis Et Applicata 55, 205-212.
- Wibe, A., 2004, How the choice of method influence on the results in electrophysiological studies of insect olfaction. Journal of Insect Physiology 50, 497-503.
- Zalucki, M.P., Brower, L.P., 1992, Survival of first instar larvae of *Danaus plexippus* (Lepidoptera: Danainae) in relation to cardiac glycoside and latex content of *Asclepias humistrata* (Asclepiadaceae). Chemoecology 3, 81-93.
- Zalucki, M.P., Clarke, A.R., Malcolm, S.B., 2002, Ecology and behavior of first instar larval Lepidoptera. Annual Review of Entomology 47, 361-393.
- Zhang, Q.H., Schlyter, F., 2004, Olfactory recognition and behavioural avoidance of angiosperm nonhost volatiles by conifer-inhabiting bark beetles. Agricultural and Forest Entomology 6, 1-19.
- Zhao, Y.X., Kang, L., 2002, Role of plant volatiles in host plant location of the leafminer, *Liriomyza sativae* (Diptera: Agromyzidae). Physiological Entomology 27, 103-111.
- Ziesmann, J., 1996, The physiology of an olfactory sensillum of the termite *Schedorhinotermes lamanianus*: Carbon dioxide as a modulator of olfactory sensitivity. Journal of Comparative Physiology a-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology 179, 123-133.

Ziesmann, J., Valterova, I., Haberkorn, K., Sanchez, M.G.D., Kaissling, K.E., 2000, Chemicals in laboratory room air stimulate olfactory neurons of female *Bombyx mori*. *Chemical Senses* 25, 31-37.

Kapitel VI:

Das Abendpfauenaug *Smerinthus ocellatus* L.- expositionsbedingte Larvalentwicklung, olfaktorische Wahrnehmung und Verhalten. Untersuchungen an Salweide (*Salix caprea* L.) und Zitterpappel (*Populus tremula* L.).

| | | |
|---------|--|-----|
| 1 | Einleitung | 162 |
| 2 | Material und Methoden | 164 |
| 2.1 | Bäume..... | 164 |
| 2.1.1 | Versuchsfläche Kerstlingeröder Feld | 164 |
| 2.1.1.1 | Die Lage | 164 |
| 2.1.1.2 | Geologie und Boden..... | 164 |
| 2.1.1.3 | Klima..... | 164 |
| 2.1.1.4 | Nutzungsgeschichte..... | 165 |
| 2.1.1.5 | Versuchsbäume | 165 |
| 2.1.2 | Versuchsaufbau im Gewächshaus | 166 |
| 2.1.3 | Duftprobennahme..... | 168 |
| 2.2 | Das Abendpfauenaug..... | 169 |
| 2.2.1 | Biologie und Verbreitung..... | 169 |
| 2.2.2 | Erhaltungszucht..... | 171 |
| 2.2.3 | REM Aufnahmen | 172 |
| 2.3 | GC-MS/EAD..... | 172 |
| 2.4 | EAG Verdünnungsreihen, Dosis-Antwort-Kurven | 174 |
| 2.5 | Verhaltensversuche | 175 |
| 2.5.1 | Imagines | 175 |
| 2.5.1.1 | Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung | 175 |
| 2.5.1.2 | Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung | 177 |
| 2.5.2 | Verhaltensversuch an L1 Larven..... | 178 |
| 2.6 | Fütterungsversuch | 178 |
| 2.7 | Ausbindeversuch | 179 |
| 3 | Ergebnisse | 180 |
| 3.1 | Versuchsbäume | 180 |
| 3.2 | REM Aufnahmen | 182 |
| 3.2.1 | Antennenmorphologie | 182 |
| 3.2.2 | Aufnahmen | 182 |
| 3.3 | GC-MS/EAD, EAG..... | 188 |
| 3.3.1 | GC-MS/EAD..... | 188 |
| 3.3.2 | EAG-Verdünnungsreihen..... | 190 |
| 3.4 | Verhaltensversuche | 193 |
| 3.4.1 | Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung | 193 |
| 3.4.2 | Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung | 196 |
| 3.4.3 | Fraßwahlversuch an L1 Larven..... | 196 |
| 3.5 | Larvalentwicklung..... | 198 |
| 3.5.1 | Laborfütterungsversuch..... | 198 |
| 3.5.2 | Ausbindeversuch | 201 |

| | | |
|-----|----------------------------|-----|
| 4 | Diskussion | 205 |
| 4.1 | REM Aufnahmen | 205 |
| 4.2 | VOC Wahrnehmung | 207 |
| 4.3 | Verhaltensversuche | 209 |
| 4.4 | Larvalentwicklung..... | 211 |
| 5 | Zusammenfassung | 213 |
| | Literaturverzeichnis:..... | 214 |

1 Einleitung

Etwa ein Drittel aller Tiere auf der Welt sind Insekten. Die pflanzenfressenden Insekten machen über ein Viertel von allen makroskopischen Organismen aus. Die herbivoren Insekten sind ein wichtiges Bindeglied zwischen den Produzenten (Pflanzen) und den höheren trophischen Ebenen, den Konsumenten. An jeder Pflanze frisst irgendein Insekt, das entweder hochspezialisiert monophag, eng ausgerichtet oligophag oder polyphag ist. Die meisten phytophagen Insekten zeigen eine hohe Spezialisierung in ihrem Fraßverhalten. Eine Art frisst normalerweise an einer oder an mehreren nahverwandten Pflanzenarten. Bernays und Graham schätzen, dass höchstens 10% aller herbivoren Arten Pflanzen aus mehr als drei Familien als Nahrungsquelle nutzen (Bernays und Graham, 1988). Dies erfordert von den Tieren einen zuverlässigen Wirtfindungsmechanismus (Visser, 1983, 1986). Die komplexen Interaktionen zwischen Pflanzen und Insekten werden immer weiter erforscht. Die Wahl der Wirtspflanze erfolgt als Sequenz von Verhaltensreaktionen auf unterschiedliche Reize, die sowohl von den Wirtspflanzen als auch von den Nichtwirtspflanzen empfangen werden. Dank zahlreicher Rezeptoren sind die Insekten in der Lage, sowohl visuelle als auch mechanische, gustatorische und olfaktorische Reize wahrzunehmen (Städler und Hansson, 1975). Die Aufnahme der olfaktorischen Reize spielt eine wichtige Rolle bei der innerartlichen Kommunikation (Boeckh et al., 1965; Kaissling und Thorson, 1980), bei der Feindvermeidung oder bei der Suche nach Nahrung und dem Eiablageplatz (Ferguson et al., 1999; John et al., 2008).

Das Abendpfauenaug *Smerinthus ocellatus* L. ist einer von vielen oligophagen Insekten. Es ernährt sich hauptsächlich von Blättern der Weichholzarten, vor allem von Weiden und Pappeln, die häufig an Waldrändern vorkommen. Diese Baumarten wurden jahrelang im Betriebswald wie Unkraut behandelt und rücksichtslos zurück geschnitten. Dadurch sind viele für das Abendpfauenaug und zahlreiche andere Insektenarten geeignete Habitate zerstört worden. Seit Mitte und Ende des 20. Jahrhunderts wurde die ökologische Sonderstellung von

Waldrändern erkannt und ihr besonderer naturschutzfachlicher Wert anerkannt (Henkel, 1975; Schretzenmayr et al., 1974). Es wurde aber auch festgestellt, dass nicht jeder Waldrand dem anderen gleich ist. Denn ob sonnig oder schattig-, nord- oder süd- exponiert, verändern sich die mikroklimatischen Bedingungen. Die Freilandversuche an Waldmantelgesellschaften von 1997 bis 2002 ergaben umfangreiche Hinweise auf die Einnischung verschiedener Macrolepidopteren in Abhängigkeit von Strukturparametern wie Sonnenexposition, Größe und sozialer Stellung der Bäume (Damm, 2003). Das Abendpfauenaug bevorzugt sonnige Jungwuchse in Randstrukturen. Um die beobachteten Habitatpräferenzen zu untersuchen und die Rolle des Insektengeruchssinns bei dieser Präferenz zu klären, ist die Kausalkette von Strukturparameter über resultierende abiotische und biotische Stressoren für die Wirtspflanzen, den entsprechend veränderten volatilen Emissionen der Pflanzen, die Wahrnehmung der VOCs durch die Insekten sowie die Verhaltensantwort der Insekten zu untersuchen. Die Duftmuster von Salweide und Zitterpappel in unterschiedlichen Expositionen sind sehr divers. In mehreren Duftmessreihen wurden über 200 Duftstoffe nachgewiesen (Kapitel III). Einige kamen vereinzelt vor oder konnten nicht sicher identifiziert werden. Jedoch war fast die Hälfte davon in mehr als 40% der Proben anwesend. Die Duftstoffemissionen waren nicht nur von den Jahreszeiten (Frühjahr, Hochsommer, Spätsommer) sondern auch von der Tageszeit abhängig. Nach diesen Erkenntnissen wurden Duftproben für elektrophysiologische Experimente nur während der Flugzeit der Falter in Mai und Juni und in deren Aktivitätsstunden (19.00 Uhr - 21.00 Uhr) genommen. Die Auswahl eines optimalen Eiablageplatzes ist entscheidend für das Überleben der Nachkommen und damit für das Überleben der Art. In dieser Arbeit wird versucht den Mechanismus, der dem Falter einen Hinweis auf seinen optimalen Eiablageplatz gibt, zu entziffern. Können die Falter die expositionsbedingten Veränderungen des VOC-Musters wahrnehmen? Welche Substanzen spielen dabei eine entscheidende Funktion? Sind die kleinen L1 Raupen auf die Wahl der Mutter angewiesen oder suchen sie aktiv nach optimaler Nahrung? Welchen Einfluss auf die Larvalentwicklung hat das Habitat? Diese Arbeit soll einige Antworten auf die genannten Fragen liefern.

2 Material und Methoden

2.1 Bäume

2.1.1 Versuchsfläche Kerstlingeröder Feld

2.1.1.1 Die Lage

Alle Freilandversuche wurden auf dem Kerstlingeröder Feld in der Nähe von Göttingen (Süd-niedersachsen) durchgeführt. Diese 196ha große Fläche ist ein Teil des Naturschutzgebietes Nr. 138 „Stadtwald Göttingen und Kerstlingeröder Feld“ und gleichzeitig Teil des Fauna- Flora- Habitat (FFH-) Gebietes „Göttinger Wald“. Somit ist es ein Bestandteil des europäischen Schutzgebietsystems Natura 2000 (NLWKN). Rund 1,5km östlich der Stadt Göttingen, mit einer maximalen Nord-Süd Ausdehnung von 1500m und einer Ost-Westausdehnung von bis zu 1300m, liegt das Kerstlingeröder Feld als Offenlandbereich inmitten des Göttinger Waldes. Der in der Nordhälfte gelegene Sauberg bildet den höchsten Punkt des auf 320 bis 390m ü. NN gelegenen Gebietes (Meineke et al., 1993). Rund 83ha der Fläche ist von Wald bedeckt, 56ha sind landwirtschaftliche Streuobstwiesen und 58ha sind Sukzessionsflächen, das heißt Übergangsformen zwischen offener Landschaft und Wald. Die so genannte „Zickenpumpe“ ist das einzige Gewässer bzw. Feuchtbiotop, das jedoch phasenweise trocken fällt.

2.1.1.2 Geologie und Boden

Ausgangsgestein des Kerstlingeröder Feldes ist der Mittlere Muschelkalk. Der Sauberg befindet sich mit seinen Trochitenkalkschichten auf Oberem Muschelkalk. Auf den Bereichen des Mittleren Muschelkalkes bildeten sich Braunerde- Bodentypen (Rendzina, Pararendzina) aus (Meineke et al., 1993). Alle Versuchsbäume bis auf 2 Zitterpappeln (Nr. 31 und 32) befinden sich auf geringmächtiger Rendzina. Die Bäume 31 und 32 befinden sich auf Pararendzina sehr nah am Übergang von diesen beiden Bodentypen. Rendzinen weisen zwar mit Mull eine fruchtbare Humusform auf, jedoch sind diese Bodentypen auf festem Carbonatgestein häufig von Flachgründigkeit und insbesondere an Südhängen von Trockenheit betroffen (Scheffer and Schachtschabel, 2001).

2.1.1.3 Klima

Das Gebiet befindet sich im Übergangsbereich von einem subozeanischen zu einem subkontinental geprägten kühl- gemäßigten Klima in submontaner Lage und ist kühler und niederschlagsreicher als die Göttinger Ebene. Mit ca. 710mm ist der Niederschlag um ca.

60mm höher als im nahe gelegenen Göttingen. Während der Vegetationsperiode fallen 50% des Jahresniederschlags, wobei das Maximum im Juni liegt. Bei einer Jahrestemperatur von 7,5°C ist das Habitat rund 1,2°C kühler als Göttingen (Schipka, 2003).

2.1.1.4 Nutzungsgeschichte

Etwa 60 Jahre lang (bis 1992) fand das Kerstlingeröder Feld als Truppenübungsplatz zunächst für die Reichswehr, die Britische Rheinarmee und schließlich für die Bundeswehr Verwendung. In der Zeit ist ein sehr dichtes Wegenetz (15km) mit breit angelegten Schotterstraßen und Betonplatten an den Kreuzungspunkten entstanden (Rutzen and Földner, 2002). Dieses dichte Wegenetz bot eine große Auswahl an unterschiedlich exponierten Waldrändern mit Weichholzarten. Aus diesem Grund war das Kerstlingeröder Feld ein geeignetes Forschungsgebiet. Im Jahr 2001 hat die Stadt Göttingen das Gebiet gekauft und unter die Kontrolle des Stadtforstamtes Göttingen gestellt. 2007 wurde das Kerstlingeröder Feld zusammen mit dem Göttinger Wald zum Naturschutzgebiet (FFH) ausgewiesen.

2.1.1.5 Versuchsbäume

Auf dem Kerstlingeröder Feld wurden 32 Versuchsbäume in Wuchshöhen von 1,5m bis 2,5m ausgewählt. Die 16 Salweiden und 16 Zitterpappeln standen in sonniger oder schattiger Exposition am Waldrand. Als sonnig wurden die Standorte eingestuft, bei denen innerhalb der Vegetationsperiode (April bis Oktober) die mittlere potentielle Sonnenscheindauer pro Tag, gemessen mit dem Horizontoskop (Schütz and Brang, 1995), (s.Abbildung 2.1) mindestens sechs Stunden betrug. Als schattig exponiert galten die Standorte, die während der Vegetationsperiode unter 4 Stunden potentieller Sonnenscheindauer am Tag erhielten. Das Luftbild zeigt das dichte Wegenetz und die Standorte der Versuchsbäume (Abbildung 2.2).



Abbildung 2.1. Horizontoskop der für die Bestimmung der potenziellen Sonnenscheindauer benutzt wurde. Photoquelle: http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/wsl_horizontoskop_DE

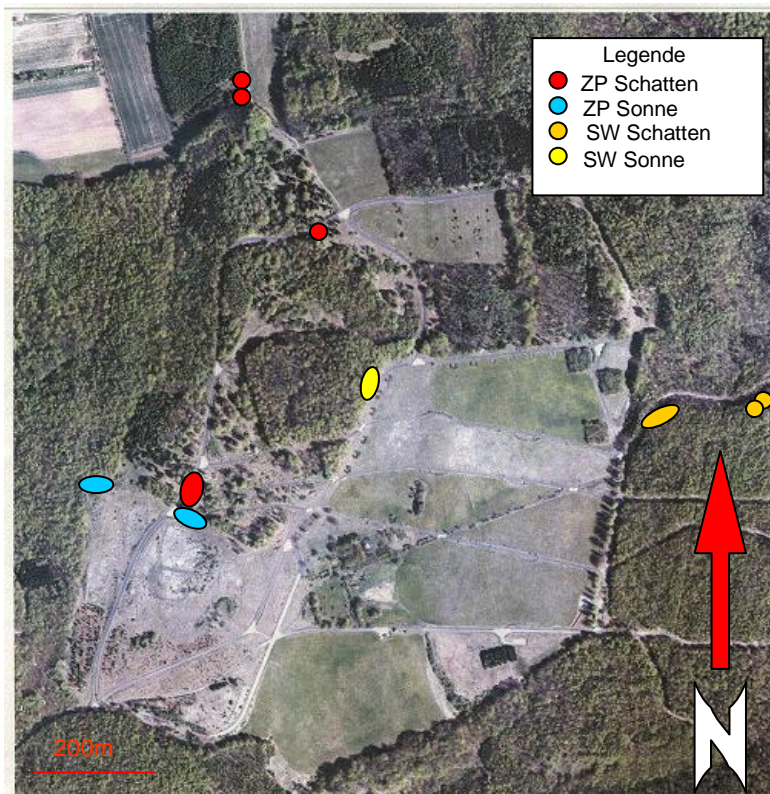


Abbildung 2.2. Luftbild vom Ketsungeröder Feld mit markierten Versuchsbäumen. ZP-Zitterpappel, SW-Salweide

2.1.2 Versuchsaufbau im Gewächshaus

20 Zitterpappeln und 20 Salweiden wurden in eine Gewächshauskammer gestellt. Die Zitterpappeln waren Vollgeschwister und stammen aus einer gezielten Kreuzung von Zitterpappel (*Populus tremula*) Geismar 7 ♀ und Geismar 5 ♂ aus dem Institut für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung der Universität Göttingen. Die Salweiden waren wild angeflogene Sämlinge aus der Versuchsfläche am Büsingeninstitut der Georg-August-Universität Göttingen, Büsengeweg 2. Bei den ersten Aufnahmen waren die Salweiden 40-50cm hoch. Alle Pappeln waren bei den ersten Aufnahmen 7 Jahre alt und 150-200cm hoch. Die Blattmassen der Zitterpappeln und der Salweiden waren trotz der Größenunterschiede vergleichbar. Die Pflanzen standen in 12-Liter Kunststofföpfen mit Frühstorfer Erde, Typ T25, Archut. Die Anordnung der Bäume im Gewächshaus zeigt Abbildung 2.3. Alle Bäume wurden in Abständen von drei Tagen mit je zwei Litern pro Pflanze gegossen. Vor dem Einbringen in das Gewächshaus wurden alle Pflanzen mit dem systemischen Insektizid Confidor WG70 0,035% und teilsystemischen Fungizid Flint 0,02% behandelt. Die Gewächshauskammer wurde mit 1% Vircon S desinfiziert. Die Bäume wurden Anfang März ins Gewächshaus gestellt. Bis Mai wurden sie weder umgestellt noch beprobt, damit sie sich an die neuen Bedingungen gewöhnen und mögliche Nebenwirkungen der Pestizide

ausklingen konnten. In der Kammer wurden künstlich die Lichtbedingungen Sonne und Schatten simuliert. Die Sonnen-Pflanzen standen etwa 1m vom Fenster entfernt und wurden zusätzlich mit vier Lampen Fa. Philips IP65 mit Weißlichtglühbirnen Master HPI-T Plus 400 Watt, 230V beleuchtet. Die Schatten-Pflanzen standen etwa 6m vom Fenster entfernt und waren durch die Schattierung sowie durch die Wände des Gewächshauses beschattet. Die Helligkeit wurde mit dem Luxmeter gemessen und betrug auf der Sonnenseite 7000-10000Lux und auf der Schattenseite 100-150Lux.

Die Temperatur betrug zwischen 15°C nachts bis 30°C tagsüber (der Alarmwert von 35°C wurde nie überschritten). Die Luftfeuchte betrug zwischen 30% RH und 60% RH bei Alarmwerten von min 23% RH und max 80% RH.

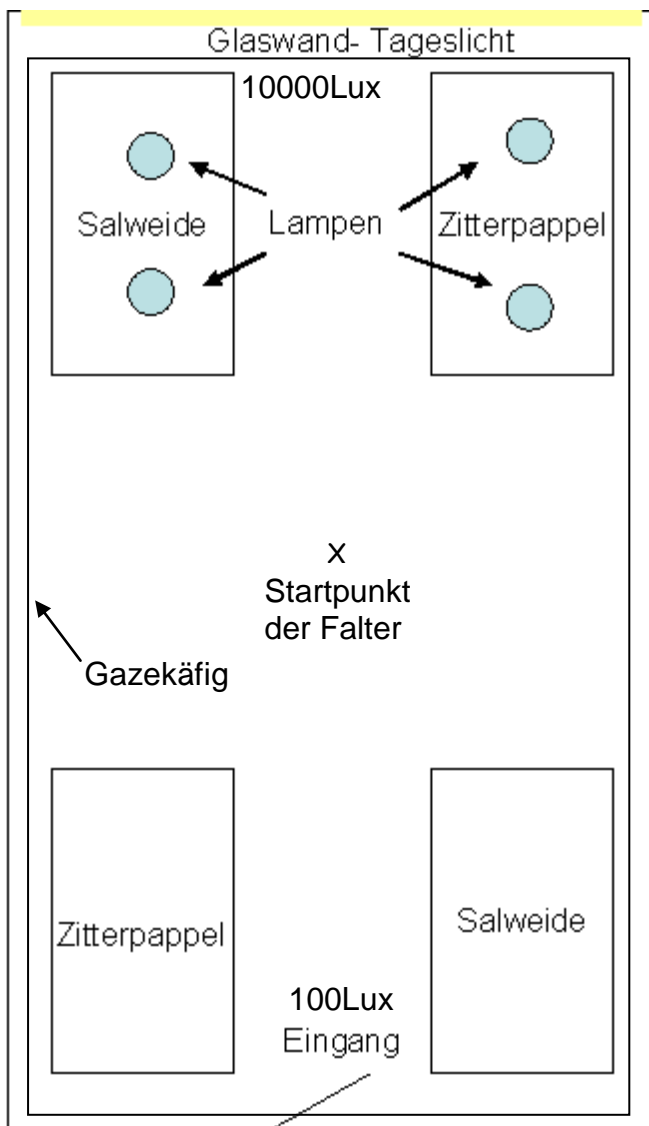


Abbildung 2.3. Die Anordnung der Bäume im Gewächshaus während der Verhaltensversuche.

2.1.3 Duftprobennahme

Die Duftproben sind auf dem Kerstlingeröder Feld (Freiland) und im Gewächshaus mit dem Closed-Loop-Stripping-Analysis-System (CLSA) (Boland et al., 1984) in CLSA Röhrchen (1,5mg Aktivkohle, CLSA-Filter, Fa. Daumazan sur Arize, Frankreich) mit einem 6V Akku und Bratschläuchen (Confresco Frischhalteprodukte, Minden, Deutschland) genommen worden (Abbildung 2.4). Bratschläuche waren für die Probennahme sehr gut geeignet, weil sie keine Weichmacher ausdünsten, duftneutral, gut abdichtbar und hitzebeständig sind. Außerdem sind sie kostengünstig und können als Einwegmaterial benutzt werden. Bei der Duftprobennahme wurden vorher ausgeheizte (20Min bei 80°C) 40cm lange Bratschläuche mit einem Umfang von 60cm über die Zweige der ausgewählten Bäume gestülpt und abgedichtet. Die Pumpen (Fa. Fürgut, Tannheim) wurden von Akkus (6V) mit Strom versorgt und saugten über zwei Stunden die Luft aus dem Bratschlauch mit einer durchschnittlichen Saugleistung von 36l/h. Abweichend vom klassischem CLSA System wurde die Luft aus der Pumpe nach außen geblasen, um die Kontaminationen der Probe mit den Duftstoffen aus dem Pumpenmechanismus zu vermeiden.

Bei diesem Vorgehen dringen geringe Mengen der Umgebungsluft in den Bratschlauch ein. Deshalb wurde ein Molekularsieb (0,4nm Fa. Merk) als Filter für die eindringende Luft eingeführt.



Abbildung 2.4. Duftprobennahme an einer Salweide im Freiland.

Die Duftprobenahmen erfolgten zur Hauptflugzeit der Falter zwischen 19.00 und 21.00 Uhr. Die CLSA-Röhrchen wurden anschließend im Labor mit 75µl der Mischung *MeOH* und *CH₂Cl₂* im Verhältnis 1:2 eluiert (beides Suprasolv-Qualität, Fa. Merck/VWR, Darmstadt) wobei sich die Duftkomponenten im Eluat lösten. Danach wurde die Lösung in Spitzbodengläschen abgefüllt und bis zur Analyse bei -80°C tief gefroren.

2.2 Das Abendpfauenauge

2.2.1 Biologie und Verbreitung

Das Abendpfauenauge *Smerinthus ocellatus* L. 1758 gehört zu der Familie Spingidae. In vielen Literaturquellen wird es noch *Smerinthus ocellata* genannt. Dieser große und gut fliegende Falter hat einen zurückgebildeten Saugrüssel und kann, anders als viele andere Spingidae, keine Nahrung aufnehmen. Deswegen kann er nicht kilometerweit fliegen und ist eher standortstreu. Er kommt in ganz Deutschland vor. Insgesamt zieht sich seine Verbreitung

von Nordwestafrika bis zum nördlichsten Großbritannien und Nord Fennoskandien und bis nach Westsibirien, zum Kaukasus und der Südküste des Schwarzen Meeres (Ebert et al., 1994).

Das Abendpfauenaug überwintert im Puppenstadium im Boden. Die Falter schlüpfen am frühen Vormittag im Mai und bilden eine oder zwei Generationen im Jahr wobei eine klare zeitliche Trennung beider Generationen sehr schwierig ist (Ebert et al., 1994; Lepidopterologen-Arbeitsgruppe, 1997). Die Weibchen fliegen in den späten Dämmerungsstunden tief über der Erde und legen einzeln oder paarweise kleine (1,6 x 1,4mm) hellgrüne Eier auf der Blattunterseite ab. Einige Autoren behaupten, dass die Falter erst nach Mitternacht am aktivsten sind und sich in dieser Zeit paaren und Eier ablegen. (Ebert et al. 1994). Es werden niedrige und junge Pflanzen und bodennahe Äste bevorzugt Die Speisekarte des Abendpfauenauges ist sehr breit gefächert. Die häufigsten Futterpflanzen sind verschiedene Weiden (*Salix*). Sowohl die breitblättrigen wie *S. aurita*, *S. cinerea* oder *S. caprea* als auch die schmalblättrigen *S. fragilis*, *S. viminalis*, *S. alba* und noch weitere *Salix* spp. werden gerne angenommen. Aber auch Pappeln (*Populus tremula*, *P. alba*, *P. nigra* ssp. *pyramidalis*), Birke *Betula pendula*, Obstgehölze (*Pyrus communis*, *Malus domestica*, *Malus sylvestris*, *Prunus cerasus*) und Kirschlorbeer *Prunus laurocerasus* können gefressen werden (Ebert et al., 1994). Weitere Quellen erwähnen zusätzlich noch Hasel, Erle, Liguster, Linde, Schneeball, Pflaume, Schlehe und Traubenkirsche als Futterpflanzen (Lepidopterologen-Arbeitsgruppe, 1997). Diese Arbeit konzentriert sich auf die zwei Wirtspflanzen Salweide *Salix caprea* und Zitterpappel *Populus tremula*. An den gleichen Futterpflanzen kommt der Pappelschwärmer *Laothoe populi* vor. Sein Schwerpunkt liegt aber auf den Pappeln. Wegen eines ähnlichen Habitus der Larve besteht hier eine hohe Verwechslungsgefahr. Die beiden Arten können sich sogar in der freien Natur kreuzen und Hybride aus Abendpfauenaugen Männchen und Pappelschwärmer Weibchen (=hybr. hybridus STEPH.) bilden (Lepidopterologen-Arbeitsgruppe, 1997). Ob die weiblichen Abendpfauenaugen auch von männlichen Pappelschwärmern befruchtet werden können, wurde nicht nachgewiesen. Als natürliches Habitat des Abendpfauenauges bezeichnet man teils periodisch oder edaphisch überschwemmte Silberweidenauen und Weidengesellschaften auf feuchten Standorten (*Salicion albae*). In der heutigen anthropogenen Landschaft findet man jedoch viele sekundäre Habitate (künstlich gegründete Weidengebüsche, Korbweidenpflanzungen, Obstplantagen, Gärten), wo das Abendpfauenaug sich gut entwickeln kann. Die Raupen des Abendpfauenauges bevorzugen freistehende Büsche und Bäume an sonnigen, warmen, eher

feuchten Stellen wie z.B. einem Fluss- oder Teichufer (Ebert et al., 1994; Weidemann und Köhler, 1996). Ein Weibchen kann 150 bis 200 Eier ablegen (Lepidopterologen-Arbeitsgruppe, 1997). Aus den Eiern schlüpfen nach etwa 14 Tagen 5mm lange grüne Raupen mit einem langen rosaroten Dorn am letzten Körpersegment - typisch für *Sphingidae*. Die Raupen durchlaufen fünf Larvalstadien (Lepidopterologen-Arbeitsgruppe, 1997). Kurz vor der Verpuppung werden sie sehr mobil, lassen sich von den Zweigen fallen und suchen nach einem Verpuppungs- und Überwinterungsplatz in der Erde. Sie buddeln sich etwa 20cm tief ein, damit die oft nahe an Ufern gelegenen Puppen nicht durch Hochwasser weggespült werden können. Die 35 bis 41mm langen schwarzbraunen ölig schimmernden Puppen sind eingefettet, um Wasser abzustößen.

Der Falter ist groß (Flügelspannweite 70 bis 80mm) und bräunlich gefärbt. Auf den Hinterflügeln hat er ein auffälliges Augenmuster, was zum Abschrecken der Prädatoren, vor allem Vögeln, dient. Die Effizienz dieser Strategie wurde in einer Studie von Vallin et al. 2007 untersucht. Es wurde als relativ wenig effektiv im Vergleich zum Tagpfauenaug beurteilt. Nur sechs von 27 Faltern haben den Angriff von Meisen überlebt (Vallin et al., 2007).

2.2.2 Erhaltungszucht

Die Insekten wurden jedes Jahr (2004-2008) im Puppenstadium oder im Eistadium von verschiedenen Züchtern erworben. Nach dem Schlupf wurden die Falter in Drahtnetz Käfigen gehalten. Imagines aus verschiedenen Herkunftten (Baden-Württemberg, Schweiz, Polen) wurden in der Zucht gekreuzt um Inzuchteffekte zu vermeiden. Die Züchter haben einen Freilandanflug für den besseren genetischen Austausch verwendet. Die Raupen wurden in Zuchtzyklindern aus Plexiglas gehalten und mit frischen Blättern der Zitterpappel (*Populus tremula* L.) oder der Salweide (*Salix caprea* L.) gefüttert.

Die Temperatur während der Larvalstadien betrug 20°C bis 30°C, es herrschten Langtagsbedingungen (16 Stunden- hell/8 Stunden-dunkel). Am Ende der Larvalentwicklung, wenn die Raupen deutlichen Wandertrieb zeigten, wurden sie in Plastikbecher mit Blumenerde gesetzt, wo sie sich einbuddeln und verpuppen konnten. Die Puppen überwintereten ab Oktober im dunklen Kühlraum bei 6°C. Einmal im Monat wurden die Puppen mit Wasser besprüht. Im April (der genaue Termin richtete sich nach dem Vegetationsfortschritt im Freiland) endete die Überwinterungszeit und die Falter konnten bei Zimmertemperatur (ca. 20°C± 2°C) schlüpfen. Für die genaue Altersbestimmung wurden die Imagines direkt nach dem Schlupf markiert.

2.2.3 REM Aufnahmen

Die Antennen wurden vom Kopf getrennt und in 50%ige Ethanol-Lösung gegeben. Für die Entwässerung wurde eine aufsteigende Ethanolreihe verwendet. Dem folgte die Trocknung der Objekte am kritischem Punkt (Balzers BalTec CPD 30). Die getrockneten Objekte wurden zum Schluss mit Gold besputtert (Balzers BalTec SCD 050). In Kooperation mit der Fakultät für Physik (Georg-August-Universität Göttingen) konnte das Rasterelektronenmikroskop LEO Supra 35 von der Firma Zeiss NTS genutzt werden.

2.3 GC-MS/EAD

Die Duftstoffgemische der Versuchsbäume wurden mit einem Gaschromatographen (6890N, Agilent Technologies, Santa Clara) auf der polaren Säule INNOWAX (Agilent Technologies 30m x 0,25mm ID und 0,25µm Filmdicke) in ihre Einzelkomponenten aufgetrennt. Zur Identifizierung der Substanzen kam ein gekoppeltes Quadrupol-Massenspektrometer (5973, Agilent Technologies) zum Einsatz. Es wurde 1µl des CLSA-Eluat in den Split/Splitlos-Injektor, der bei 250°C im Splitlosmodus betrieben wurde, injiziert und mittels des Temperaturprogramms Start: 50°C, Haltezeit 1,5Min, Rampe 7,5°C/Min, Endtemperatur 250°C, Haltezeit: 5Min, getrennt. Die gesamte Messdauer betrug 33,17 Min. Die getrennten Duftstoffe wandern mit dem Trägergas Helium (Reinheit: 99,999%) über die Säule bis zum Split (Graphpack 3D/2, Gerstel, Mühleim, Germany; 50:50), der sie zum Massenspektrometer und zu der Insektenantenne führt (Abbildung 2.5). Die Flussrate betrug 1,0l/min und die Temperatur der Transferline betrug 230°C. Mit der NIST Datenbank (National Institut for Standards & Technologies, 2003) im Programm Enhanced ChemStation version D.02.00.275 (Agilent Technologies) wurde der Vergleich der gemessenen Massenspektren zur Identifizierung der Substanzen durchgeführt. Die Richtigkeit der Identifizierungen wurde durch die Messung von authentischen Standards bestätigt. Die Standards wurden in der Konzentration 10^{-4} g/g im gleichen Lösungsmittelgemisch verdünnt, das zur Eluierung der Duftstoffe aus den CLSA-Röhrchen diente. Die Verdünnungen wurden in 2 Arbeitsschritten angefertigt. Zuerst wurden 1,98g Lösungsmittel (MeOH /CH₂Cl₂) mit 0,02g Reinsubstanz (meistens 99,9% Reinheit) gemischt und 2Min lang vor dem nächstem Arbeitsschritt gemixt (Vortex). 0,02g der so entstandenen Lösung in der Konzentration 10^{-2} g/g wurden in ein weiteres Probenglas mit 1,98g Lösungsmittel pipettiert und erneut gemixt. Auf diesem Weg entstand die Lösung in der Konzentration 10^{-4} g/g.

Die Kopplung zur elektroantennographischen Detektion (EAD) erfolgte über ein

modifiziertes ODP-2 Interface (Olfactory-Detector-Port, Fa. Gerstel, Mülheim, Deutschland). Die abgeschnittenen Antennen wurden in einer modifizierten EAG-Halterung (Sauer et al., 1992) über einer Elektrolytlösung (Kaissling und Thorson, 1980) mit Ag/AgCl-Elektroden verbunden, um ihre elektrophysiologischen Reaktionen auf die chemischen Einzelsubstanzen zu messen (GC-EAD). Um eine gute Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen wurde immer die 5mm lange Spitze der Antenne eingesetzt. Das bedeutet, dass der für die Duftstoffe exponierte Bereich der Antenne zwischen 1mm und 3mm von der Spitze lag. Die Verstärkung (Faktor 100) der abgeleiteten Potenziale erfolgte mit einem speziellen EAG-Verstärker (Prof. Koch, Kaiserslautern, Deutschland). Die Signale wurden über einen A/D-Wandler 35900E der ChemStation-Software (beides Fa. Agilent, Santa Clara, USA) zugeführt und aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Peaks sind als Antwort einer Insektenantenne auf einen Duftpuls zu verstehen. Die verwendete parallele Detektion durch ein gekoppeltes GC/MS-EAD System (Weissbecker et al., 2004) ermöglichte einerseits die quantitative Erfassung und Identifizierung sämtlicher flüchtiger organischer Verbindungen (VOC-volatile organic compound) und andererseits die Zuordnung der Antennenreaktionen zu bestimmten Substanzen. Vor jeder Messreihe, die aus acht Duftproben bestand, wurden die Antennen auf ihre Fitness getestet, indem 5ml Luft mit (Z)-3-Hexen-1-ol in Paraffinöl auf einem Filterpapier in einer Konzentration von 10^{-3} und 5ml Luft mit reinem Paraffinöl auf einem Filterpapier auf die Antenne gespritzt wurden. Als geeignet wurden Antennen ausgewählt, die beim Duftstimulus (positive Kontrolle) mindestens zweifach höhere Ausschläge als bei der negativen Kontrolle (Filterpapier mit Paraffinöl) zeigten. Innerhalb von zwei Vegetationsperioden (2007 und 2008) wurden an elf Weibchen 98 Messungen und an zwei Männchen 32 Messungen durchgeführt. Die Fragestellung betraf das Eiablageverhalten, deswegen lag der Schwerpunkt auf den weiblichen Tieren. Die Duftproben stammten von den Bäumen im Gewächshaus und im Freiland. Es wurden Duftspektren von Salweide-Sonne, Salweide-Schatten, Zitterpappel-Sonne und Zitterpappel-Schatten gemessen.

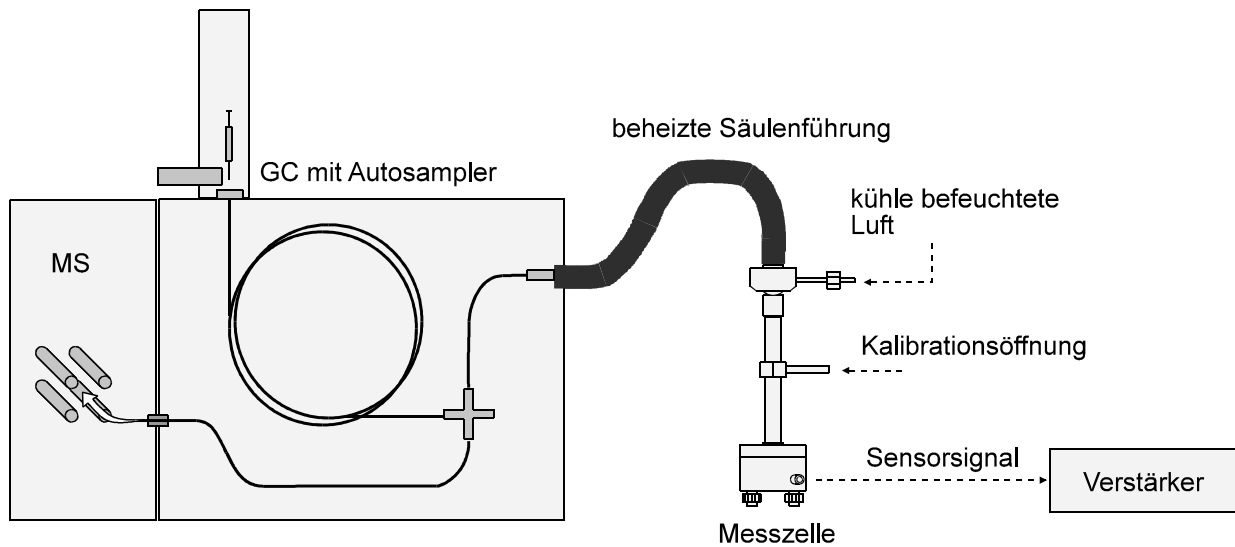


Abbildung 2.5. Schematische Darstellung des Gaschromatographen mit paralleler massenspektrometrischer und elektroantennographischer Detektion.

2.4 EAG Verdünnungsreihen, Dosis-Antwort-Kurven

Im Jahr 2008 und 2009 wurden die Antennenreaktionen auf einzelne Stoffe in definierten Konzentrationen getestet. Als Auswahlkriterium dienten hier die EAD-Messungen aus den Vegetationsperioden 2007 und 2008. An acht Weibchen wurden 15 Stoffe in den verschiedenen Konzentrationen getestet. Die Duftstoffe wurden in Paraffinöl (Uvasol quality, Merck/VWR) gelöst. Ein 50 μ l-Tropfen der Paraffinlösung wurde auf etwa 2cm² Filterpapier (Schleicher & Schuell, Dassel, Germany) gegeben und in die 10ml Glasspritze (Poulten & Graf GmbH, Wertheim, Germany) gelegt. Die sechs Verdünnungstufen wurden von der niedrigsten 10⁻⁷ g/g bis zu höchsten 10⁻² g/g nacheinander getestet. Zwischen den einzelnen Duftimpulsen wurde solange gewartet bis die Antenne zum Ruhezustand zurückkehrte. Diese Zeit variierte zwischen 10- 30s. Bei jedem Experiment wurde am Anfang und am Ende die Reaktion der Antenne auf (Z)-3-Hexen-1-ol in der Konzentration 10⁻³ g/g als sog. positive Kontrolle gemessen (Weissbecker et al., 1997; Park et al., 2001; Zhao and Kang, 2002). Als negative Kontrolle (NK) diente ein Filterpapier mit reinem Paraffinöl. Jedes Mal wurde auf die Antenne 5ml Luft gegeben. Die negative Kontrolle wurde ebenfalls vor und nach jedem Experiment durchgeführt. Alle Reaktionen wurden als Prozentanteil der positiven Kontrolle dargestellt und auf Signifikanz gegen die negative Kontrolle geprüft, die ebenfalls als Prozentanteil der positiven Kontrolle dargestellt wurde. Dank dieses Verfahrens war ein quantitativer Vergleich der Intensitäten der Antennenreaktionen zwischen verschiedenen Tieren möglich. Tabelle 2.1 zeigt alle Stoffe die in diesem Verfahren im Jahr 2008 und 2009

getestet wurden und die Anzahl Individuen sowie die Anzahl der Wiederholungen als auch die jeweils getesteten Konzentrationen.

Tabelle 2.1. Getestete Stoffe und deren Konzentrationen in Paraffinöl (g/g). N: Anzahl Individuen, n: Anzahl Wiederholungen. Die Reihenfolge ergibt sich aus den Retentionszeiten der Stoffe

| Stoff | CAS | 2008 | 2009 |
|---|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | ♀ N=3 | ♀ N=5 |
| Octanal | 124-13-0 | 10^{-1} - 10^{-5} / n=2 | |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 3681-71-8 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=2 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 |
| 6-Methyl-5-hepten-2-one | 110-93-0 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=4 |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | 928-96-1 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=2 | |
| Nonanal | 124-19-6 | 10^{-1} - 10^{-5} / n=2 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=5 |
| Tetramethylharnstoff | 632-22-4 | 10^{-1} - 10^{-3} / n=2 | |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat | 016491-36-4 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=4 |
| (Z)-3-Hexen-1-yl isovalerat | 35154-45-1 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=2 | |
| 2-Ethyl-hexan-1-ol | 104-76-7 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=4 |
| Decanal | 112-31-2 | 10^{-1} - 10^{-3} / n=2 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 |
| Benzaldehyd | 100-52-7 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=3 |
| Heptadecan | 629-78-7 | 10^{-1} - 10^{-5} / n=2 | |
| 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | 78-70-6 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=4 |
| Hexanal | 66-25-1 | 10^{-1} - 10^{-5} / n=2 | |
| Methylsalicylat | 19-36-8 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=4 |
| Benzylalcohol | 100-51-6 | | 10^{-1} - 10^{-7} / n=4 |
| Methylpalmitat | 112-39-0 | 10^{-1} - 10^{-7} / n=2 | |
| Methylstearat | 112-61-8 | 10^{-1} - 10^{-3} / n=3 | |

2.5 Verhaltensversuche

2.5.1 Imagines

2.5.1.1 Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung

Im Käfig ($50 \times 50 \times 70 \text{ cm}^3$) wurden in allen vier Ecken Petrischalen mit einem frischem Zitterpappelblatt und einem 2 cm^2 Filterpapier mit $50 \mu\text{l}$ Paraffin gestellt (Abbildung 2.6). In einer Petrischale befand sich zusätzlich ein Duftstoff in der Konzentration 10^{-3} g/g in Paraffinöl. Von den 22 elektrophysiologisch aktiven Stoffen wurden die acht interessantesten Stoffe ausgewählt und im Verhaltensversuch getestet. Es waren Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Nonanal, 2-Ethyl-hexan-1-ol, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol. Bei der Auswahl der Stoffe wurden die Häufigkeit der elektrophysiologischen Reaktionen, Duftstoffanalysen der Pappeln und Weiden sowie Literaturhinweise berücksichtigt. Die Falter wurden abends (ab 18 Uhr) in den Käfig gesetzt und in einem dunklen Raum mit einer Rotlichtlampe beobachtet. In jeder Ecke des Kastens wurde die Lufttemperatur gemessen. Sie betrug zwischen $21,9^\circ\text{C}$ und $23,8^\circ\text{C}$ wobei die Unterschiede zwischen den Ecken nicht größer als $\pm 0,1^\circ\text{C}$ waren.

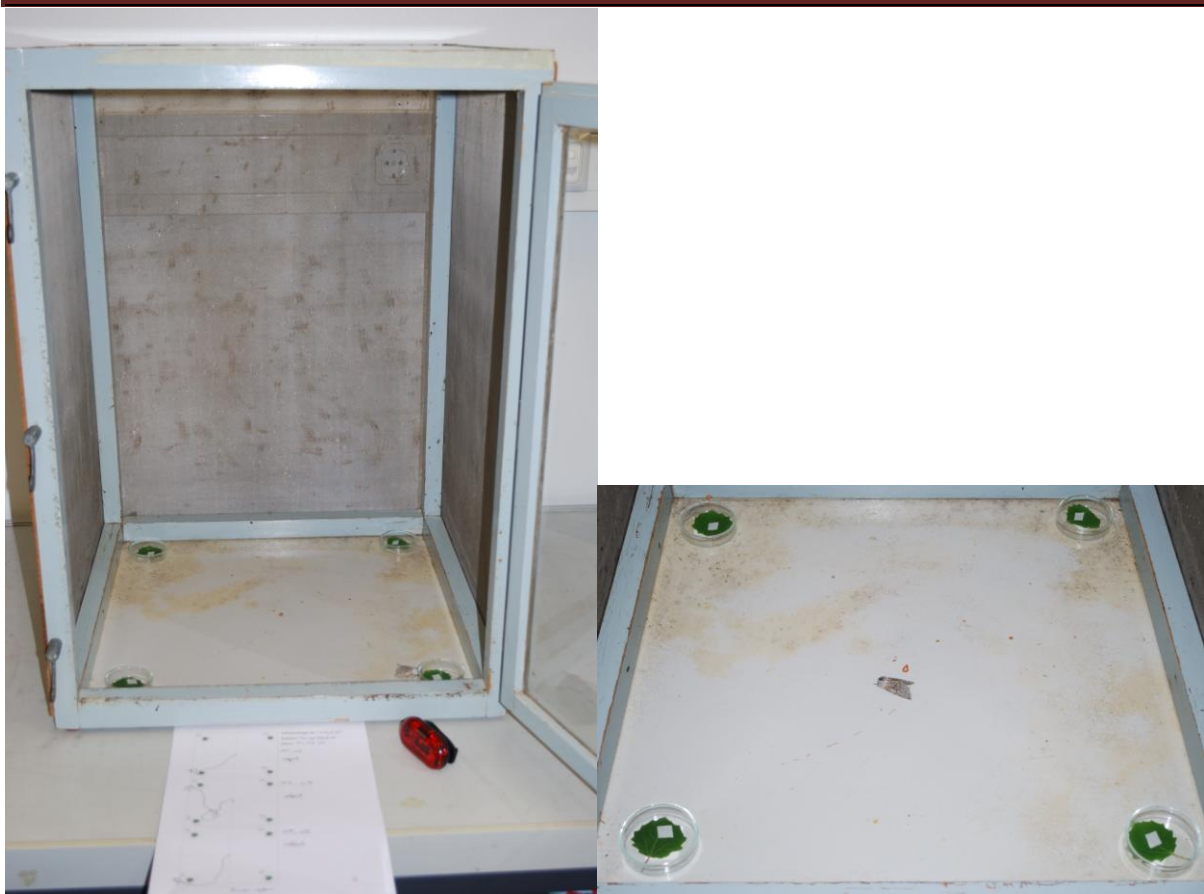


Abbildung 2.6. Versuchsaufbau für den Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung. Links ohne Falter, rechts mit weiblichem Gabelschwanz.

Alle zehn Minuten wurden die Falter zurück in die Mitte des Käfigs gesetzt. Vor jeder Versuchsreihe wurden zwei Nullproben ohne Duftstoff durchgeführt. Bei der Auswertung wurden folgende Parameter berücksichtigt:

- A: Wie schnell ist der Falter losgeflogen? (25%)
- B: Wie lange hat er sich in der Nähe vom Duftstoff aufgehalten? (25%)
- C: Wo ist er gelandet? (25%)
- D: Wie viele Zwischenstopps hat er gemacht? (25%)

Jeder Parameter wurde in einer dreistufigen Skala bewertet (Tabelle 2.2). Bei der Bewertung der Nullprobe wurde das Viertel des Kastens berücksichtigt, das im Folgeversuch mit einem Duftstoff bestückt war. Wenn der Falter keine Aktivität zeigte, wurde dieses Ereignis mit „1“ bewertet. Wenn der Falter sowohl bei der Kontrolle als auch bei dem Duftstimulus keine Aktivität zeigte, wurde diese Experimentreihe nicht berücksichtigt. Die oben genannten Parameter wurden prozentual gewichtet (Zahl in der Klammer).

Tabelle 2.2. Bewertungsschlüssel für den kleinen Verhaltensversuch.

| Skala Parameter | 1 | 2 | 3 |
|--------------------|-------------------------|---|------------------|
| A: Losfliegen | Nach 4 Min. | Nach 1-4 Min. | Sofort (< 1 Min) |
| B: Streckenanteil | 0-10% | 10-50% | > 50% |
| C: Landepunkt | Außerhalb vom Duftstoff | In dem Viertel des Käfigs, wo der Duftstoff war | An der Schale |
| D: Zwischenstopp | > 4 | 1-3 | 0 |

Mit diesen Parametern wurde der Attraktivitätsindex (AI) laut der Formel:

$$AI = 0,25 \times A + 0,25 \times B + 0,25 \times C + 0,25 \times D$$

berechnet. Dieser Index wurde sowohl als absoluter Wert als auch relativiert auf die Kontrollprobe betrachtet.

Die absoluten AI Werte wurden mit dem t-Test für gepaarte Stichproben mit den Kontrollwerten verglichen.

2.5.1.2 Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung

Im großen Gazekäfig ($2 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$) in einem dunklen Raum wurde in jeder Ecke ein Baum (Salweide) gestellt. Die Bäume hatten vergleichbare Größe und Blattmasse und standen in der vorherigen Vegetationsperiode (2008) im Gewächshaus in der schattigen Exposition (auf Grund der geringsten Eierzahl im Jahr 2008 am wenigsten attraktiv). An einem von den vier Bäumen wurde ein 4 cm^2 großes Stück Filterpapier mit $100 \mu\text{l}$ Paraffinöl mit dem ausgewählten Duftstoff in einer Konzentration von 10^{-3} g/g angebracht. An den anderen Bäumen wurde Filterpapier mit Paraffinöl aber ohne den Duftstoff aufgehängt. Sobald ein Falterpärchen geschlüpft war, wurde es am selben Tag um 19.00 Uhr mittig in den Käfig gesetzt. Nachts wurde dann die Belüftung des Raumes ausgeschaltet damit die Duftstoffe frei diffundieren konnten und die Falter nicht gestört wurden. Tagsüber wurde der Raum durchgelüftet damit die Duftstoffe sich nicht anreichern konnten. Um 8.00 Uhr morgens wurde der Käfig nach Eiern und Faltern abgesucht und die Fundorte wurden notiert. Die Temperatur im Raum war gleichmäßig und betrug $20\text{-}23^\circ\text{C}$. In diesem Versuch wurden Nonanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol getestet.

2.5.2 Verhaltensversuch an L1 Larven

Die Larven des L1 Stadiums wurden am ersten Tag nach dem Schlüpfen getestet. Bevor sie ein anders Futter außer der Eihülle aufgenommen hatten, wurden sie in großen Plastikpetrischalen untersucht. Es wurde geprüft, ob die Larven ein selektives Fraßwahlverhalten zeigen. In die Petrischalen wurden je zwei Blätter, ein Salweidenblatt *Salix caprea* (Wirtspflanze) und ein Weißdornblatt *Cornus sp.* (Nichtwirtspflanze) gelegt. Die Blätter lagen auf einem feuchten Filterpapier etwa 10cm voneinander entfernt. In die Mitte wurden 15 Raupen auf ein 1cm² großes Filterpapier gesetzt. Die Petrischalen wurden von unten mittels einer LED-Lichtplatte mit gleichmäßig beleuchtet und stets 45 Minuten lang beobachtet. In folgenden Versuchen wurden statt Blättern Filterpapierstücke mit Duftstoffen angeboten. Es wurde immer ein Filterpapier mit Paraffinöl (Uvasolv, Merck) gegen ein Filterpapier mit einem Duftstoff in Paraffinöl getestet. Die Petrischalen wurden mit einer Alufolie abgedeckt. Nach 20, 45 und 60Min wurde die Position der Raupen notiert. Folgende Duftstoffe: (Z)-3-Hexen-1-ol, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-butytrat, Nonanal, Methylsalicylat, 2-Ethyl-hexan-1-ol, Linalool, Benzaldehyd, Decanal und 2-Methyl-5-hepten-6-on wurden getestet. Den Versuchsaufbau erklärt die Abbildung 2.7.

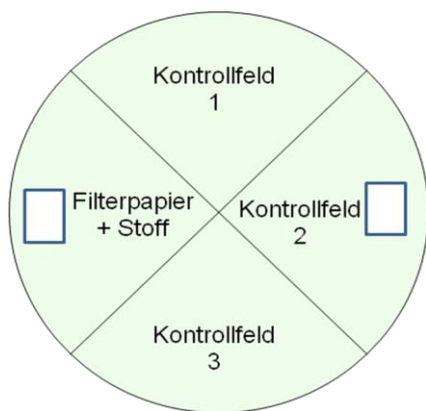


Abbildung 2.7. Versuchsaufbau für den Verhaltensversuch an L1 Larven.

2.6 Fütterungsversuch

Es wurden 20 Raupen einzeln in durchsichtigen Plastikdosen (14x14x4cm³) mit blauen Deckeln im Labor gezüchtet. Die Licht- und Temperaturbedingungen waren für alle gleich und betragen 22±2°C, Langtag 16/8 Stunden. Die Raupen erhielten alle zwei Tage abgewogenes Futter. Zehn Raupen bekamen Salweideblätter und zehn Zitterpappelblätter. Die Raupen wurden alle 8 Tage gewogen. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch Futterreste und Kotmenge getrocknet (2 Stunden bei 60°C) und separat gewogen. Im L4 Stadium wurde die Trocknungszeit, wegen der steigenden Größe der Kotballen, auf fünf Stunden verlängert. Die

Futtermenge wurde nach Bedarf erhöht. Manchmal war eine zusätzliche Fütterung nach einem Tag notwendig. Die Aufnahme und Verwertung der Nahrung wurde mit den nicht destruktiven, gravimetrischen Methoden nach Waldbauer, 1968 ermittelt. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit der Larven wurden keine Raupen getötet um deren Trockengewicht zu ermitteln. Der übrig gebliebene getrocknete Futterrest wurde anhand von Kalibrierkurven, die während des Experimentes erstellt wurden, auf die Frischmasse umgerechnet. Dieser Wert wurde von der angebotenen frischen Blattmasse abgezogen um die gefressene Futtermenge (frisch) zu ermitteln. Ein ähnliches Verfahren wurden auch bei Ernst, 1992 oder Moeser und Vidal, 2004 verwendet. Um die verwertete Futtermenge zu ermitteln wurde eine ähnliche Rechnung an den Trockenmassen durchgeführt. Dazu wurden von der angebotenen Trockenblattmasse die trockenen Kotmassen und die getrockneten Futterreste abgezogen. Anhand der ermittelten Futter- und Kotmengen konnten zwei Indices, die Verdaulichkeit der Nahrung (approximate digestibility- A.D.) und die Effizienz der Futterumsetzung (efficiency of conversion of ingested food in body substancy- E.C.I.) berechnet werden (Waldbauer, 1968). A.D. wurde für Trockenmassen und E.C.I. für Frischmassen ermittelt.

$$A.D. = (\text{Trockenmasse der aufgenommenen Nahrung} - \text{Kotmasse}) / \text{Trockenmasse der aufgenommenen Nahrung} \times 100$$

$$E.C.I. = \text{Gewichtszunahme der Raupe} / \text{Frischmasse der aufgenommenen Nahrung} \times 100$$

2.7 Ausbindeversuch

Die Raupen befanden sich in Gaze Käfigen ($30 \times 20 \times 5 \text{ cm}^3$) mit einem Klettverschluss an drei Seiten und waren dadurch vor Räubern (z.B. Vögeln) und Parasitoiden (z.B. Schlupfwespen) geschützt. Die Netze waren zusätzlich mit Klebeband abgedichtet. Plätze die in der Nähe von Ameisenhaufen lagen wurden gemieden. In einem Vorversuch wurde nachgewiesen, dass die Gaze netze keinen signifikanten Einfluss auf die Temperatur haben. Leichte Temperaturschwankungen haben sich auf $\pm 1^\circ \text{C}$ im Vergleich zur Außentemperatur beschränkt. Es wurde nachgewiesen, dass viele waldrandbewohnende Lepidopterenlarven den äußeren/terminalen Kronenbereich bevorzugen (Damm, 1999). Deswegen wurden die Gaze Käfige gezielt sowohl in der Innenkrone als auch in der Außenkrone positioniert. Die Larven wurden im Jahr 2006 alle 10-12 Tage und im Jahr 2007 am Anfang wöchentlich und nach vier Wochen alle vier Tage kontrolliert, die Ausfälle wurden notiert und falls kein Futter mehr vorhanden war wurden die Käfige umgesetzt (möglichst nahe dem Ursprungsort). Kurz vor der Verpuppung wurden die Raupen in die Plastikbecher mit der Blumenerde in Labor gebracht. Dies sollte weitere Verluste aufgrund des Wanderungs- und Suchbedürfnisses der

Raupen vermeiden. An den Versuchsbäumen wurden während des Versuchs die mikroklimatischen Daten (Lufttemperatur und Luftfeuchte) alle 10 Minuten mit einem Hobo Datenlogger (Onset Computer Corporation, Bourne, USA) aufgenommen

3 Ergebnisse

3.1 Versuchsbäume

Für alle Versuchsbäume wurde eine potentielle Sonnenscheindauer für sämtliche Monate aufgenommen. Die Mittelwerte aus dieser Messung zeigt Abbildung 3.1. Die potenzielle Sonnenscheindauer ist mit den Wachstumsbedingungen der Bäume und dem Mikroklima in dem die Raupen aufwachsen korreliert (Abbildung 3.2; Abbildung 3.1). In den schattigen Positionen konnte man die Sonne in der Vegetationsperiode (April-Oktober) maximal vier Stunden pro Tag sehen und auf den sonnigen Standorten waren es fünf bis elf Stunden.

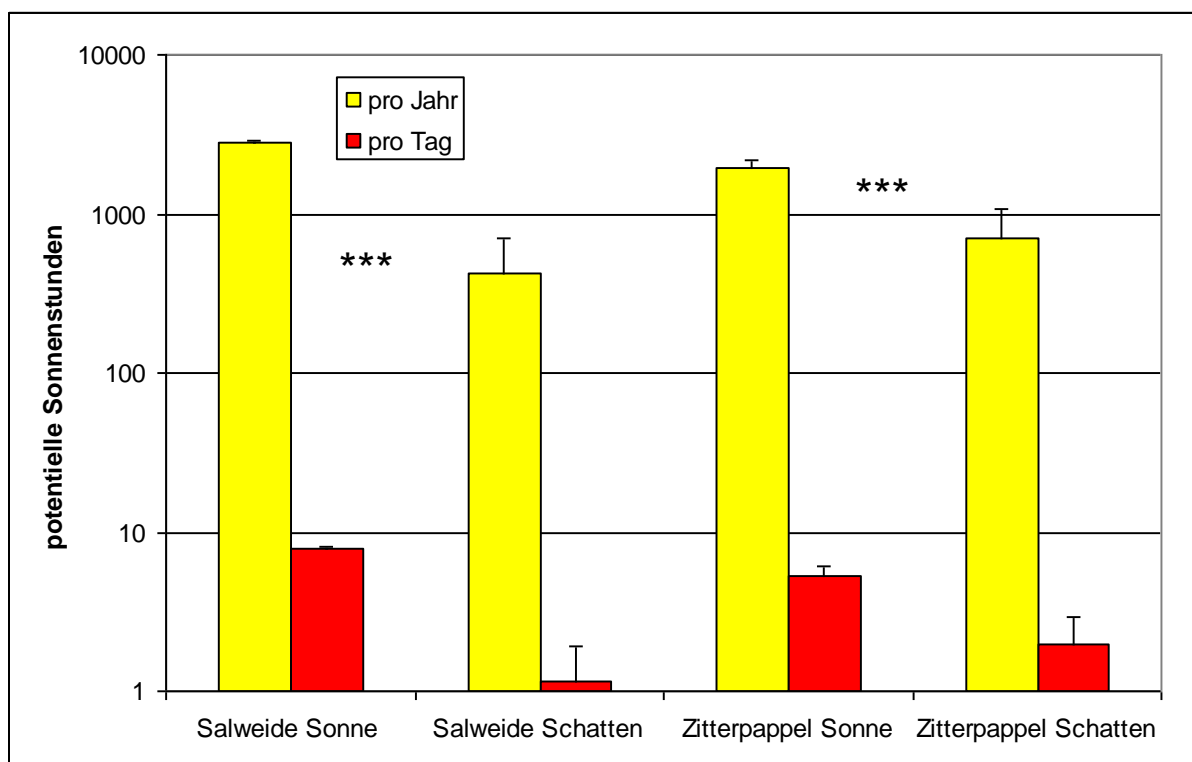


Abbildung 3.1. Potentielle Sonnenscheindauer für alle 32 Versuchsbäume im Freiland. Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert. Mittelwert \pm Standardabweichung; $p < 0,001 = ***$ (U-Test).

Im Jahr 2006 betrug die mittlere Temperatur $20,3^{\circ}\text{C}$ bis $20,6^{\circ}\text{C}$ an den sonnigen Stellen und war signifikant höher als im Schatten ($18,5^{\circ}\text{C}$ bis $18,7^{\circ}\text{C}$). Wie erwartet war die Tendenz bei der Luftfeuchte umgekehrt. Die Werte lagen im Jahr 2006 zwischen 68 und 78% und im Jahr 2007 zwischen 40 und 88%. Hier waren aber nur die Salweide-Standorte voneinander signifikant unterschiedlich (Abbildung 3.2). Im Jahr 2007 wurden ähnliche Verhältnisse

beobachtet, wobei die Temperaturen niedriger und die Luftfeuchten höher als im Jahr 2006 waren. Auch im Jahr 2007 waren die Unterschiede statistisch signifikant (Abbildung 3.1).

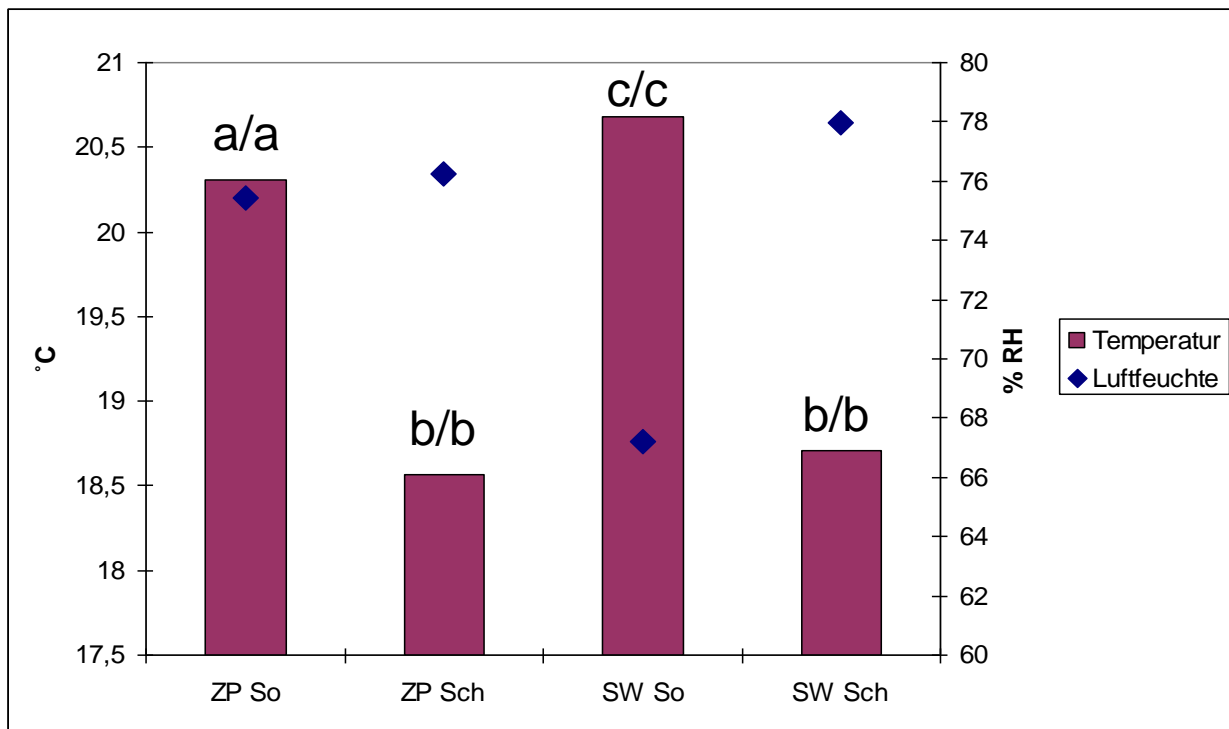


Abbildung 3.2. Mikroklimatische Bedingungen während der Vegetationsperiode 2006. ANOVA $F(3,29932)=299,5$ $p=0,00$ (Tukey HSD) linker Buchstabe für Temperatur/ rechter Buchstabe für Luftfeuchte.

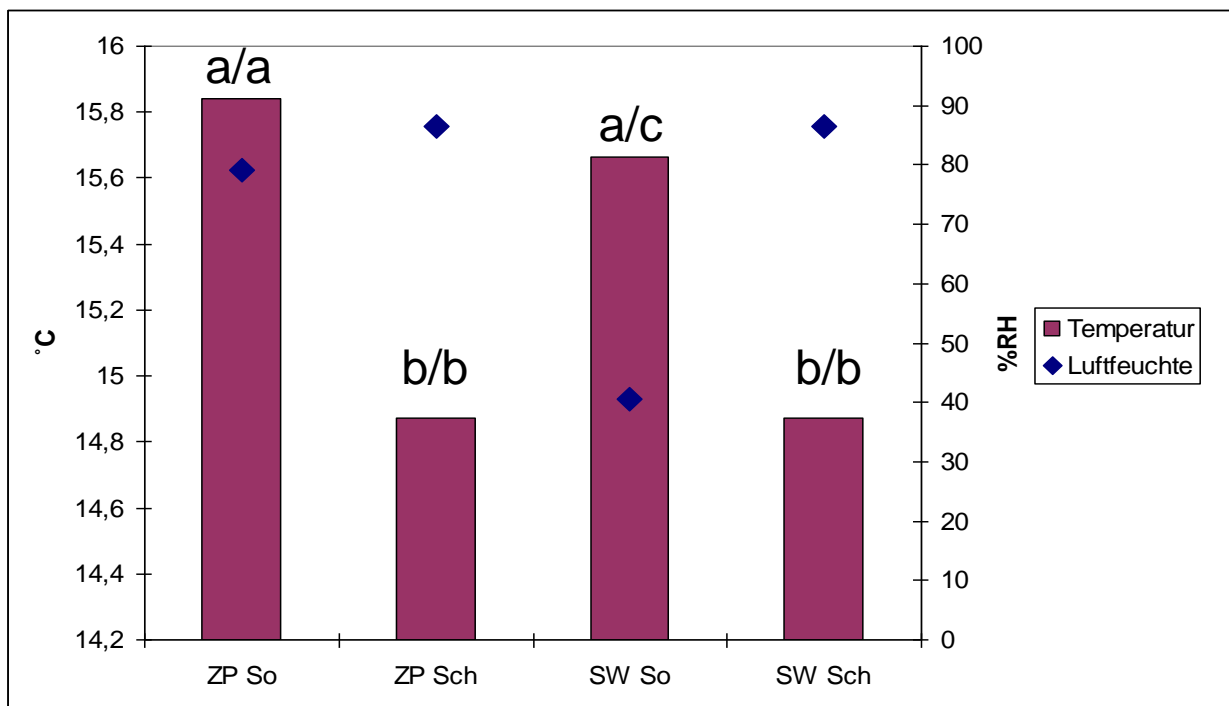


Abbildung 3.1. Mikroklimatische Bedingungen während der Vegetationsperiode 2007. ANOVA $F(3,34256)=88,1$ $p=0,00$ (Tukey HSD Test) linker Buchstabe für Temperatur/ rechter Buchstabe für Luftfeuchte.

3.2 REM Aufnahmen

3.2.1 Antennenmorphologie

Die Antennen des Abendpfauenauges sind fadenförmig und über 1cm lang. Sie bestehen aus etwa 50-60 Gliedern. Die männlichen Antennen sind kräftiger als die weiblichen. Durch ihre sehr langen, sogar makroskopisch sichtbaren Sensillen scheinen sie breiter zu sein. Die Oberseite der Antennen ist stark beschuppt.

3.2.2 Aufnahmen

Es wurden 31 Aufnahmen (25 von weiblichen und sechs von männlichen Antennen) bei Vergrößerungsfaktoren zwischen 100x und 40.000x gemacht. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht über die beobachteten Sensillentypen.

Tabelle 3.1. Sensillentypen beim Abendpfauenaugen

| Morphologischer Sensillentyp | Form | Länge ca. | Durchmesser (Basis) | Beobachtungen | Ähnlichkeiten zu (Quellen) |
|------------------------------|------|---------------------|---------------------|--|---|
| a | Haar | 90 µm | 7 µm | An den Seiten und auf der Unterseite; große und lange Sensillen; einzeln; symmetrisch in alle Richtungen verteilt; beweglich eingelenkt Abbildung 3.2. | <i>S. chaeticum</i> (Faucheux, 1990; Hansson, 1995) |
| b | Haar | 60 µm ♀ 400 µm ♂ | 6 µm ♀ 10 µm ♂ | Auf der Unterseite; bei Weibchen mittelgroß, bei Männchen sehr groß; leicht gebogen; dicht in „V“ förmige Muster eingeordnet (Abbildung 3.7); glatte Oberfläche (Abbildung 3.4); unflexibel verankert. | <i>S. trichodeum</i> (Steinbrecht, 1970) |
| c | Haar | 30 µm | 3 µm | In den Zwischenräumen von „V“ Muster von „b“; kleine, dünne spitz zulaufende Härchen; spärlich verteilt mit geringelter Oberfläche (Abbildung 3.5), unflexibel verankert. | <i>S. basiconicum</i> (Pophof et al., 2005) |
| d | Haar | 15 µm | 12 µm | Auf mehreren Gliedern im terminalen Teil der Antenne (Abbildung 3.3, | <i>S. basiconicum</i> (Hodgson, 1974; |

| | | | | | |
|--|--|--|--|---|--------------------------|
| | | | | Abbildung 3.6) (nur bei Weibchen beobachtet); kurzes aber dickes Sensillum; einzeln oder paarweise symmetrisch verteilt (klassisches olfaktorisches Sensillum); Verankerung unflexibel. | Sukontason et al., 2007) |
|--|--|--|--|---|--------------------------|

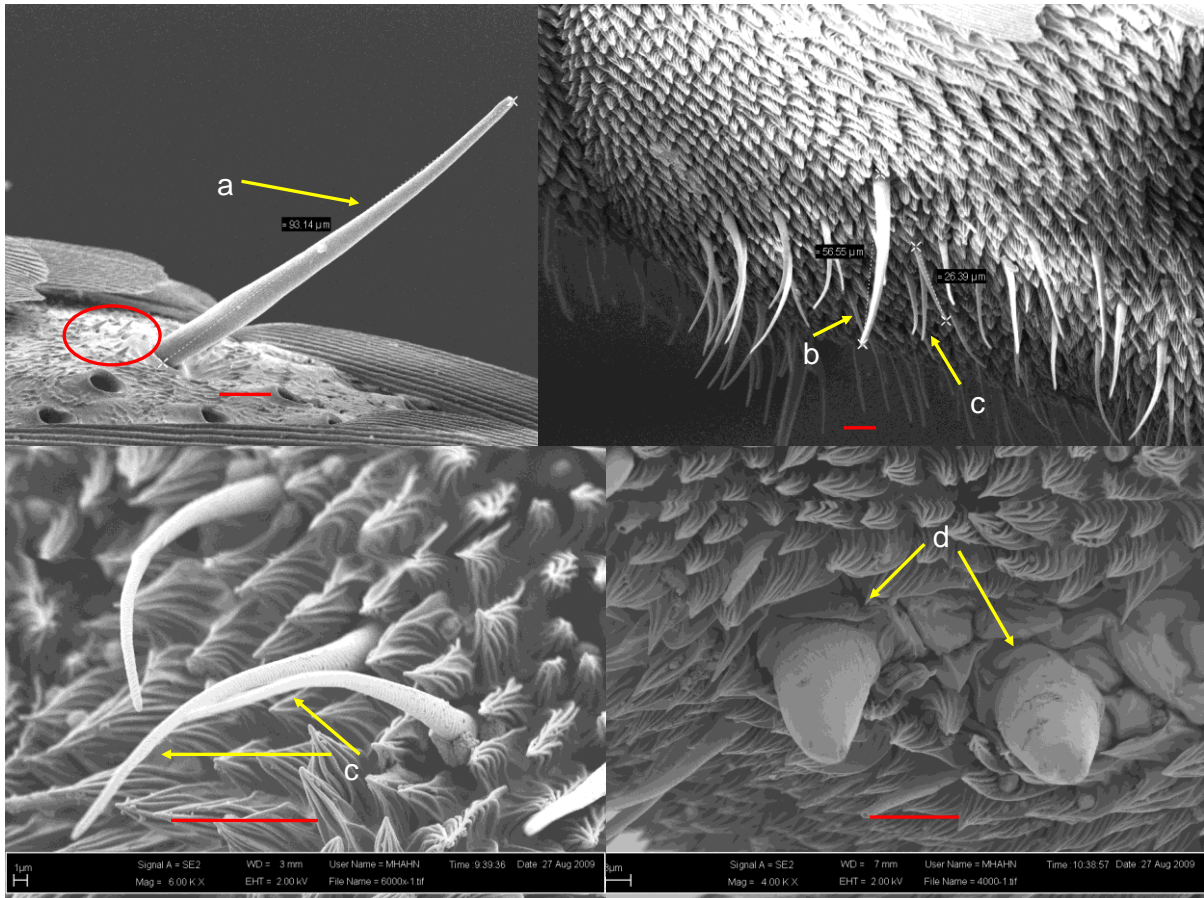


Abbildung 3.2. Verschiedene Sensillentypen a, b,c,d (Tabelle 3.1) auf den Antennen von Abendpfauenaugen. Der rote Balken ist 10μm lang.

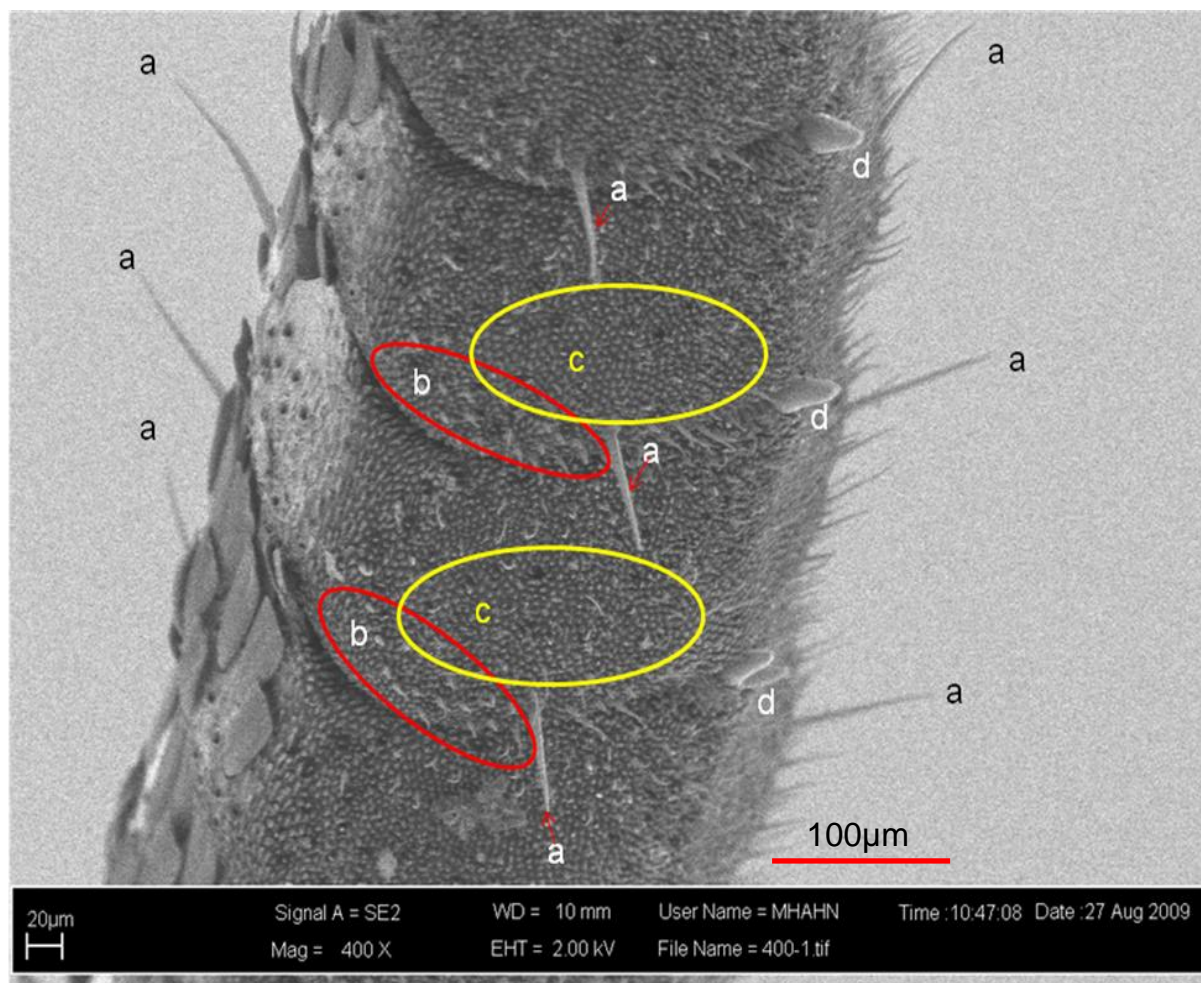


Abbildung 3.3. Terminaler Teil der Antenne vom weiblichen Abendpfaueuaage. Verteilung der verschiedenen Sensillentypen (Tabelle 3.1).

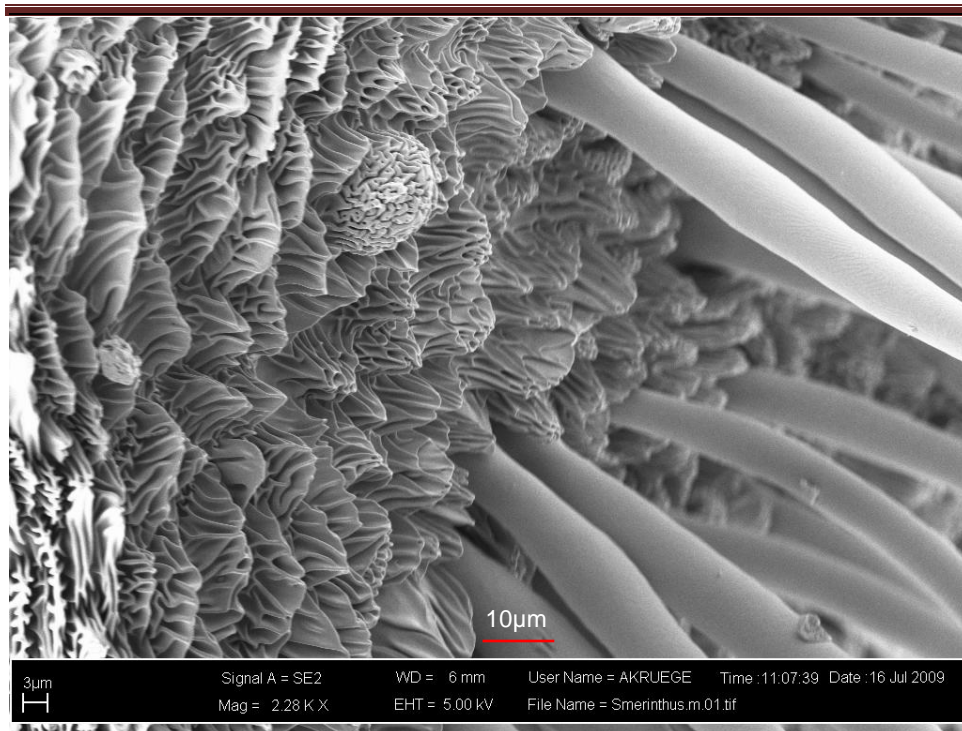


Abbildung 3.4. Sensillentyp „b“, glatte Oberfläche.

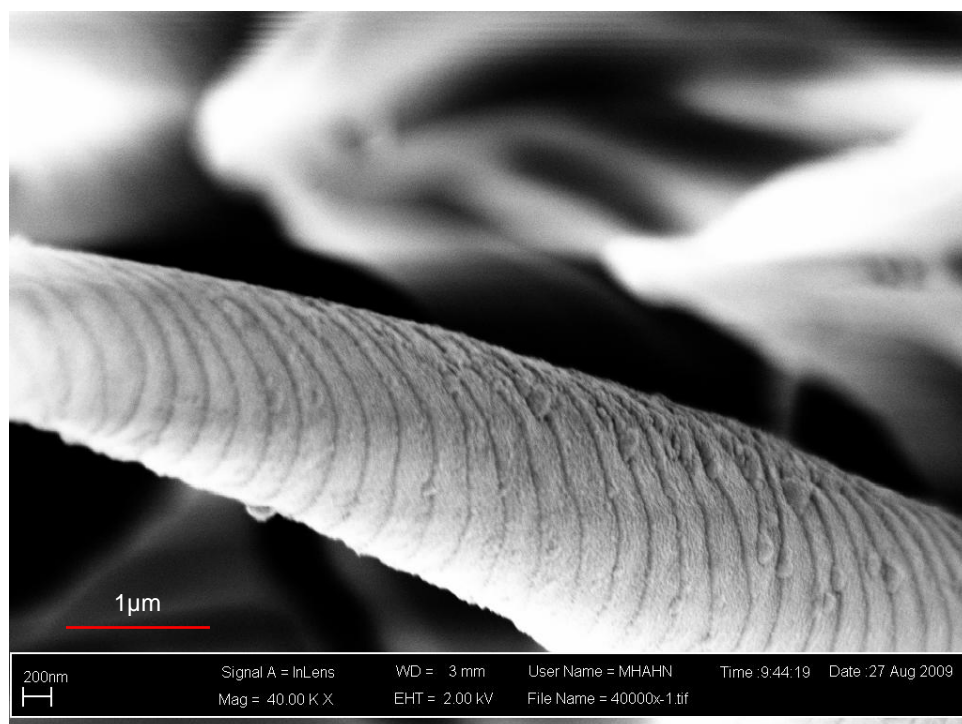


Abbildung 3.5. Sensillumtyp „c“, geringelte Oberfläche.

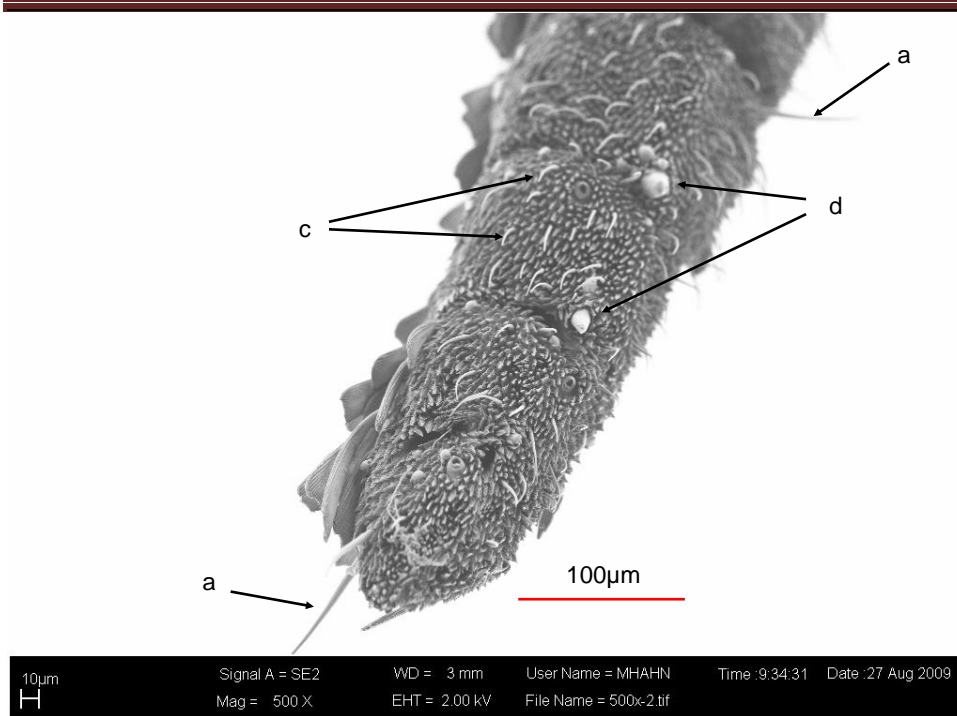


Abbildung 3.6. Spitze der weiblichen Antenne. Sichtbares *S. chaeticum* „a“ sowie *S. basiconicum* „c“ und „d“.

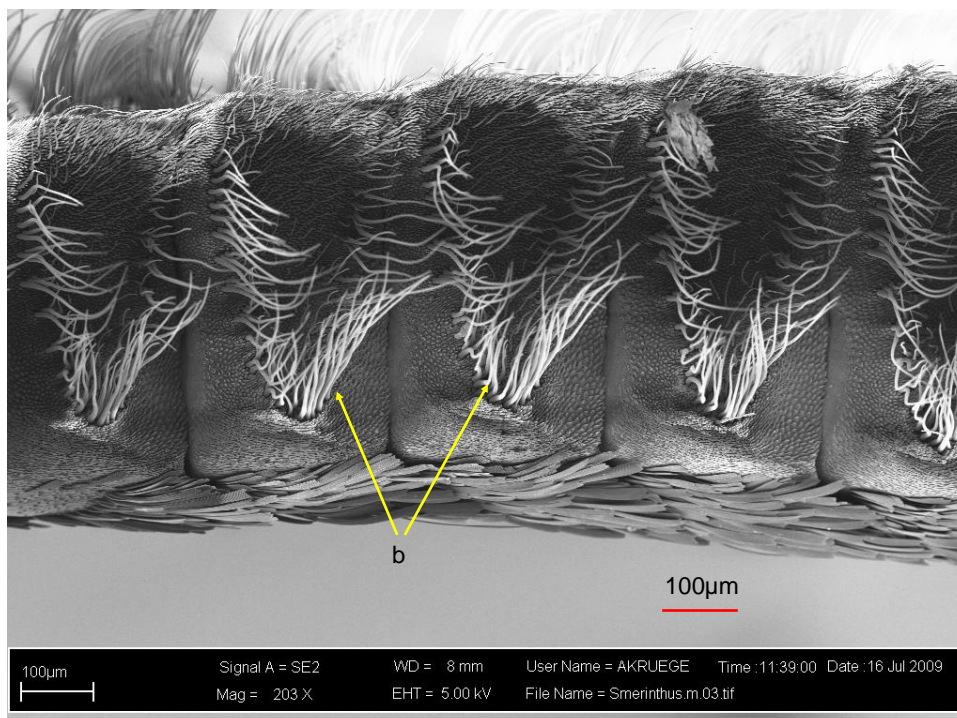


Abbildung 3.7. Männliche Antenne des Abendpfauenauges. Sichtbare „V“ förmige Anordnung der Sensillen „b“.

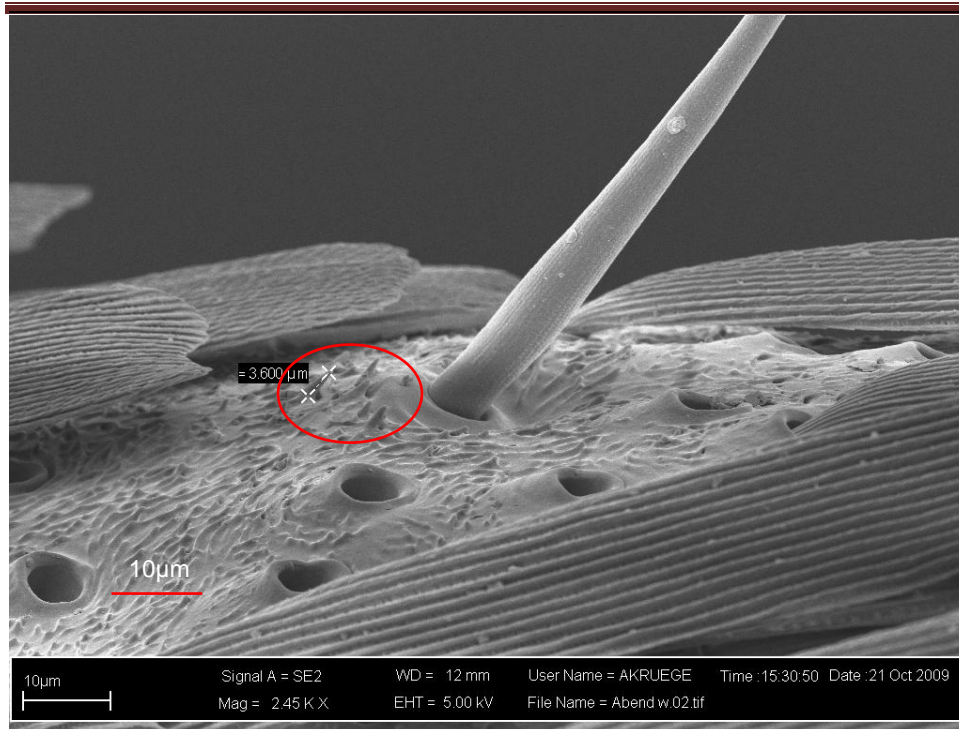


Abbildung 3.8. Weibliche Antenne, im Kreis Microtrichen, sichtbare gelenkartige Basis der *S. chaeticum*.
Beim Ansatz der *S. chaeticum* wurden kleine (bis 3,6µm) Microtrichen beobachtet (Abbildung 3.8).

3.3 GC-MS/EAD, EAG

3.3.1 GC-MS/EAD

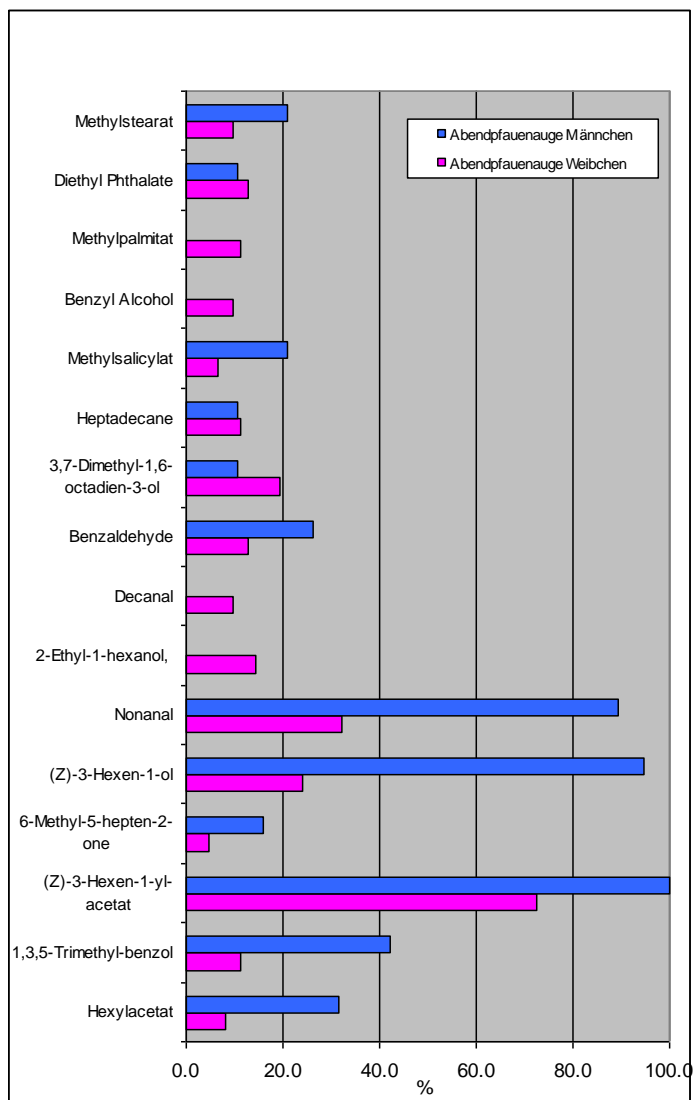


Abbildung 3.9. Geschlechtsunterschiede in den Reaktionen auf ausgewählte Stoffe. Häufigkeit der Antennenreaktionen auf ausgewählte Stoffe in Prozent. Die Reihenfolge ergibt sich aus der Retentionszeit der Stoffe, ♀ N=8, ♂N=2.

Die Tabelle 3.2 zeigt alle nachgewiesenen elektrophysiologisch aktiven Stoffe und deren geringste Konzentration, die eine signifikante Reaktion ausgelöst hat.

Tabelle 3.2. Elektrophysiologisch aktive Stoffe; RI= Retentionsindex, RZ= Retentionszeit, x= RI liegt außerhalb der kalibrierten Referenzzeiten. Signifikanzniveau gegenüber der negativen Kontrolle= * p<0.05; **p<0.01; * p<0.001. Die Duftstoffe wurden in Paraffinöl (g/g) gelöst.**

| Nr. | CAS | RI | RZ | Stoff | Bezugsquelle | Elektrophysiologische Reaktion | | EAG ♀ | |
|-----|--------------|------|------|--|-------------------|--------------------------------|------|------------------|-------------|
| | | | | | | ♀ | ♂ | Reaktion bei | Signifikanz |
| | | | | | | N=62 | N=19 | | |
| 1 | 110-43-0 | 1186 | 8,4 | Heptan-2-on | 100% Aldrich | 6 | 0 | | |
| 2 | 142-92-7 | 1273 | 10,0 | Hexylacetat | 100% Fluka | 5 | 6 | | |
| 3 | 124-13-0 | 1293 | 10,2 | Octanal | 100% Acros | 4 | 0 | 10 ⁻⁵ | *** |
| 4 | 108-67-8 | 1246 | 10,3 | 1,3,5-Trimethylbenzol | 98% Aldrich | 7 | 8 | | |
| 5 | 3681-71-8 | 1318 | 10,8 | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 100% Aldrich | 45 | 19 | 10 ⁻⁷ | ** |
| 6 | 110-93-0 | 1336 | 11,1 | 6-Methyl-5-hepten-2-on | 100% Fluka | 3 | 3 | 10 ⁻⁵ | * |
| 7 | 928-96-1 | 1374 | 11,8 | (Z)-3-Hexen-1-ol | 100% Acros | 15 | 18 | 10 ⁻⁷ | ** |
| 8 | 124-19-6 | 1389 | 12,1 | Nonanal | 90% Acros | 20 | 17 | 10 ⁻⁷ | * |
| 9 | 632-22-4 | 1431 | 13,1 | Tetramethylharnstoff | 99% Aldrich | 4 | 0 | 10 ⁻⁴ | ** |
| 10 | 16491-36-4 | 1452 | 13,2 | (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat | 100% Aldrich | 0 | 4 | 10 ⁻³ | * |
| 11 | 53398-84-8 | | | (E)-3-Hexen-1-yl-butyrat | | | | | |
| 12 | 104-76-7 | 1476 | 13,5 | 2-Ethyl-hexan-1-ol | 100% Merck | 9 | 0 | 10 ⁻⁷ | * |
| 13 | 112-31-2 | 1493 | 13,9 | Decanal | 100% Acros | 6 | 0 | 10 ⁻⁵ | * |
| 14 | 100-52-7 | 1520 | 14,4 | Benzaldehyd | 100% Acros | 8 | 5 | 10 ⁻⁷ | ** |
| 15 | 78-70-6 | 1530 | 14,5 | 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol (Linalool) | 100% Merck | 12 | 2 | 10 ⁻⁷ | *** |
| 16 | 544-76-3 | 1600 | 15,5 | Hexadecan | 100% Acros | 3 | 0 | | |
| 17 | 629-78-7 | 1700 | 17,1 | Heptadecan | 100% Acros | 7 | 2 | 0 | |
| 18 | 119-36-8 | 1778 | 18,3 | Methylsalicylat | 100% Acros | 4 | 4 | 10 ⁻⁶ | * |
| 19 | 1000141-11-8 | | 18,6 | (E)-2,6-Dimethyl-3,5,7-octatriene-2-ol | Nicht bestätigt | 6 | 0 | | |
| 20 | 10233-13-3 | | 19,0 | 1-Methylethyl-dodecanoat | Nicht bestätigt | 0 | 4 | | |
| 21 | 3796-70-1 | 1826 | 19,2 | (E,E)-6,10-Dimethyl-5,9-undecadien-2-on | 97% Aldrich | 4 | 0 | | |
| 22 | 100-51-6 | 1871 | 19,5 | Benzylalkohol | 100% Aldrich | 6 | 0 | 10 ⁻⁷ | ** |
| 23 | 124-10-7 | x | 21,4 | Methyl tetradecanoat | 99% Fluka | 2 | 0 | | |
| 24 | 112-39-0 | x | 23,9 | Methylpalmitat | 99,5% Fluka | 7 | 0 | 0 | |
| 25 | 84-66-2 | x | 25,8 | Diethyl Phthalat | 98% Fluka | 8 | 2 | | |
| 26 | 1025-15-6 | x | 26,0 | 1,3,5-Tri-2-propenyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trion, - | Nicht bestätigt | 4 | 0 | | |
| 27 | 112-61-8 | x | 26,5 | Methylstearat | 99% Sigma | 6 | 4 | 0 | |
| 28 | 117-81-7 | x | 29,4 | Bis(2-ethylhexyl) phthalat | 99% Sigma-Aldrich | 4 | 0 | | |

Aus der Abbildung 3.9 wird deutlich, dass 3 Stoffe ((Z)-3-Hexen-1-yl-acetat; (Z)-3-Hexen-1-ol und Nonanal) fast immer eine Reaktion bei männlichen Faltern ausgelöst haben. Die weiblichen Falter zeigten bei über 20% der Messungen die Reaktionen auf oben genannte Stoffe. Es gab aber eine recht große Anzahl Stoffe aus verschiedenen Stoffgruppen (Alkane, Benzole, Aldehyde, Alkohole), die nur bei unter 20% aller Messungen eine sichtbare

Reaktion ausgelöst haben. Auf 13 Stoffe (Benzylalkohol, 2-Ethyl-hexan-1-ol, Decanal, Hexadecan, Heptan-2-one, Octanal, Tetramethylharnstoff, (E)-2,6-Dimethyl-3,5,7-octatriene-2-ol, (E,E)-6,10-Dimethyl-5,9-undecadien-2-on, Methyl tetradecanoat, Methylpalmitat, 1,3,5-Tri-2-propenyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trion und Bis(2-ethylhexyl)phthalat) reagierten nur Weibchen (Tabelle 3.2). Aber nur vier Stoffe (Benzyl Alkohol, 2-Ethyl-hexan-1-ol, Decanal und Methylpalmitat) wurden nur von Weibchen wahrgenommen. Die Weibchen haben am häufigsten auf (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat reagiert. Ausschließlich die Männchen konnten (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat und 1-Methylethyl-dodecanoat riechen.

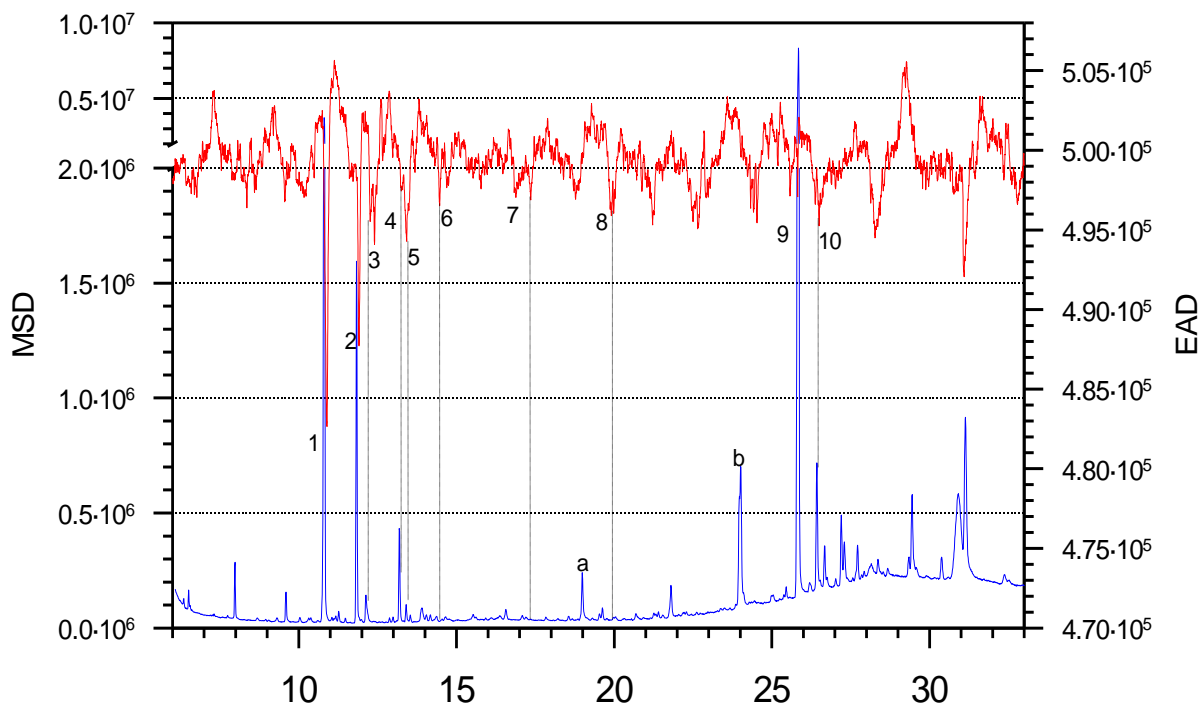


Abbildung 3.10. Repräsentative EAD Messung. Abendpfauenauge Weibchen, Duftspektrum von Salweide Schatten. Markierte Stoffe: 1:(Z)-3-Hexen-1-yl-acetat; 2:(Z)-3-Hexen-1-ol; 3:Nonanal; 4: (Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat; 5:2-Ethyl-hexan-1-ol; 6:Benzaldehyd; 7:Heptadecan; 8:Benzylalkohol; 9:Diethylphthalat; 10:Methylstearat. Die Duftstoffe die mit Buchstaben markiert sind, haben in anderen GC-MS/EAD-Messungen Reaktionen ausgelöst: a) Methylsalicylat, b) Methylpalmitat.

3.3.2 EAG-Verdünnungsreihen

Von dem breiten Duftbuket der Wirtspflanzen nimmt das Abendpfauenauge 28 Substanzen wahr. 16 von diesen Stoffen zeigten quantitative Unterschiede zwischen den Baumarten oder deren Expositionen. Für 18 Stoffe wurden Dosis-Antwort Kurven erstellt. Im Verhaltensversuch für die Nahbereichsorientierung wurden acht Stoffe und für die Mittelbereichsorientierung drei Stoffe getestet.

Weiterhin wurden von den elektrophysiologisch aktiven Duftstoffen 15 für die Untersuchungen mit Dosis-Antwort-Kurven ausgewählt. Diese Stoffe wurden in den Konzentrationen 10^{-7} bis 10^{-1} in Paraffinöl (g/g; Uvasolv, Merck) mehrfach während zwei Vegetationsperioden (2008 und 2009) (Tabelle 2.1) getestet. Von den 15 getesteten Duftstoffen konnte man bei 13 eine signifikante elektrophysiologische Reaktion gegenüber der negativen Kontrolle beobachten. Sogar sieben Stoffe haben schon in der Konzentration 10^{-7} (g/g) eine Reaktion verursacht (Tabelle 3.2). Für alle Stoffe wurden Graphiken wie Abbildung 3.11 erstellt, um die Konzentrationsabhängigkeit der Antennenantworten darzustellen. Die Ergebnisse der statistischen Tests auf die niedrigste signifikante vom Untergrund unterscheidbare Antennenantwort zeigt Tabelle 3.3. Die Stoffe Nonanal, Decanal und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wurden in beiden Versuchsjahren getestet und die Ergebnisse zeigt Tabelle 3.4. An diesen Beispielen sieht man leichte Unterschiede in der Empfindlichkeit der Antennen.

Tabelle 3.3. Signifikanzniveau der Antennenreaktion auf getestete Verdünnungsstufen (g/g).

| Stoff | CAS | 10^{-7} | 10^{-6} | 10^{-5} | 10^{-4} | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1} |
|--------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol | 78-70-6 | *** | *** | ** | *** | *** | *** | *** |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | 928-96-1 | ** | ** | *** | *** | *** | *** | *** |
| Benzaldehyd | 100-52-7 | ** | * | * | ** | *** | *** | *** |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 3681-71-8 | * | *** | *** | *** | *** | *** | *** |
| Benzylalcohol | 100-51-6 | * | ** | *** | ** | ** | *** | *** |
| Nonanal | 124-19-6 | * | | * | ** | *** | *** | *** |
| 2-Ethyl-hexan-1-ol | 104-76-7 | * | | | * | *** | ** | *** |
| Methylsalicylat | 19-36-8 | | * | * | * | * | ** | ** |
| 6-Methyl-5-hepten-2-on | 110-93-0 | | | * | *** | *** | *** | *** |
| Octanal | 124-13-0 | | | *** | *** | *** | *** | *** |
| Hexanal | 66-25-1 | | | | *** | *** | *** | *** |
| Tetramethylharnstoff | 632-22-4 | | | | ** | *** | *** | *** |
| (Z)-3-Hexenylbutyrat | 016491-36-4 | | | | | * | ** | *** |
| (Z)-3-Hexyl isovalerat | 35154-45-1 | | | | | * | *** | *** |
| Decanal | 112-31-2 | | | | | * | ** | ** |
| Methylpalmitat | 112-39-0 | | | | | | | |
| Methylstearat | 112-61-8 | | | | | | | |
| Heptadecan | 629-78-7 | | | | | | | |

Tabelle 3.4. Der Vergleich der Empfindlichkeit der Antenne des Abendpfauenauges auf drei Duftstoffe in den beiden Versuchsjahren 2008 und 2009.

| | Nonanal | | Decanal | | (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|-------------------------|-------------|
| | Konzentration (g/g) | Signifikanz | Konzentration (g/g) | Signifikanz | Konzentration (g/g) | Signifikanz |
| 2008 | 10^{-5} | ** | 10^{-5} | * | 10^{-7} | ** |
| 2009 | 10^{-7} | * | 10^{-3} | * | 10^{-7} | * |

Alle anderen Stoffe wurden nur in einem Versuchsjahr getestet.

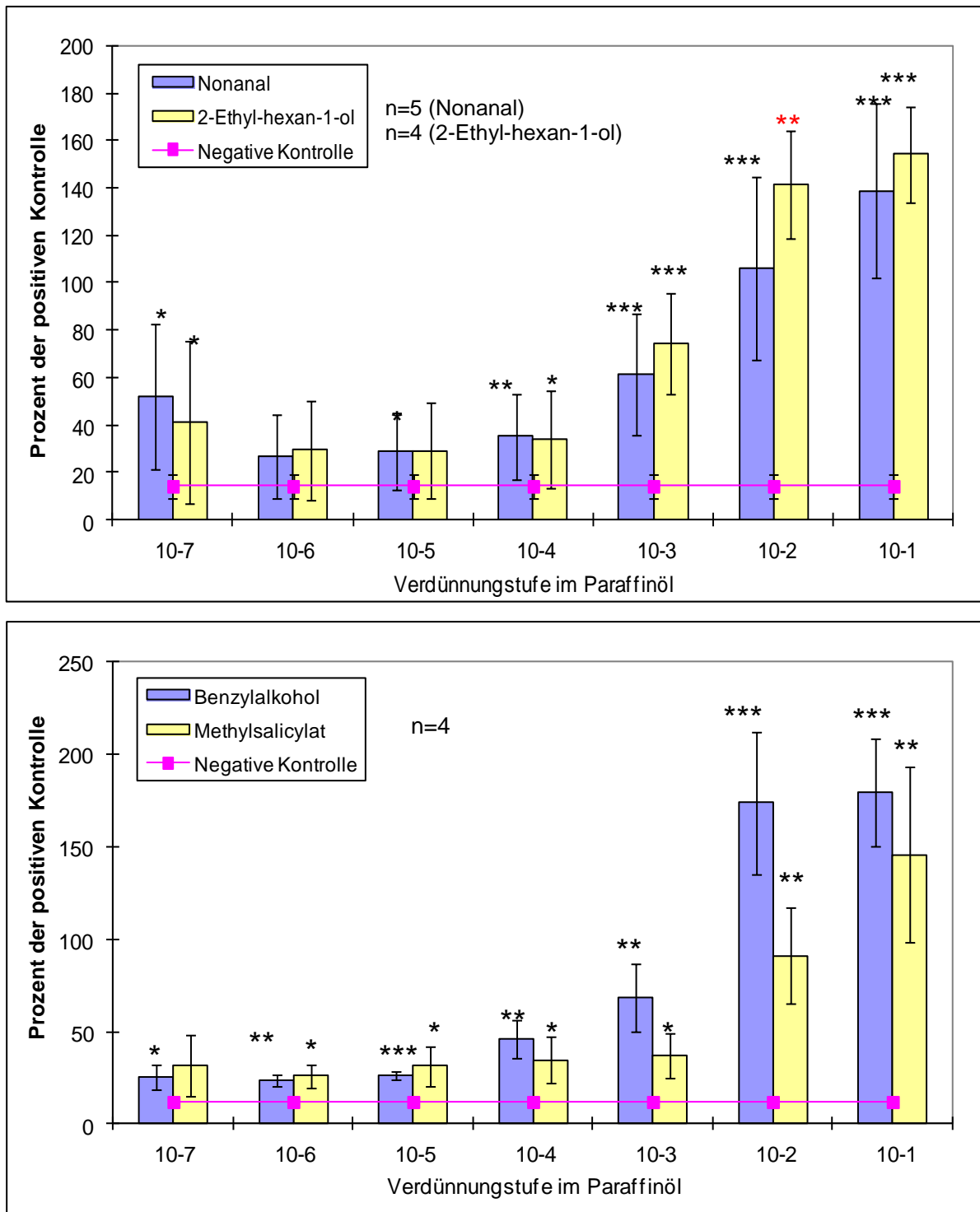


Abbildung 3.11. Relative elektrophysiologische Reaktionen der Antennen des Abendpfauenauges auf unterschiedliche Duftstoffkonzentrationen von Nonanal und 2-Ethyl-hexan-1-ol sowie Benzylalkohol und Methylsalicylat (unten). Mittelwerte aus 4-5 Messungen (n) an drei Individuen (N=3). Die Balken zeigen die Standardabweichung. Als negative Kontrolle wurde eine Reaktion auf Filterpapier mit Paraffin verwendet. Um das Signifikanzniveau gegenüber der negativen Kontrolle zu bestimmen wurde der t-Test (schwarz) bzw. der U-Test bei nicht normal verteilten Daten (Hemming und Lindroth, 1999) verwendet, * p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001.

3.4 Verhaltensversuche

3.4.1 Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung

In diesem Versuch wurde geprüft wie die Falter auf einzelne Duftstoffe reagieren. Ähnlich wie im typischen Vierarm-Olfaktometer hatten die Falter vier Möglichkeiten, wo sie hinfliegen konnten. Sie wurden stets über einen definierten Zeitraum beobachtet. Insgesamt wurden sechs Falter getestet (vier weibliche und zwei männliche). Eine genauere Aufschlüsselung der Ergebnisse zeigt Tabelle 3.5. Es konnten maximal zwei Falter parallel beobachtet werden. Männliche Tiere zeigten höhere Aktivitäten als weibliche. Die Tiere waren am aktivsten in den Dämmerungsstunden von 18.00 Uhr bis 21.00 Uhr. Danach ließ die Aktivität nach. Es wurden folgende acht Stoffe getestet: Methylsalicylat, Nonanal, Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, 2-Ethyl-hexan-1-ol, Benzylalkohol und Decanal (Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5 zeigt wie oft die Falter zum jeweiligen Duftstoff geflogen sind (Attraktivitätsindex (AI) >2) und wie oft der Stoff getestet wurde. Eine grüne Markierung bedeutet, dass der Attraktivitätsindex (AI) bei über 20% der Experimente größer als 2 war. Die männlichen Falter zeigten deutlich geringere Aktivitäten im Vergleich zu den Weibchen. Manchmal waren die Falter aus einem ungeklärten Grund (Uhrzeit, Alter, Mondphase, Witterung) besonders unkooperativ und haben keine Aktivitäten gezeigt. Deswegen wurde eine zusätzliche Auswertung ohne diese sog. „0“-Ereignisse durchgeführt. Die Prozentwerte des Attraktivitätsindex (Kapitel 2.5.1.1) haben sich dann deutlich erhöht. Die Substanz 2-Ethyl-hexan-1-ol erreichte nach dieser Rechnung über 40%, deswegen ist sie auch in der Tabelle 3.5 grün markiert. In dieser Tabelle wurden keine Kontrollergebnisse berücksichtigt. Dagegen zeigen Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13 die prozentuelle Betrachtung des Attraktivitätsindex gegenüber der Kontrolle. Hier wurden die Werte ab 105% grün und unter 80% rot markiert. Die statistische Auswertung mit dem t-Test für gepaarte Stichproben ergab keine signifikanten Unterschiede. Jedoch wurden die Stoffe, die sowohl in der Tabelle 3.5 als auch in den Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13 grün hervorgehoben sind, als „attraktiv“ bezeichnet. Für Weibchen waren es Hexylacetat und Benzylalkohol und für Männchen Nonanal, 2-Ethyl-hexan-1-ol und Benzylakohol. Für weibliche Tiere konnte man auch abschreckend wirkende Duftstoffe identifizieren. Es waren (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und Methylsalicylat. Für männliche Tiere wurde kein abstoßender Duftstoff nachgewiesen. Die prozentuelle Betrachtung hat hier mehr Aussagekraft, da sie die Kontrollergebnisse berücksichtigt.

Alle attraktiven Stoffe außer Hexylacetat wurden in den Verdünnungsreihen getestet (Kapitel 3.3.2).

Tabelle 3.5. Ergebnisse des Verhaltensversuchs zum Nahorientierungsbereich, grüne Markierung bei Experimenten, bei denen der Attraktivitätsindex bei über 20% (bzw. >40% nach dem Ausschließen von „0“- Ergebnissen) der Versuche größer als 2 war.

| Getesteter Stoff | | Abendpfauenauge Weibchen N=4 | Abendpfauenauge Männchen N=2 |
|-------------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Methylsalicylat | Wiederholungen | 15 | 9 |
| | Wie oft AI >2* | 2 (13%) | 2 (22%) |
| Nonanal | Wiederholungen | 9 | 11 |
| | Wie oft AI >2 | 1 (11%) | 5 (45%) |
| Hexylacetat | Wiederholungen | 12 | 11 |
| | Wie oft AI >2 | 3 (25%) | 2 (18%) |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | Wiederholungen | 9 | 6 |
| | Wie oft AI >2 | 2 (22%) | 1 (17%) |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | Wiederholungen | 3 | 9 |
| | Wie oft AI >2 | 0 (0%) | 0 (0%) |
| 2-Ethyl-hexan-1-ol | Wiederholungen | 3 | 11 |
| | Wie oft AI >2 | 0 (0%) | 2 (18%) |
| Benzylalcohol | Wiederholungen | 12 | 11 |
| | Wie oft AI >2 | 3 (25%) | 4(36%) |
| Decanal | Wiederholungen | 6 | 6 |
| | Wie oft AI >2 | 1 (17%) | 1 (17%) |

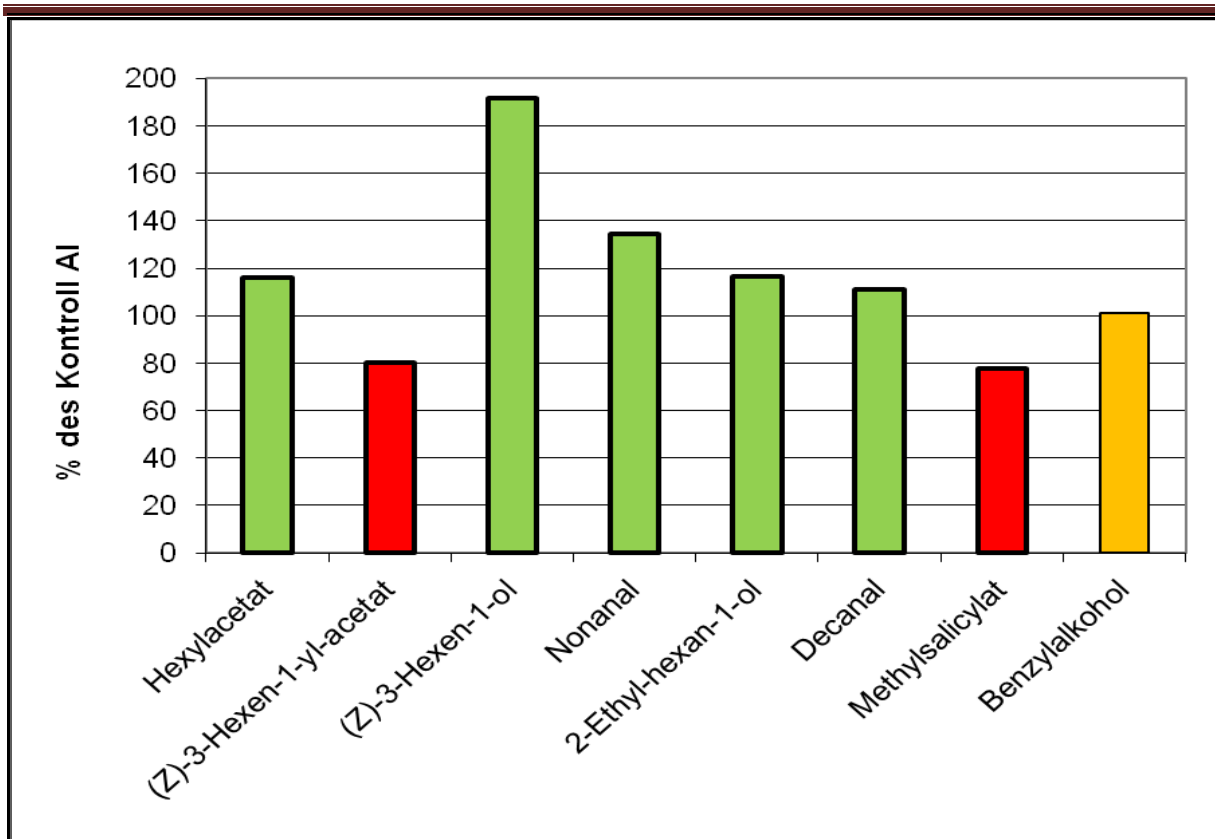


Abbildung 3.12. Verhaltensversuch zum Nahorientierungsbereich an weiblichen Abendpfauenaugen, relative Betrachtung des Verhaltensversuchs zur Nahbereichsorientierung, grün >105%, rot <80%.

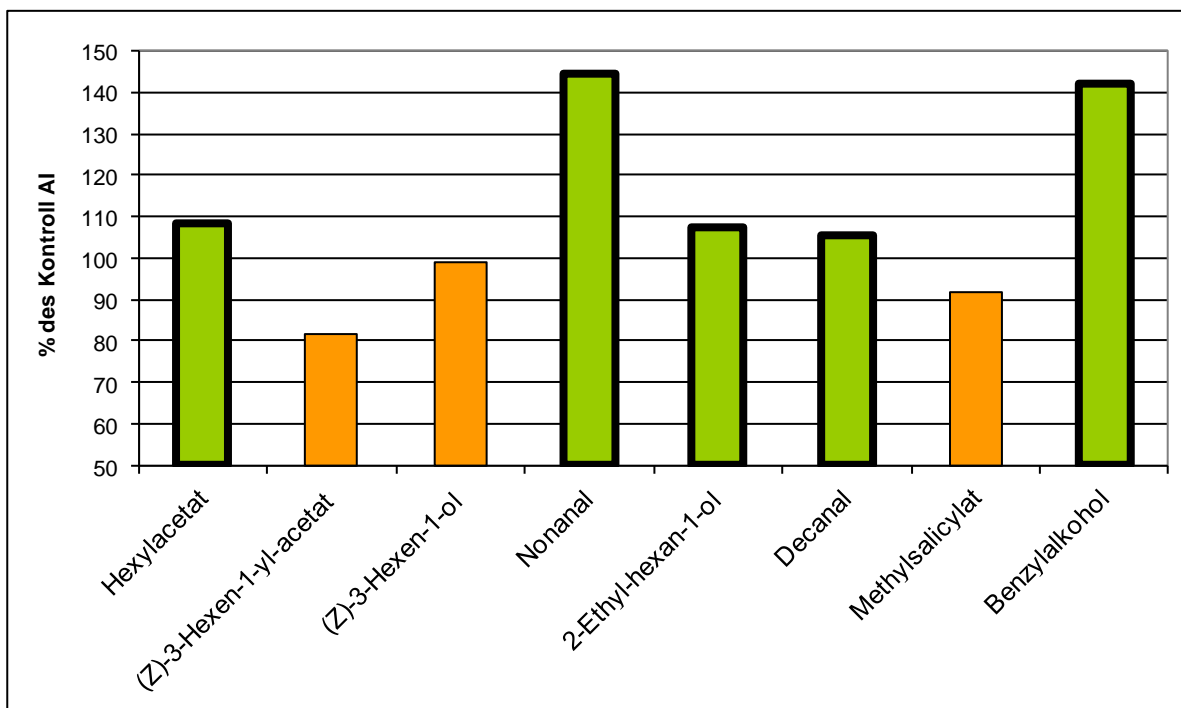


Abbildung 3.13. Verhaltensversuch zum Nahorientierungsbereich an männlichen Abendpfauenaugen, relative Betrachtung des Verhaltensversuchs zur Nahbereichsorientierung, grün >105%.

3.4.2 Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung

Die Falter konnten in diesem Versuch einen Eiablageplatz im großen Gazekäfig wählen. Als Eiablageplatz hatten sie vier Salweiden zu Verfügung. Auf einem Baum wurde eine zusätzliche Duftquelle (Filterpapier) befestigt. Es wurden fünf Abendpfauenaugen (drei Weibchen und zwei Männchen) getestet. Drei Duftstoffe: Nonanal, Benzyl Alkohol und Methylsalicylat wurden je zweimal getestet. Es wurden keine Eier abgelegt. Man konnte nur den Landepunkt der Falter betrachten. Auf Grund der geringen Anzahl der untersuchten Falter und wegen fehlender Eiablage konnten keine signifikanten Tendenzen festgestellt werden.

3.4.3 Fraßwahlversuch an L1 Larven

Die Larven des L1 Stadiums sind sehr mobil. Direkt nach dem Schlüpfen gehen sie auf die Nahrungssuche. In diesem Versuch sollten zwei Fragen geklärt werden: 1. Sind die L1 Larven in der Lage selektiv nach der Nahrung zu suchen oder sind sie auf die Wahl der „Mutter“ angewiesen? 2. Welche Sinne spielen eine entscheidende Rolle bei der Wahl der Futterpflanze? Sind es überwiegend olfaktorische oder gustatorische Sinne? Im Vorversuch wurde beobachtet, dass die Raupen in den Petrischalen nach etwa einer Stunde das „richtige“ (essbare) Blatt finden. Aufgrund der Vermutung, dass dabei der olfaktorische Sinn im Spiel war, wurden zehn Duftstoffe (Tabelle 3.6), unter anderem auch die Grünblattdüfte, einzeln getestet. Dieses Experiment zeigte, dass die Raupen sich überhaupt nicht nach diesen Düften orientieren. Die Verteilung der Raupen in der Arena war zufällig und man konnte kein selektives Verhalten beobachten. Einmal waren beim Benzaldehyd zwar acht von zehn Raupen beim Duftstoff jedoch hat sich diese Tendenz beim wiederholten Versuch nicht bestätigt. Die Raupen wanderten über die ganze Arena.

Tabelle 3.6. Larvenverhaltensversuch, Ergebnisse nach bestimmter Zeiteinheit.

| Stoff | Konz. (g/g) | Auf | n | Stoff feld | Kontrol lfeld 1 | Kontrol lfeld 2 | Kontrol lfeld 3 | Zeit |
|---------------------------|------------------|--------------|----|------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| (Z)-3-Hexen-1-ol | 10 ⁻⁴ | Filterpapier | 10 | 0 | 8 | 0 | 3 | 20 Min |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | 10 ⁻⁴ | Filterpapier | 10 | 1 | 0 | 2 | 7 | 45 Min |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | 10 ⁻³ | Filterpapier | 10 | 0 | 9 | 0 | 1 | 20 Min |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-butytrat | 10 ⁻⁴ | Filterpapier | 10 | 2 | 1 | 5 | 2 | 60 Min |
| 2-Ethyl-hexan-1-ol | 10 ⁻⁷ | Filterpapier | 10 | 3 | 5 | 0 | 2 | 45 Min |
| 2-Methyl-5-hepten-6-on | 10 ⁻⁴ | Filterpapier | 10 | 1 | 3 | 5 | 1 | 60 Min |
| Benzaldehyd | 10 ⁻⁴ | Filterpapier | 10 | 8 | 2 | 0 | 0 | 45 Min |
| Benzaldehyd | 10 ⁻⁴ | Filterpapier | 10 | 1 | 3 | 2 | 4 | 60 Min |
| Benzaldehyd | 10 ⁻⁴ | Blatt | 10 | 1 | 4 | 4 | 1 | 60 Min |
| Decanal | 10 ⁻⁴ | Filterpapier | 8 | 5 | 3 | 0 | 0 | 45 Min |
| Linalool | 10 ⁻³ | Filterpapier | 8 | 2 | 1 | 4 | 1 | 45 Min |

| | | | | | | | | |
|-----------------|-----------|--------------|----|---|---|---|---|--------|
| Linalool | 10^{-7} | Filterpapier | 10 | 0 | 5 | 5 | 0 | 45 Min |
| Methylsalicylat | 10^{-7} | Filterpapier | 10 | 2 | 1 | 2 | 5 | 45 Min |
| Methylsalicylat | 10^{-4} | Filterpapier | 10 | 2 | 3 | 3 | 2 | 20 Min |
| Nonanal | 10^{-4} | Filterpapier | 10 | 0 | 1 | 0 | 9 | 20 Min |
| Nonanal | 10^{-7} | Filterpapier | 10 | 1 | 6 | 3 | 0 | 45 Min |

Im weiteren Versuch wurden die Raupen in der Petrischale mit zwei Blättern (Wirt und Nichtwirt) stets beobachtet. Nachdem die ersten neun Raupen in die Mitte gesetzt wurden, sind sie in alle Richtungen gekrabbelt. Man konnte beobachten, dass sie die Richtung oft gewechselt haben, obwohl sie gerade kurz vorm „Ziel“ waren. Alle 1-2cm haben sie den Kopf angehoben und ihn nach rechts und links bewegt. Danach sind sie oft in eine andere Richtung als bisher gekrabbelt. Sobald sie auf dem Salweidenblatt angekommen waren, sind sie dort länger geblieben. Die Anzahl der Raupen auf *Salix* war immer größer und neben dem Blatt befanden sich keine Raupen. Die Anzahl der Larven auf *Cornus* sp. stieg auch mit der Zeit aber hier waren neben dem Blatt die ganze Zeit viele Raupen. Es passierte hier ein ständiger Austausch, die Raupen liefen vom Blatt weg und die neuen Raupen kamen darauf (Abbildung 3.14). Nach etwa 30Min konnte man Fraßspuren an der Salweide sehen aber am Weißdorn waren keine Fraßspuren zu sehen. Die Raupen auf der Salweide saßen ruhig, die auf Weißdorn waren die ganze Zeit auf der Suche. Diese Beobachtungen weisen auf eine Beteiligung des gustatorischen Sinns hin. Die Raupen scheinen durch Zufall entweder das „richtige“ oder das „falsche“ Blatt zu finden. Erst nach dem Kontakt (tasten oder schmecken) wird eine Entscheidung getroffen: Bleibe ich hier oder suche ich weiter? Die Raupen an der Salweide bleiben, die am Weißdorn suchen weiter. Die Raupen waren zu klein, um die makroskopische Beobachtung zu machen, ob das Blattgewebe angebissen oder nur berührt wurde.

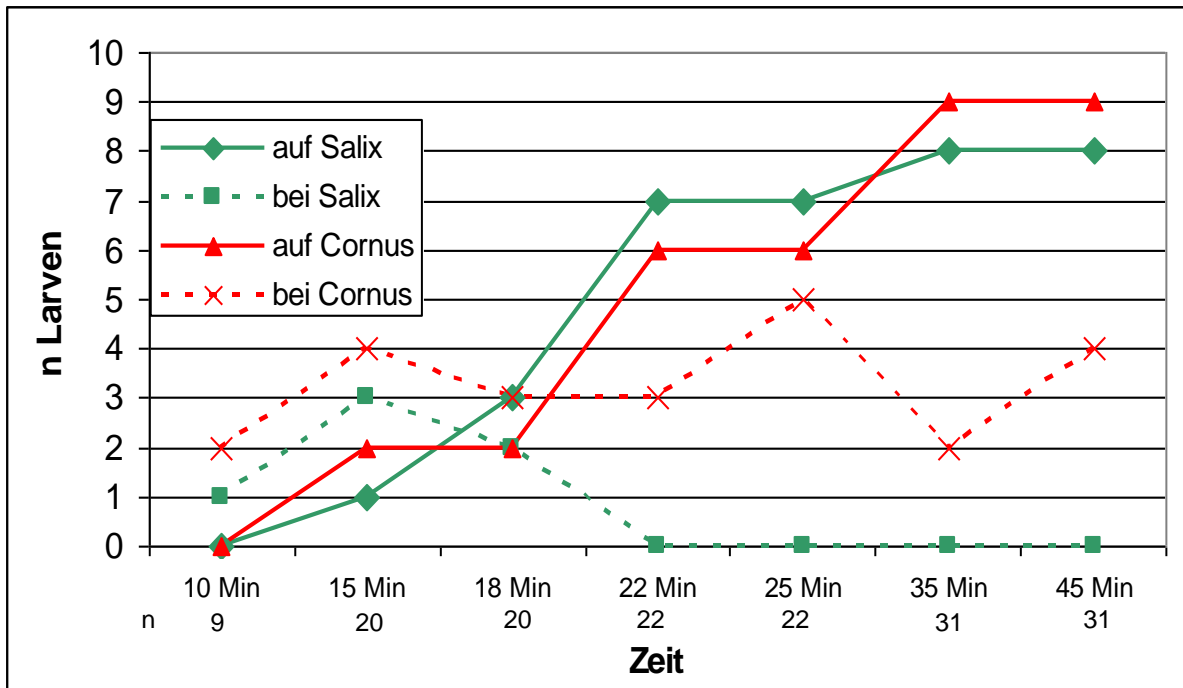


Abbildung 3.14. Verhaltensversuch mit L1 Larven.

3.5 Larvalentwicklung

3.5.1 Laborfütterungsversuch

Von den 20 untersuchten Raupen haben sich im Jahr 2007 nur drei erfolgreich verpuppt, davon nur eine, die mit Zitterpappelblättern gefüttert wurde und zwei, die sich von Salweide ernährt haben. Auch im Jahr 2006 war die Mortalität sehr hoch. Nur die Raupen, die Salweide als Futterpflanze bekamen, haben überlebt. Die Mortalität an Zitterpappel war unter beschriebenen Laborbedingungen extrem hoch. Die meisten Larven sind zwei Wochen nach dem Versuchsanfang gestorben (sechs Raupen an Zitterpappel und zwei Raupen an Salweide). Die wöchentliche Gewichtszunahme der Raupen zeigt Abbildung 3.15.

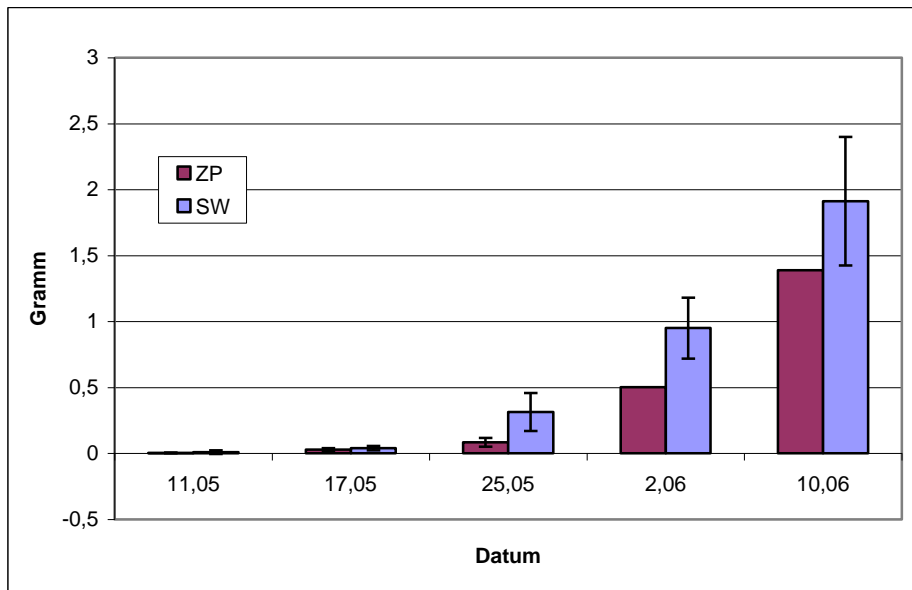


Abbildung 3.15. Raupengewichte im Laborfütterungsversuch 2007, ZP- Zitterpappel, SW- Salweide; MW±SA.

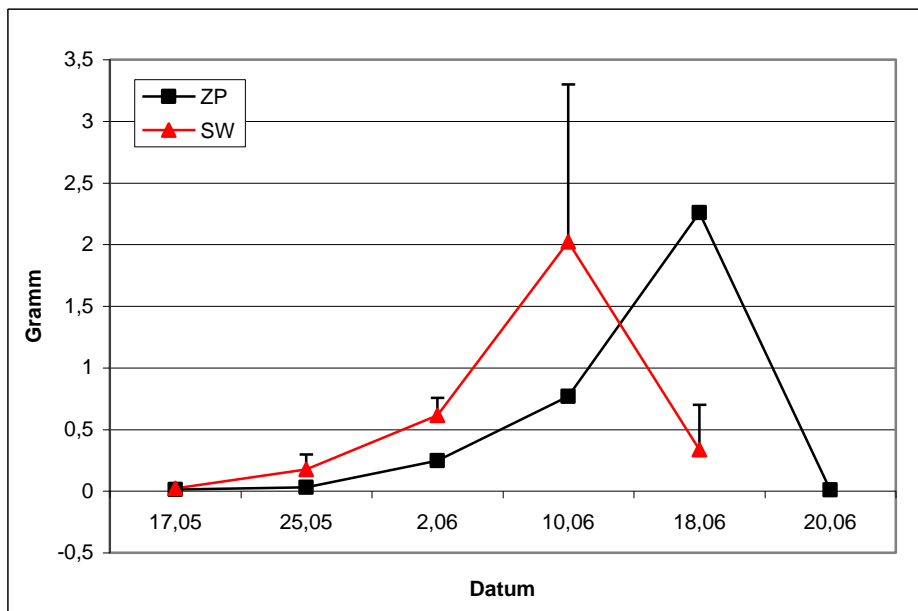


Abbildung 3.16. Trockengewicht der Kotmenge bei allen untersuchten Raupen. Wegen der geringen N-Zahl an Zitterpappel (N=1) konnten keine statistischen Tests angewendet werden. ZP- Zitterpappel, SW- Salweide; MW±SA.

Die Raupen haben während der gesamten Larvalentwicklung 9-12g Blätter gefressen. Eine statistische Betrachtung der Daten war wegen der hohen Mortalität und daraus folgenden geringen N-Zahl nicht aussagekräftig.

Man konnte keine signifikanten Unterschiede in der Verdaulichkeit der Nahrung feststellen (A.D.) (Abbildung 3.18). Der Zusammenhang von Körpermasse und gefressener Blattmasse war auch für beide Baumarten gleich (Abbildung 3.17). Jedoch sieht man am E.C.I. Index ein günstigeres Verhältnis an der Salweide. Für die A.D. und E.C.I. Rechnung wurden alle 20

Raupen, unabhängig von deren Lebensdauer, betrachtet. Vor allem bei den Raupen, die sehr kurz lebten oder zum Schluss krank wirkten, wurde ein negativer Verdauungsindex (A.D.) notiert (Tabelle 3.7).

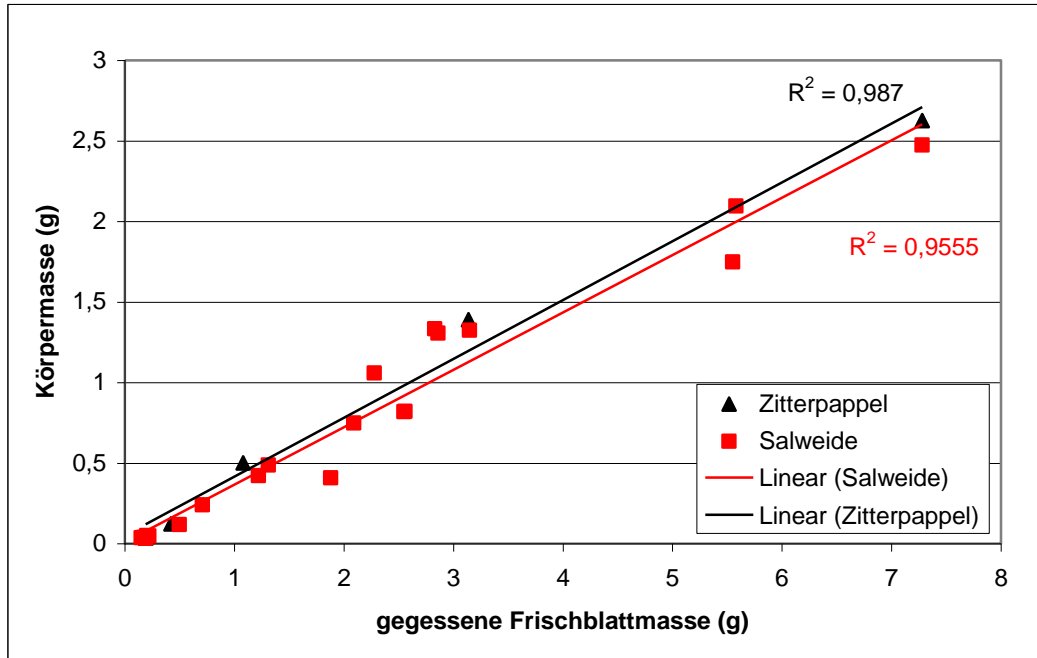


Abbildung 3.17. Die Korrelation zwischen innerhalb einer Woche gefressener frischer Blattmasse und dem Körpergewicht für beide Baumarten. Salweide= rot, Zitterpappel= schwarz.

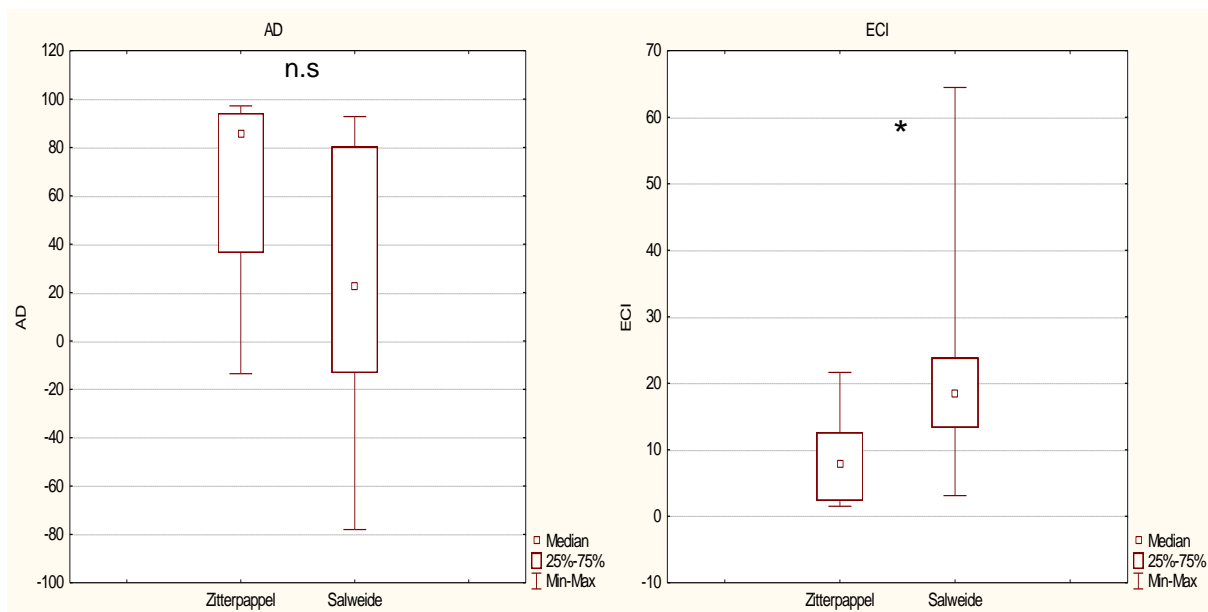


Abbildung 3.18. Futterverwertungsindizes für alle Larvalstadien des Abendpfauenauges, für: links A.D.-Verdauungsindex; rechts E.C.I. - Effizienz der Futterumsetzung (N=10: U-Test).

Tabelle 3.7. Futtermwertungsindices für Abendpfauenaugenraupen

| | Futterpflanze | A.D. (basiert auf Trockenmassen) MW±SA | E.C.I. (basiert auf Frishmassen) MW±SA |
|---------------------------------|------------------------|--|--|
| <i>Smerinthus ocellatus</i> n=8 | <i>Populus tremula</i> | 65±40 | 8±6 |
| <i>Smerinthus ocellatus</i> n=6 | <i>Salix caprea</i> | 19± 61 | 21±16 |

3.5.2 Ausbindeversuch

Insgesamt haben sich von 155 ausgebundenen Larven 33 erfolgreich verpuppt. Die durchschnittliche Überlebensrate betrug etwa 20%. In den beiden Versuchsjahren herrschten sehr unterschiedliche Wetterbedingungen, deswegen sieht man deutliche Unterschiede in der Entwicklungsdauer und den Überlebensraten. Im Jahr 2006 lagen die Überlebensraten zwischen 10% und 55% dagegen betrugen sie im Jahr 2007 nur gegen 15%. Der Standort hatte einen signifikanten Einfluss auf die Überlebensraten (χ^2 Test, $\alpha=0,1\%$, ***). Die besten Überlebenschancen hatten die Raupen an Salweiden und zwar in der sonnigen Exposition. Die Netze in der Innenkrone boten die besten Bedingungen. Diese Unterschiede zwischen Innen- und Außenposition haben sich besonders stark am Standort Zitterpappel Schatten bemerkbar gemacht (χ^2 Test, $\alpha=1\%$, **). An anderen Standorten konnte man keine signifikanten Unterschiede zwischen Innen- und Außen- Exposition feststellen. Am Standort Zitterpappel Sonne haben nur zwei Raupen in der Außenposition überlebt. Für die vollständige Entwicklung brauchen die Raupen etwa 50-60 Tage (je nach Temperatur). Im Jahr 2007 wurden sie schon am 12. Mai ausgebunden und im Jahr 2006 erst zwischen 3. und 12. Juni. Erstaunlicherweise dauerte die Entwicklung im Jahr 2006 etwas länger als im Jahr 2007, obwohl es in diesem Jahr deutlich wärmer war (Abbildung 3.26). Auch der Vergleich von Temperaturtagen im Jahr 2006 und 2007 zeigt, dass im Jahr 2006 die Werte deutlich höher als im Jahr 2007 sind (Abbildung 3.24). Dies hängt mit der längeren Entwicklungszeit und mit den höheren Temperaturen zusammen. Die Entwicklungsdauer beim Abendpfauenaug scheint nicht nur temperaturabhängig zu sein. Allein die Tatsache, dass die Raupen früher ausgebunden wurden, hat deren Entwicklung beschleunigt. Möglicherweise waren die Mai-Blätter für die kleinen Raupen nahrhafter als die Juni-Blätter. Leider führte im Jahr 2007 das frühe Ausbinden zu hohen Verlusten wegen niedriger Temperaturen. Am zehnten Tag nach dem Ausbinden sank die Lufttemperatur nachts bis auf 3°C (Abbildung 3.25). In beiden Versuchsjahren ist zu erkennen, dass die Entwicklung an der Salweide schneller als an der Zitterpappel war (Abbildung 3.23). Die statistische Analyse der

Temperaturtage in beiden Versuchsjahren zeigte jedoch keinen signifikanten Einfluss des Standortes (ANOVA $p > 0,05$). Auf Grund der hohen Mortalität wurden auch die Daten für die gestorbenen Larven ausgewertet. Es wurde deren Lebensdauer ermittelt. Man sieht in der Abbildung 3.22, dass die Raupen im Jahr 2007 kürzer als im Jahr 2006 lebten. Man hat festgestellt, dass die meisten Raupen in den frühen Larvalstadien (in den ersten 14 Tagen) gestorben sind. Manchmal konnte man Ameisen oder Ohrenkneifer in den durchgebissenen Netzen finden. In solchen Fällen wurde ein Räuberangriff angenommen. Aber oft war die Raupe einfach verschwunden und man konnte keine eindeutige Todesursache feststellen. Die Lebensdauer der Raupen war in beiden Versuchsjahren unabhängig vom Standort. Ein weiteres quantitatives Merkmal stellen Puppengewichte (Abbildung 3.21) dar. Hier war in den beiden Versuchsjahren eine konstante Tendenz zu erkennen. Die Puppen von Salweide Standorten waren signifikant schwerer und zwar um etwa 25% (2007-27%; 2006-24%) im Vergleich zu Zitterpappel Standorten. Zwischen den Expositionen Sonne und Schatten wurden keine Unterschiede festgestellt.

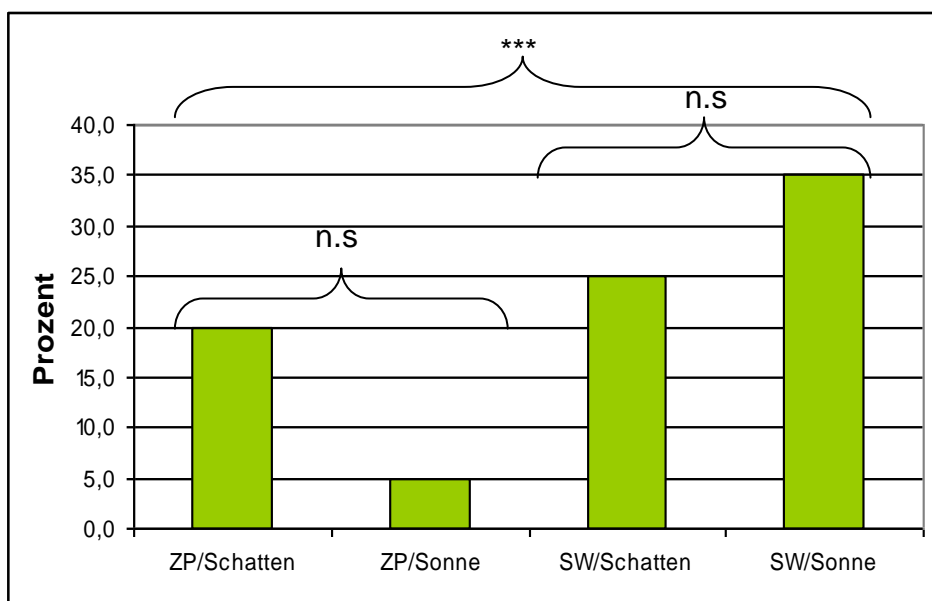


Abbildung 3.19. Ausbindeversuch 2006-2007, Prozentsatz der verpuppten Larven an unterschiedlich exponierten Bäumen. Signifikanter Einfluss des Standortes (χ^2 Test).

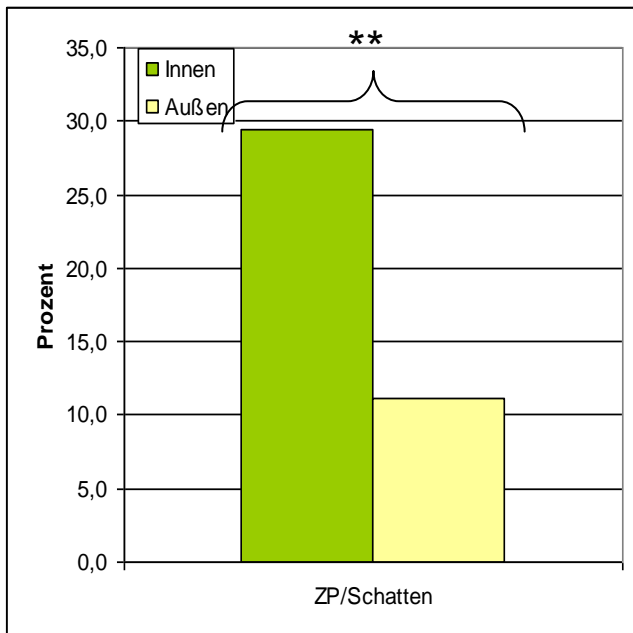


Abbildung 3.20. Einfluss der Position innerhalb der Krone auf die Überlebensrate (bzw. Verpuppungsrate) der Raupen.

Tabelle 3.8. Ausbindeversuch mit Abendpfauenaugen

| | Ausgebundene Laven | | | Anzahl der verpuppten Larven | | | Prozentsatz der verpuppten Larven | | |
|-------------------------|--------------------|-----------|-----------|------------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|----------------|----------------|
| | Stück | Innen | Außen | Stück | Innen | Außen | Gesamt % | % Innen | % Außen |
| ZP/Schatten | 35 | 17 | 18 | 7 | 5 | 2 | 20.0 | 29.4 | 11.0 |
| ZP/Sonne | 40 | 20 | 20 | 2 | 0 | 2 | 5.0 | 0 | 10.0 |
| SW/Schatten | 40 | 20 | 20 | 10 | 4 | 6 | 25.0 | 20.0 | 30.0 |
| SW/Sonne | 40 | 20 | 20 | 14 | 8 | 6 | 35.0 | 40.0 | 30.0 |
| Summe/Mittelwert | 155 | 77 | 78 | 33 | 17 | 29 | MW=21.3 | MW=22.1 | MW=20.5 |

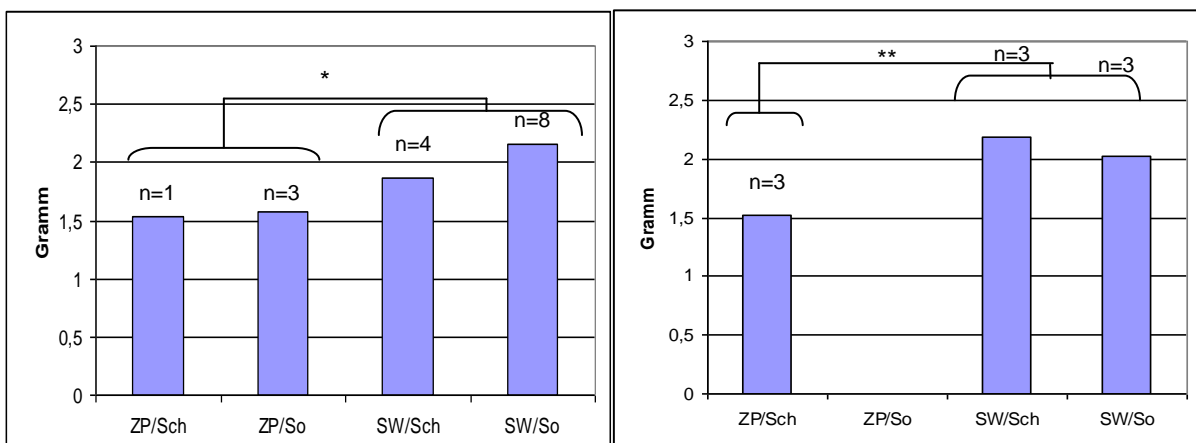


Abbildung 3.21. Puppengewichte in beiden Versuchsjahren zwei Wochen nach der Verpuppung. Links 2006, rechts 2007. U-Test.

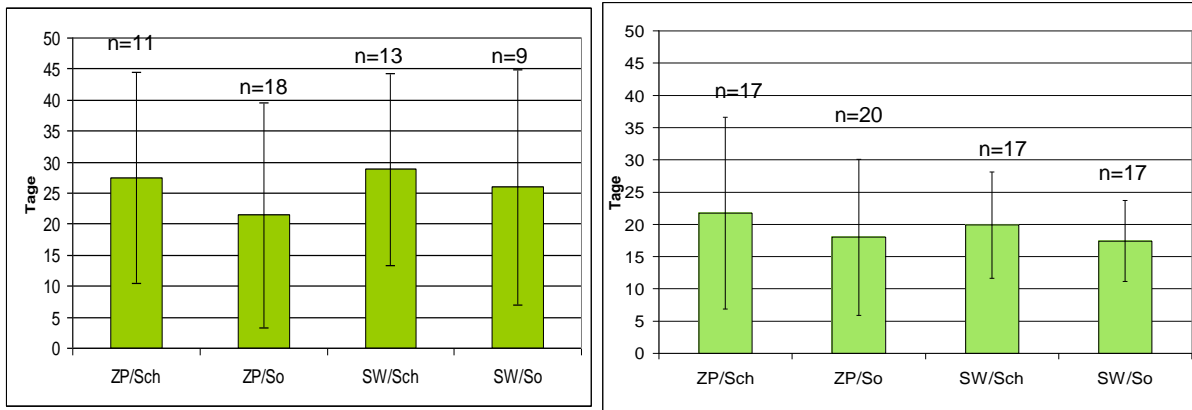


Abbildung 3.22. Lebensdauer für die Raupen die nicht überlebt haben (in Tagen). MW ± SA. Links 2006, rechts 2007. Es wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

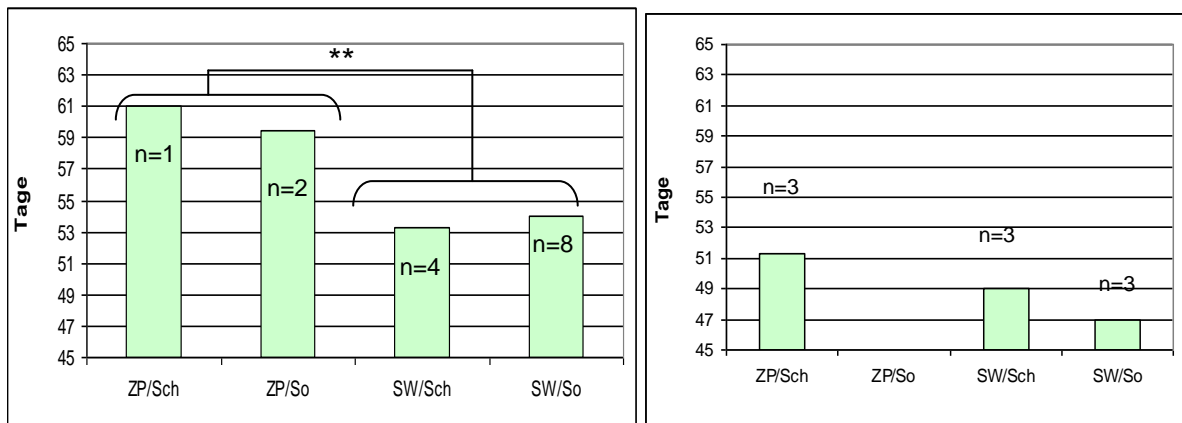


Abbildung 3.23. Entwicklungsdauer von verpuppten Larven (in Tagen). Links 2006, rechts 2007.

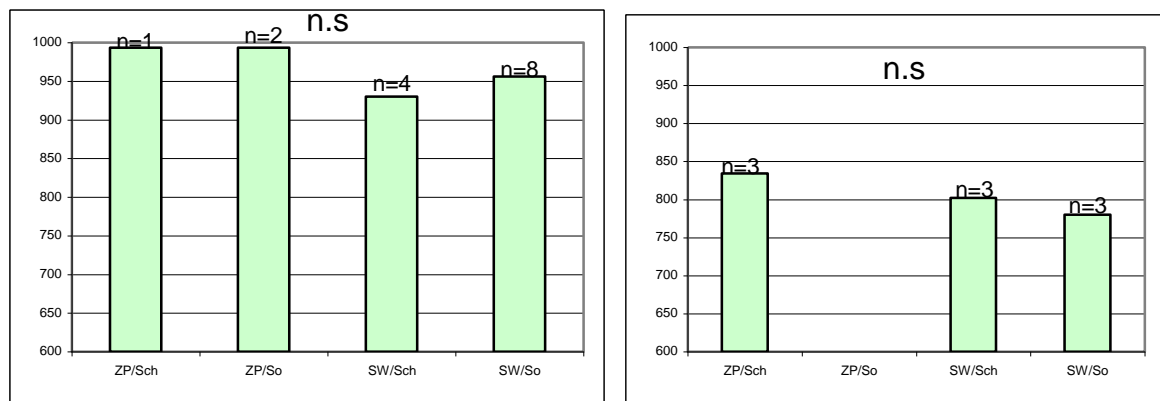


Abbildung 3.24. Temperaturtage für die Raupenentwicklung in beiden Versuchsjahren. Links 2006, rechts 2007. In beiden Jahren zeigten sich keine signifikanten Unterschiede, ANOVA $p > 0,05$.

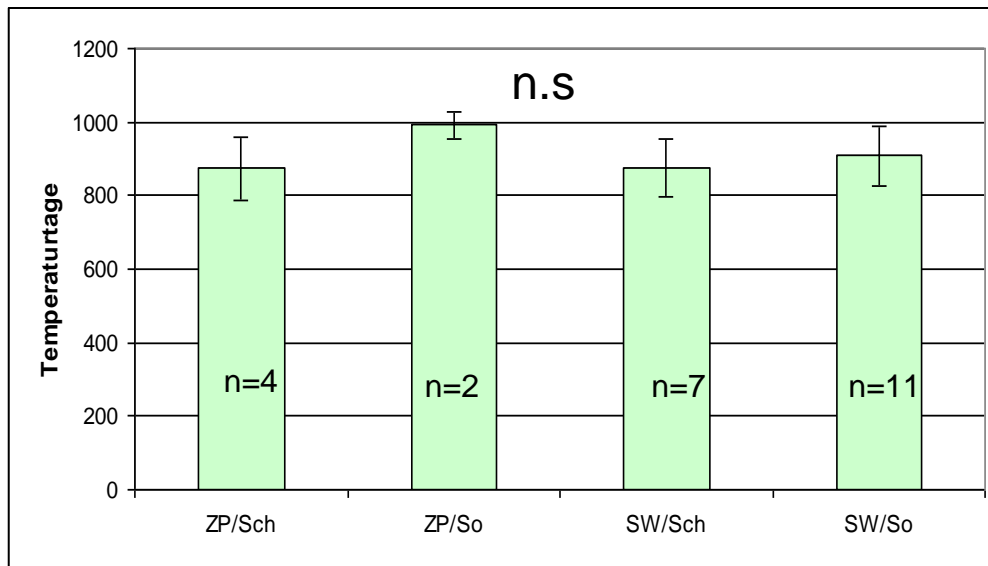


Abbildung 3.25. Temperaturtage bis zur Verpuppung für die Raupenentwicklung an verschiedenen Standorten, MW±SA. ANOVA $F_{(3,20)}=1,324$; $p=0,294$.

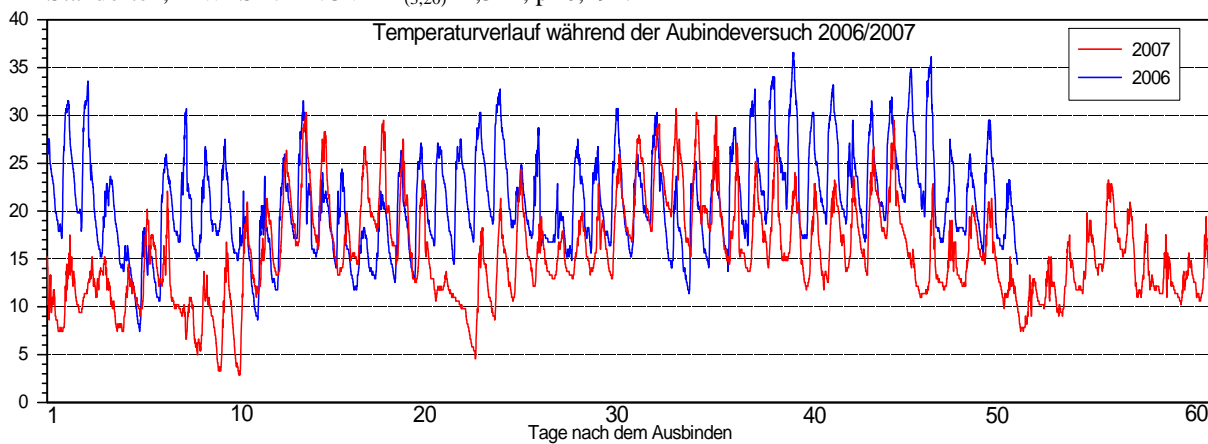


Abbildung 3.26. Temperaturverlauf während der Ausbindeversuche 2006 (03.06-30.07) und 2007 (08.05-07.07). Messabstand 10 Minuten.

4 Diskussion

4.1 REM Aufnahmen

Die Antennen sind beim Abendpfauenaug fadenförmig, im Querschnitt rund und besitzen lange, makroskopisch sichtbare Sensillen. Bei den Männchen sind die Sensillen deutlich länger als bei den Weibchen. Deswegen wirken die Antennen kräftiger. Die Sensillen befinden sich vor allem auf der Unterseite und an den Seiten der Antenne. Die Oberseite ist stark beschuppt. Beim Abendpfauenaug konnte man aufgrund von morphologischen Unterschieden vier Sensillentypen identifizieren (Tabelle 3.1). Diese vier Morphotypen konnten drei folgenden Sensillentypen zugeordnet werden: *Sensilla chaetica*, *S. trichodea* und *S. basiconica*.

S. chaetica sind starre Borsten, bis zu 150µm lang und eingelenkt in einer elastischen Membran. Es sind zwar typische Mechanorezeptoren, aber selbst hier wurde eine Aktivität bei olfaktorischen Stimuli nachgewiesen (Städler und Hansson, 1975).

S. trichodea sind lange (30-600µm) scharf zugespitzte Haare. Normalerweise sind im Inneren ein bis drei Neuronen (Keil, 1999). Im Jahr 1964 zeigten TEM-Schnittaufnahmen Dendriten im Haar und weiterhin wurde eine olfaktorische elektrophysiologische Aktivität der *S. trichodea* nachgewiesen (Schneider et al., 1964).

S. basiconica sind kurze (10-80µm) Haare mit abgerundeter Spitze. Sie sind unflexibel und haben dünne Wände mit zahlreichen Poren. Sie haben vor allem eine olfaktorische Funktion. Im Inneren sind Dendriten von ein bis zu 50 Nervenzellen. Manchmal ist die Abgrenzung zwischen *S. trichodea* und *S. basiconica* sehr unscharf (Keil, 1999).

Im terminalen Teil der weiblichen Antenne sieht man sehr deutlich eine symmetrische Verteilung der Sensillen (Abbildung 3.3). Die langen *S. chaetica* „a“ sind auf jedem Antennensegment mittig und seitlich platziert. Die seitlichen Sensillen sind zwischen den Schuppen verankert, aber man konnte die bewegliche Einlenkung beobachten (Abbildung 3.2). Das *Sensillum chaeticum* ist auch bei anderen Schmetterlingen wie *Agathiphage vitiensis* ähnlich symmetrisch ausgerichtet (Faucheux, 1990). Weitere Sinneshaare „b“ sind V-förmig auf der Unterseite eingeordnet (bei der Seitenansicht). Diese Sensillen wurden, wegen optischen Ähnlichkeiten, *S. trichodeum* genannt (Steinbrecht, 1970). Die Sensillen „b“ sind bei den männlichen Tieren bis 400µm und bei Weibchen etwa 60µm lang. Bei *Bombyx mori* (Steinbrecht, 1970) waren die langen *S. trichodea* bis 100µm lang und es wurden auch halblange *S. trichodea* bis (50µm lang) beschrieben. Zwischen den Sensillen „b“ befinden sich etwas kürzere und zartere Sensillen „c“. Sie haben eine geringelte Oberflächenstruktur, laufen spitz zu und wirken beweglich und flexibel. Hier war eine große Ähnlichkeit mit den *S. basiconica* von der Kaktusmotte *Cactoblastis cactorum* (Pophof et al., 2005) auffällig. Vor allem das spitz zulaufende Ende und die leichte Krümmung sprechen für *S. basiconicum*. Es könnte aber auch ein kurzes *S. trichodeum* sein. Der letzte Sensillentyp „d“ (Abbildung 3.2) sieht wie ein klassisches, kegelförmiges *S. basiconicum* aus (Hodgson, 1974). Dieser Sensillentyp hat meistens eine olfaktorische Funktion. Die Wände sind dünn und haben zahlreiche Poren durch die die Duftmoleküle in das Innere des Sensillum diffundieren. In dem Sensillum treffen sie auf duftstoffbindende Proteine (OBPs; odorant binding proteins), die entweder allgemeine Duftstoffe (GOBPs-general odorant binding proteins) oder

Pheromone (PBPs-pheromon binding proteins) binden. Die Duftstoffe bilden mit dem Protein OBP-Duftstoff-Komplexe und werden zu den Rezeptoren transportiert. Die Anwesenheit von GOBPs in *S. basiconicum* und PBPs in *S. trichodeum* wurde von Hansson, 1995 nachgewiesen. Beim Abendpfauenaug konnte man zwar die Poren nicht sehen aber die morphologischen Merkmale sprachen hier eindeutig für *S. basiconicum*.

Mit den gewonnenen Informationen konnte die Anzahl der unterschiedliche Antennentypen nicht geschätzt werden. Es wurden Unterschiede zwischen den Geschlechtern und Unregelmäßigkeiten innerhalb einer Antenne beobachtet. Um die Anzahl und die vollständige Verteilung der Sensillen auf den Antennen zu erfassen müsste man, bei einer repräsentativen Stichprobe der Falter, genaue und aufwendige Aufnahmen machen (wie bei Steinbrecht, 1970).

Unterschiedliche Sensillen haben verschiedene Funktionen. Aber auch die Sensillen, die eine olfaktorische Funktion erfüllen, sind oft selektiv und reagieren nur auf bestimmte Duftstoffe. Diese Selektivität lässt sich gut mit der Methode der Einzelsensillenableitung (SSR-Single Sensillum Recording) erfassen (Ma und Visser, 1978; Pophof et al., 2005). *S. basiconicum* reagierten z.B. auf Grünblattdüfte (Anderson et al., 2000; Anderson et al., 1995). *S. trichodea*, und *S. basiconica* reagierten auf Terpene. *Sensilla auricillica*, *S. basiconica* und *S. coeloconica* antworteten auf Aldehyde. Um das gesamte Spektrum des Riechvermögens der Insekten zu erfassen, müssen somit mehrere Sensillentypen separat elektrophysiologisch abgeleitet werden (Wibe, 2004). Mit der von uns angewendeten EAD-Methode, bei der die gesamte Antenne elektrophysiologisch vermessen wird, leitet man alle Signale auf einmal ab. Es kann zu einem relativ hohen Hintergrundrauschen führen aber beim Abendpfauenaug waren die Signale sehr gut erkennbar (Abbildung 3.10).

4.2 VOC Wahrnehmung

Die Insekten nutzen mehrere Sinne für die Eiablageplatzfindung. Die Insekten werden sowohl visuell als auch olfaktorisch von Pflanzen angezogen. Anschließend kommen gustatorische und mechanische Sinne ins Spiel. Die Blattoberfläche zeichnet sich durch mehreren Eigenschaften aus, die entscheidend für das Eiablageverhalten sind. Sowohl physikalische als auch chemische Eigenschaften spielen hier eine wichtige Rolle (Juniper und Southwood, 1986). Zu den chemischen Eigenschaften gehört unter anderem die Emission von Duftmolekülen. Verschiedene Stoffe bzw. Stoffgruppen beeinflussen das Ovipositionsverhalten der Insekten. Oft nutzen zwei verschiedene Insektenarten jedoch

unterschiedliche chemische Signale von derselben Wirtspflanze für die Überprüfung der Blattoberfläche (Städler, 1986). Die untersuchten Falter legen ihre Eier einzeln oder paarweise auf der Blattoberfläche ab. Sie sind in der Lage, 28 Duftstoffe aus dem Duftspektrum von zwei Wirtsbäumen (Salweide und Zitterpappel) wahrzunehmen. Möglicherweise riechen sie auch weitere Düfte von den Nichtwirtspflanzen, ähnlich wie auch andere Insekten (Barata et al., 2000). Das Abendpfauenauge reagierte elektrophysiologisch auf sieben getestete Stoffe ((Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Nonanal, 2-Ethylhexan-1-ol, Benzaldehyd, 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol und Benzylalkohol) sehr empfindlich und zeigte schon bei der geringsten Konzentration (10^{-7} (g/g)) hoch signifikante Reaktionen.

Drei Duftstoffe (Nonanal, Decanal, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat) wurden über zwei Vegetationsperioden getestet. Die Ergebnisse waren nicht identisch. Zum Teil lag dies sicherlich an der individuellen Variabilität der Tiere. In beiden Versuchsjahren war die N-Zahl der Tiere nicht sehr groß (2008 N=3; 2009 N=3 - 5), deswegen konnten sich die individuellen Unterschiede zwischen den Tieren auf das Gesamtergebnis auswirken. Nonanal wurde im Jahr 2008 nur ab der Konzentration 10^{-5} (g/g) getestet. Hier konnte man schon bei einer Konzentration von 10^{-5} (g/g) eine sehr hohe Signifikanz (**) sehen. Deswegen wurden im Folgejahr 2009 zwei weiteren Verdünnungsstufen (bis 10^{-7} g/g) getestet. Hier löste wieder die niedrigste Konzentration (10^{-7} g/g) ein signifikantes Signal aus. Möglicherweise würden die Falter auch noch geringere Konzentrationen wahrnehmen, dies wurde aber nicht gemessen. Für Decanal wurden im Jahr 2008 die Verdünnungsreihen ab 10^{-5} (g/g) getestet. Nach dem die Reaktionen schon bei der geringsten Konzentration signifikant waren, hat man im Jahr 2009 die Reihe um zwei weitere Stufen erweitert. Diesmal waren die Reaktionen, anders als im Jahr 2008, erst bei 10^{-3} (g/g) signifikant. Die beiden Stoffe Nonanal und Decanal sind so genannte Seneszenzmarker (Johne et al., 2006). Die Wahrnehmung von diesen Stoffen gibt dem Falter Informationen über den Verbräunungs- bzw. Vergilbungsgrad der Pflanze. Nonanal kann schon aus einer großen Entfernung gerochen werden. Decanal ist erst bei der Nahorientierung auf der Blattoberfläche von Bedeutung.

Der dritte Stoff, der auch in beiden Versuchsjahren getestet wurde, ist (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. In diesem Fall wurde schon im Jahr 2008 eine Verdünnungsreihe ab 10^{-7} (g/g) getestet und im Jahr 2009 wurde dies wiederholt. In beiden Versuchsjahren hat die Konzentration 10^{-7} (g/g) signifikante Signale ausgelöst nur, dass im 2008 die Signifikanz höher als im Jahr 2009 war. (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat gehört zu den Grünblattdüften. Dieser Stoff ist aber nicht nur in

den Blättern, sondern auch in den Blüten anwesend (Kaiser, 1991; Tollsten und Knudsen, 1992). Viele Insekten sind in der Lage diesen Stoff wahrzunehmen jedoch sind die ethologischen Reaktionen darauf sehr unterschiedlich. Die Emission von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wird vom Trockenstress und Salzstress der Bäume beeinflusst. Die gestressten Bäumen emittieren weniger von diesem Stoff als die ohne Stress (Paczkowska et al., 2006). Damit bietet der Stoff für den Falter eine weitere Möglichkeit die Fitness der Bäume abzuschätzen. Die Wahrnehmung von Nonanal, Decanal und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat gibt ihm dafür die nötigen Informationen. Nonanal und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat können aus weiter Entfernung gerochen werden. Nach der Landung können die Falter durch Wahrnehmung von Decanal kleine durch Nekrosen verbräunte Stellen auffinden.

Ein weiterer elektrophysiologisch aktiver Grünblattduft ist Hexylacetat. Männliche Falter haben deutlich häufiger auf diesen Stoff reagiert. Außer den beiden genannten Grünblattdüften kann auch Benzylalkohol aus weiterer Entfernung gerochen werden. Nur die Weibchen reagierten in den EAD Messungen auf diesen Stoff. Die weiblichen Abendpfauenaugen reagieren mit hoch signifikanten Ausschlägen schon bei der niedrigsten Konzentration (10^{-7} g/g). Benzylalkohol wurde bei befallenen Kastanien (Johne et al., 2008) aber auch in Abelian Blüten (*Abelia glandiflora*) (Haynes et al., 1991) und in Ligusterblüten (*Ligustrum japonicum*) (Honda et al., 1998) nachgewiesen. Dieser Stoff war in größeren Menge bei den Zitterpappeln vorhanden (Kapitel III). Die Wahrnehmung von Benzylalkohol ist eine Möglichkeit wie das Abendpfauenauge zwischen Salweide und Zitterpappel unterscheiden kann.

Die gestressten Pflanzen emittieren oft spezifische Duftstoffe die entweder als Kairomone die Insekten anlocken oder sogar der innenartigen Kommunikation zwischen den Pflanzen dienen oder Parasitoide der Herbivoren anlocken (Shulaev et al., 1997). Eine von diesen Substanzen ist Methylsalicylat. Dieser Stoff wird oft von den gestressten und infizierten Pflanzen gesendet (Johne et al., 2008; Shulaev et al., 1997). Er spielt eine Rolle bei der Aktivierung von Resistenzmechanismen in gesunden Pflanzen.

4.3 Verhaltensversuche

Im Verhaltensversuch waren für männliche Falter Nonanal, 2-Ethyl-hexan-1-ol und Benzylalkohol attraktiv. Die Weibchen wurden von Hexylacetat und Benzylalkohol angezogen. (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat wirkte auf die Weibchen in der getesteten Konzentration abschreckend. Ähnliches wurde auch bei *Heliothis virescens* beobachtet. Eine Mischung aus

fünf Nachtvolatilen der Tabakpflanze ((Z)-3-Hexen-1-yl-butyrat, (Z)-3-Hexen-1-yl-isobutyrat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und (Z)-3-Hexen-1-yl-tiglat) führte zur Reduzierung der Eiablage (De Moraes et al., 2001). Diese Präferenzen deuten darauf hin, dass die Abendpfauenaugen leicht gestresste Bäume ansteuern. Nonanal gilt als Seneszenzmarker und wirkt anziehend. Eine starke Emission von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, die nur bei gesunden Bäumen möglich ist (Paczkowska et al., 2006), wird gemieden. Beide Duftstoffe können aus weiter Entfernung gerochen werden und der Falter kann die leicht gestressten Bäume ansteuern. Die Tatsache, dass Methylsalicylat keine attraktive Wirkung zeigte, spricht dafür, dass sehr gestresste Bäume dagegen nicht mehr attraktiv sind. Diese würden möglicherweise den Nachkommen nicht genügend Nahrung anbieten und die Gefahr, dass Parasitoide dorthin angelockt werden würden, ist zu groß.

Ein weiterer Grünblattduft, der attraktiv für Weibchen war, ist Hexylacetat. Obwohl im EAD nur etwa 20% der Tiere diesen Stoff riechen konnten (die Männchen deutlich häufiger als die Weibchen), sind die Weibchen im Verhaltensversuch zum Stoff geflogen. Die männlichen Falter haben zwar öfters eine elektrophysiologische Reaktion auf diesen Stoff gezeigt sind aber nicht davon angelockt worden. Die Wirkung von Hexylacetat wurde an einer Fruchtfliege (*Rhagoletis pomonella*) getestet. Man hat festgestellt, dass diese Fliegen selbst an künstlichen Früchten mit Hexylacetat Stimulus ihre Eier ablegen (Fein et al., 1982). Hexylacetat wirkte auch attraktiv für *Delia brassicae* (Wallbank und Wheatley, 1979 in Visser, 1986).

Außer den beiden Grünblattdüften war auch Benzylalkohol attraktiv für die Falter. Es war der einzige Stoff der auf beide Geschlechter anziehend wirkte. Beim Verhaltensversuch wurde die Konzentration 10^{-3} (g/g) getestet und diese wirkte anziehend. Benzylalkohol wurde auch im Verhaltensversuch beim *Trichoplusia ni* (Lepidoptera, Noctuidae) getestet, zeigte aber keine signifikante Reaktion. Es wird aber vermutet, dass die Anwesenheit von Benzylalkohol und Benzylaldehyd die Selektivität der Reaktion erhöht (Haynes et al., 1991). Im Versuch am Tagfalter *Pieris rapae* erhöhte Benzylalkohol die Frequenz des Blütenbesuches, war also attraktiv (Honda et al., 1998).

Reine Duftstoffe kommen in der Natur selten vor. Meistens hat man es mit einem Duftstoffgemisch zu tun. Die Verhältnisse der einzelnen Komponenten sind für die Wirkung entscheidend. Die Experimente an den Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata*) zeigten, dass die Grünblattdüfte nur als ein Gemisch und nicht als einzelne Stoffe das Verhalten der

Insekten beeinflussen (Visser und Ave, 1978). Erst im Gemisch waren (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und (Z)-3-Hexen-1-ol attraktiv (Visser, 1983; Visser und Ave, 1978). Ein ähnlicher Effekt wurde bei Fruchtliegen beobachtet. Wenn man einzelne Komponenten des Apfelgeruchs testet, erreicht man bei keinem Duftstoff so große elektrophysiologische und ethologische (Eiablageverhalten) Reaktionen wie bei einem Gemisch bzw. Extrakt, obwohl alle Duftkomponente eine signifikante Reaktion gegenüber der Kontrolle zeigten (Fein et al., 1982). Aus diesem Grund wurden im Verhaltensversuch zur Nahbereichsorientierung die Duftstoffe auf das Blatt und im Verhaltensversuch zur Mittelbereichsorientierung auf die Bäume gelegt. Dadurch konnte ein Duftstoffgemisch mit einem erhöhten Anteil vom getesteten Stoff entstehen.

4.4 Larvalentwicklung

Die Insektenlarven sind kleine „Fressmaschinen“ und ganz besonders sind dies die Schmetterlingsraupen (Backhaus et al., 1995). Die Raupe muss genug Reserven aufbauen, damit der Falter, der selbst keine Nahrung aufnimmt, den Partner und den Eiablageplatz findet. Das Fliegen, Kopulieren und Eierproduzieren sind sehr energieaufwendige Prozesse, deswegen ist die Nahrungsqualität der Raupe ein entscheidender Faktor für den individuellen Entwicklungserfolg. Die kleinen Raupen schlüpfen aus den Eiern und sind ab diesem Zeitpunkt auf sich selbst angewiesen. Wie bei vielen anderen Insekten kümmern sich die Imagines nicht um ihre Nachkommen. Sie sorgen nur dafür, dass die kleinen Räumchen das Futter direkt vor der „Nase“ haben. Die Wahl der Futterpflanze ist sehr wichtig für die späteren Überlebenschancen. Sowohl die Freilandexperimente als auch die Laborversuche zeigten, dass an der Salweide die Aussichten für das Abendpfauenaug etwas besser sind. Hier notierte man niedrigere Sterberaten, kürzere Entwicklungszeiten und größere Puppengewichte. Zitterpappeln und Salweiden kommen häufig in ähnlichen Habitaten wie Waldrändern vor, jedoch sind sie miteinander vermischt sondern bilden kleine Gruppen. Im Freiland waren Salweiden aus sonniger Exposition die erfolgreichsten Entwicklungsplätze. Es wurde schon experimentell nachgewiesen, dass die Grünblattdüfte den Chrysomelidenlarven bei der Differenzierung zwischen Wirts- und Nichtwirtspflanze helfen (Müller und Hilker, 2000). Bei Lepidopterenlarven (*Protoparce sexta*) wurde die Anwesenheit von *Sensilla basiconica* auf den Antennen nachgewiesen und die olfaktorischen Signale wurden gemessen (Schoonhoven und Dethier, 1964). Die Experimente an Abendpfauenaugen zeigten aber, dass die Raupen sich gar nicht nach den getesteten Duftstoffen orientieren. Die Verteilung der Raupen in den Petrischalen mit dem Duftstoff war zufällig. Aber wenn man die Raupen in der

Petruschale mit zwei Blättern (Wirt und Nichtwirt) gelassen hat, konnte man sehen, dass die Raupen nach etwa 30 Minuten das „richtige“ Blatt gefunden haben. Um die Frage zu klären, welche Sinne dabei wichtig waren, wurde ein Experiment mit direkter Beobachtung durchgeführt. Diese Versuchsart ist eher ungewöhnlich aber sehr wichtig (Bernays und Chapman, 1994; Chapman und Bernays, 1989). Unsere Beobachtungen zeigten, dass die Raupen in alle Richtungen chaotisch gekrabbelt sind, so lange bis sie ein Blatt berührt haben. Ab diesem Moment konnten sie ihre Kontaktchemorezeptoren benutzen, um die Futterqualität zu überprüfen. Die Kontaktchemorezeptoren können sowohl an den Füßen als auch auf den Palpen oder auf den Mundwerkzeugen sein. Manchmal wird ein Testbiss gemacht (Chapman und Bernays, 1989). Leider konnte man bei den *Smerinthus* Raupen nicht sehen, ob die Raupe in das Blattgewebe beißt oder nicht.

Einige Autoren behaupten, dass gestresste Pflanzen attraktiver, schmackhafter und nahrhafter für die blattfressende Insekten sind. Es wurde eine Korrelation zwischen den Stressfaktoren und Insektengradationen festgestellt und auf der Basis entstand eine Hypothese, dass Pflanzenfresser schneller wachsen und eine geringere Mortalität zeigen, wenn sie sich von den gestressten Pflanzen ernähren (Mattson und Addy, 1975; Port und Thompson, 1980). Um diese Hypothese zu prüfen wurden drei Falterarten (*Smerinthus ocellatus*, *Mimas tiliae* und *Phalera bucephala*) an zwei Baumarten (*Betula pendula* und *Salix cinerea*) über drei Vegetationsperioden getestet (Thomas und Hodkinson, 1991). Die Autoren haben den Einfluss des Wasserstresses und des Stickstoffgehaltes auf den Entwicklungserfolg der Raupen gemessen. Es wurden in drei Vegetationsperioden beide Faktoren in Kombination miteinander getestet. Man hat komplizierte und nicht lineare Zusammenhänge, die nicht immer die gestellte Hypothese bestätigten, beobachtet. Es konnte aber nachgewiesen werden, dass der Wasserstress der Pflanze vor allem dort, wo der natürliche Stickstoffgehalt niedrig war, für Lepidopteren-Larven günstig war. Jedoch bedeutet die Verbesserung der Effizienz der Futterverwertung nicht unbedingt schnelles Wachstum oder größere Körpergewichte. Die Zusammenhänge waren sehr individuell und sowohl von Baumart als auch von Insektenart abhängig (Thomas und Hodkinson, 1991). Bei *Smerinthus ocellatus* wurde in zwei Vegetationsperioden beobachtet, dass die Raupen an Weiden mit Trockenstress mehr von der gefressene Blattmasse in eigene Körpermasse umwandeln konnten (E.C.I.) und die Pflanzenteile effektiver verdaut wurden (A.D.) (Thomas und Hodkinson, 1991). In eigenen Labor Versuchen wurde auch ein signifikanter Unterschied des E.C.I. Indexes an unterschiedlichen Baumarten festgestellt. Die Raupen die Salweide als Futter bekamen haben

einen höheren Anteil der Nahrung in die eigene Körpermasse eingebaut, wobei man bemerken muss, dass die Variabilität an beiden Baumarten sehr hoch war. Für diese Messung wurden alle Raupen mit einbezogen. Möglicherweise würde eine separate Betrachtung nur der erfolgreich verpuppten Larven andere Ergebnisse zeigen. Aber auf Grund der sehr geringen Anzahl der verpuppten Larven (N=3) wäre diese Aussage nicht statistisch abgesichert.

5 Zusammenfassung

Das Abendpfauenaug gehört zu den oligophagen Insekten und bevorzugt laut Literatur freistehende Weidenbüsche und Bäume an sonnigen, warmen, eher feuchten Stellen wie Fluss- und Teichufer (Ebert et al., 1994; Weidemann und Köhler, 1996). Seine Wirtsfindung basiert auf dem olfaktorischen Sinn. Dank der Wahrnehmung eines breiten Volatilspektrums hat das Abendpfauenaug die Möglichkeit, nicht nur seine Wirtspflanzen voneinander zu unterscheiden sondern auch deren Fitness zu erkennen. Sowohl überall vorhandene Grünblattdüfte (z.B. (Z)-3-Hexen-1-ol) als auch hoch spezifische Stressmarker (z.B. Methylsalicylat) werden von den Imagines wahrgenommen. Es wurden geschlechtsspezifische Unterschiede im Geruchssinn des Falters festgestellt. Nur weibliche Tiere haben im EAD-Versuch auf Methylpalmitat, Benzylalkohol, Decanal und 2-Ethylhexan-1-ol reagiert. Sieben von den EAD aktiven Stoffen ((Z)-3-Hexen-1-ol, Linalool, Benzylalkohol, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, Nonanal, 2-Ethylhexan-1-ol und Benzaldehyd) zeigten bei den weiblichen Faltern schon in der niedrigsten Konzentration 10^{-7} (g/g) eine signifikante Reaktion. Diese Stoffe können also der weiträumigen Orientierung dienen. Methylsalicylat wurde bei einer Konzentration von 10^{-6} (g/g) wahrgenommen. Octanal und Decanal wurden erst in der Konzentration von 10^{-5} (g/g) signifikant wahrgenommen, können somit also das Falterverhalten in der Nahbereichsorientierung (innerhalb eines Baumes) beeinflussen. Im Verhaltensversuch waren Hexylacetat und Benzylalkohol für die weiblichen Falter attraktiv. Bei den Männchen waren Nonanal, 2-Ethylhexan-1-ol und Benzylalkohol attraktiv. Die Präferenzen im Verhaltensversuch deuten darauf hin, dass die weiblichen Abendpfauenaugen vor allem fitte, gesunde Bäume bevorzugen. Die Stress- und Seneszenzmarker (Methylsalicylat und Nonanal) haben keine anziehende Wirkung für die Weibchen, für die Männchen allerdings schon. Beide Geschlechter reagierten mit Zuneigung auf Benzylalkohol. Dieser Duftstoff ermöglicht dem Falter die Unterscheidung zwischen Salweide und Zitterpappel, da Zitterpappeln signifikant mehr Benzylalkohol als die Salweiden emittieren. Im EAD-Versuch haben aber nur die Weibchen eine elektrophysiologische Reaktion auf Benzylalkohol gezeigt. Interessant ist die abstoßende

Wirkung des (Z)-3-Hexen-1-yl-acetates in Verdünnung von 10^{-3} in Paraffinöl (g/g). Stress führt zur Reduktion der Emission von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat (Paczkowska et al., 2006) und die Weibchen meiden stellen mit starkem (Z)-3-Hexen-1-yl-acetate Geruch. Möglicherweise kann man hier die bedeutende Rolle der Konzentration eines Duftstoffes für das Verhalten eines Insekten beobachten, weil das Abendpfauenauge sehr empfindlich auf (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat reagiert (ab 10^{-7} g/g) über den ganzen Konzentrationsbereich bis 10^{-1} g/g). Die Tatsache, dass der untersuchte Falter auf sieben Stoffe in der Konzentration 10^{-7} (g/g) reagiert, deutet auf einen hoch spezialisierten und empfindlichen Geruchsinn hin.

Sowohl die Laborversuche als auch die Freilandexperimente weisen darauf hin, dass die Salweide die günstigere Futterpflanze ist. Ihre Verwertung ist effizienter und es wird weniger Blattmasse benötigt, um die gleichen Körpermassen zu erreichen. Im Freiland konnte man einen hoch signifikanten Einfluss des Standortes auf die Überlebensrate beobachten. Der erfolgreichste Standort waren Salweiden in der Sonne. Im Freilandversuch waren die Puppen an Salweidenstandorten signifikant schwerer. Zwischen den Expositionen in der Innenkrone und der Außenkrone konnte man nur an Zitterpappeln im Schatten einen Unterschied feststellen. Hier überlebten mehr Raupen in der Innenkrone, also etwas weniger der Sonne ausgesetzte.

Im Laborversuch mit den L1-Larven konnte keine olfaktorische Orientierung der Raupen festgestellt werden. Die Raupen krabbelten in eine zufällig gewählte Richtung bis sie mit der Futterpflanze in Kontakt kamen. Ab diesem Moment werden gustatorische und mechanische Sinne als Entscheidungsgrundlage herangezogen. Es wird davon ausgegangen, dass L1-Larven nicht in der Lage sind, die von dem Falter gewählte „Wirtspflanze“ zu verlassen und anhand ihres olfaktorischen Sinns nach einer neuen Futterquelle zu suchen.

Literaturverzeichnis:

- Anderson, P., Hallberg, E., Subchev, M., 2000, Morphology of antennal sensilla auricillica and their detection of plant volatiles in the Herald moth, *Scoliopteryx libatrix* L. (Lepidoptera : Noctuidae). *Arthropod Structure & Development* 29, 33-41.
- Anderson, P., Hansson, B.S., Lofqvist, J., 1995, Plant-odor-specific receptor neurons on the antennae of female and male *Spodoptera littoralis*. *Physiological Entomology* 20, 189-198.
- Backhaus, W., Boeckh, J., Bückmann, D., Elsner, N., Fleissner, G.u.G., Gewecke, M., Hamdorf, K., Hoffmann, K.H., Huber, F., Kraus, O., Menzel, R., Roeder, T., 1995, *Physiologie der Insekten*. Gewecke, M., Stuttgart, Jena, New York.
- Barata, E.N., Pickett, J.A., Wadhams, L.J., Woodcock, C.M., Mustaparta, H., 2000, Identification of host and nonhost semiochemicals of eucalyptus woodborer *Phoracantha semipunctata* by gas chromatography-electroantennography. *Journal of Chemical Ecology* 26, 1877-1895.

- Bernays, E.A., Chapman, R.F., 1994, Host-plant selection by phytophagous insects. Chapman and Hall, New York.
- Bernays, E.A., Graham, M., 1988, On the evolution of host specificity in phytophagous arthropods. *Ecology* 69, 886-892.
- Boeckh, J., Kaisslin, K., Schneide, D., 1965, Insect olfactory receptors. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 30, 263-&.
- Boland, W., Ney, P., Jaenicke, L., Gassmann, G., 1984, A "closed-loop-stripping" technique as a versatile tool for metabolic studies of volatiles. Walter de Gruyter & Co, Berlin.
- Chapman, R.F., Bernays, E.A., 1989, Insect behavior at the leaf surface and learning as aspects of host plant-selection. *Experientia* 45, 215-222.
- Damm, M., 1999. Untersuchung von Insektenpopulationen über eine Vegetationsperiode an Zitterpappel (*Populus tremula* L.) in unterschiedlichen Waldmantelstrukturen bei Ebergötzen/Waake unter besonderer Beachtung der Lepidoptera. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Damm, M., 2003. Faunistische Erfassung phytophager Insekten an ausgewählten Waldaußen- und Waldinnenrändern des Sollings unter besonderer Berücksichtigung der Macrolepidoptera und von Waldrandstrukturen. Georg-August-Universität, Göttingen.
- De Moraes, C.M., Mescher, M.C., Tumlinson, J.H., 2001, Caterpillar-induced nocturnal plant volatiles repel conspecific females. *Nature* 410, 577-580.
- Ebert, G., Hirneisen, N., Krell, F.T., Mörtter, R., Ratzel, U., Siepe, A., Steiner, A., Traub, B., 1994, Die Schmetterlinge Baden-Württenbergs, Vol 4. Eugen Ulmer, Stuttgart, 535 p.
- Ernst, W.H.O., 1992, Nutritional aspects in the development of *Buchidius sahlbergi* (Coleoptera, Bruchidae) in seeds of *Acacia erioloba*. *Journal of Insect Physiology* 38, 831-838.
- Faucheux, M.J., 1990, Antennal sensilla in adult *Agathiphaga vitiensis* Duml and a *queenslandensis* Duml (Lepidoptera, Agathiphagidae). *International Journal of Insect Morphology & Embryology* 19, 257-268.
- Fein, B.L., Reissig, W.H., Roelofs, W.L., 1982, Identification of apple volatiles attractive to the apple maggot, *Rhagoletis pomonella* (Diptera, Tephritidae). *Journal of Chemical Ecology* 8, 1473-1487.
- Ferguson, A.W., Solinas, M., Ziesmann, J., Isidoro, N., Williams, I.H., Scubla, P., Mudd, A., Clark, S.J., Wadhams, L.J., 1999, Identification of the gland secreting oviposition-detering pheromone in the cabbage seed weevil, *Ceutorhynchus assimilis*, and the mechanism of pheromone deposition. *Journal of Insect Physiology* 45, 687-699.
- Hansson, B.S., 1995, Olfaction in Lepidoptera. *Experientia* 51, 1003-1027.
- Haynes, K.F., Zhao, J.Z., Latif, A., 1991, Identification of floral compounds from *Abelia grandiflora* that stimulate upwind flight in cabbage looper moths. *Journal of Chemical Ecology* 17, 637-646.
- Hemming, J.D.C., Lindroth, R.L., 1999, Effects of light and nutrient availability on aspen: Growth, phytochemistry, and insect performance. *Journal of Chemical Ecology* 25, 1687-1714.
- Henkel, W., 1975, Zur Problematik der Beseitigung "gefährdender" oder "schädigender" Mischbaumarten, besonders in Fichten- und Kiefernbeständen. *Die sozialistische Forstwirtschaft* 25, 152-153.
- Hodgson, E.S., 1974, Chemoreception, In: Rockstein, M. (Ed.) *The physiology of insecta*. Academic Press, New York and London.
- Honda, K., Omura, H., Hayashi, N., 1998, Identification of floral volatiles from *Ligustrum japonicum* that stimulate flower-visiting by Cabbage butterfly, *Pieris rapae*. *Journal of Chemical Ecology* 24, 2167-2180.

- Johne, A.B., Weissbecker, B., Schutz, S., 2006, Volatile emissions from *Aesculus hippocastanum* induced by mining of larval stages of *Cameraria ohridella* influence oviposition by conspecific females. *Journal of Chemical Ecology* 32, 2303-2319.
- Johne, A.B., Weissbecker, B., Schutz, S., 2008, Approaching risk assessment of complex disease development in horse chestnut trees: a chemical ecologist's perspective. *Journal of Applied Entomology* 132, 349-359.
- Juniper, B., Southwood, S.R., 1986, *Insects and the plant surface*. Edward Arnold, London.
- Kaiser, R., 1991, Trapping, investigation and reconstitution of flower scents, In: Müller, P.M., Lamparksy, D. (Ed.) *Perfums: art, science and technology*. Elsevier Applied Science, London, New York, pp. 213-250.
- Kaissling, K.E., Thorson, J., 1980, Insect olfactory sensilla: structural, chemical and electrical aspects of the functional organisation. Elsevier/North-Holland Biomedical Press Amsterdam (The Netherlands), p. 261-282. pp.
- Keil, T.A., 1999, Morphology and development of the peripheral olfactory organs., In: Hansson, B.S. (Ed.) *Insect olfaction*. Springer Verlag, Berlin.
- Lepidopterologen-Arbeitsgrupe, 1997, *Schmetterlinge und ihre Lebensräume, Arten, Gefährdung, Schutz, Schweiz und angrenzende Gebiete*. Band 2. Pro Natura-Schweizerischer Bund für Naturschutz (Hrsg.).
- Ma, W.C., Visser, J.H., 1978, Single unit analysis of odor quality coding by the olfactory antennal receptor system of the Colorado beetle. *Entomologia Experimentalis Et Applicata* 24, 520-533.
- Mattson, W., Addy, N., 1975, Phytophagous insects as regulators of forest primary production *Science* 190, 515- 521.
- Meineke, T., Brunken, G., Menge, K., 1993, *Landschaftsökologische Bestandsaufnahme Kerstlingeröderfeld*. Gutachten für die Stadt Göttingen.
- Moeser, J., Vidal, S., 2004, Response of larvae of invasive maize pest *Diabrotica virgifera virgifera* (Coleoptera : Chrysomelidae) to carbon/nitrogen ratio and phytosterol content of European maize varieties. *Journal of Economic Entomology* 97, 1335-1341.
- Müller, C., Hilker, M., 2000, The effect of a green leaf volatile on host plant finding by larvae of a herbivorous insect. *Naturwissenschaften* 87, 216-219.
- Paczkowska, M., Földner, K., Weissteiner, S., Beniwal, R.S., Polle, A., Schütz, S., 2006, Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand. *Mitt. Dtsch. Ges. Allg. Angew. Ent* 13, 213-217.
- Pophof, B., Stange, G., Abrell, L., 2005, Volatile organic compounds as signals in a plant-herbivore system: Electrophysiological responses in olfactory sensilla of the moth *Cactoblastis cactorum*. *Chemical Senses* 30, 51-68.
- Port, G.R., Thompson, J.R., 1980, Outbreaks of insect herbivores on plants along motorways in the United-Kingdom. *Journal of Applied Ecology* 17, 649-656.
- Rutzen, H., Földner, K., 2002, Die Lepidopterenfauna des ehemaligen Standortübungsplatzes "Kerstlingeröder Feld" im südlichen Niedersachsen. *Entomologische Zeitschrift* 112, 341-348.
- Sauer, A.E., Karg, G., Koch, U.T., Dekramer, J.J., Milli, R., 1992, A portable eug system for the measurement of pheromone concentrations in the field. *Chemical Senses* 17, 543-553.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2001, *Lehrbuch der Bodenkunde*, 15 Edition. Spectrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg-Berlin.
- Schipka, F., 2003. *Wasserumsatz in Mitteldeutschland*. Georg-August-Universität, Göttingen.
- Schneider, D., Lacher, V., Kaissling, K.E., 1964, Die Reaktionsweise und das Reaktionsspektrum von Riechzellen bei *Antheraea pernyi* (Lepidoptera, Saturniidae). *Zeitschrift Fur Vergleichende Physiologie* 48, 632-662.

- Schoonhoven, L.M., Dethier, V.G., 1964, Sensory aspects of host-plant discrimination by lepidopterous larvae. *Archiv. Neerl. Zool* 16, 497-530.
- Schretzenmayr, M., Haupt, R., Ulrich, T., 1974, Zusammenhänge zwischen der Struktur des Waldes und dem Auftreten von Sturmschäden in der montanen Stufe des Ostharzes und sich daraus ergebende Hinweise zur Pflege von Waldrändern. *Die sozialistische Forstwirtschaft* 24, 116-120.
- Schütz, J.P., Brang, P., 1995, L'horizontoscope : un étonnant outil pratique de sylviculture notamment en haute montagne. *ONF Bull. Tech.* 28, 1-9.
- Schütz, J.P., Brang, P., 2009, L'horizontoscope : un étonnant outil pratique de sylviculture notamment en haute montagne. *ONF Bull. Tech.* 28, 1-9.
- Shulaev, V., Silverman, P., Raskin, I., 1997, Airborne signalling by methyl salicylate in plant pathogen resistance. *Nature* 385, 718-721.
- Städler, E., 1986, Oviposition and feeding stimuli in leaf surface waxes, In: Juniper, B., Southwood, S.R. (Eds.) *Insects and the Plant Surface*. Edward Arnold, London.
- Städler, E., Hansson, B.S., 1975, Olfactory capabilities of the gustatory chemoreceptors of the tobacco hornworm larvae. *J comp Physiol* 104, 97-102.
- Steinbrecht, R.A., 1970, Morphometric studies on antenna of Silk moth, *Bombyx mori* L.- Number and distribution of olfactory sensilla. *Zeitschrift Fur Morphologie Der Tiere* 68, 93-126.
- Sukontason, K., Methanitikorn, R., Chaiwong, T., Kurahashi, H., Vogtsberger, R.C., Sukontason, K.L., 2007, Sensilla of the antenna and palp of *Hydrotaea chalcogaster* (Diptera : Muscidae). *Micron* 38, 218-223.
- Thomas, A.T., Hodkinson, I.D., 1991, Nitrogen water-stress and the feeding efficiency of lepidopteran herbivores. *Journal of Applied Ecology* 28, 703-720.
- Tollsten, L., Knudsen, J.T., 1992, Floral scent in dioecious *Salix* (Salicaceae) - a cue determining the pollination system. *Plant Systematics and Evolution* 182, 229-237.
- Vallin, A., Jakobsson, S., Wiklund, C., 2007, "An eye for an eye? - on the generality of the intimidating quality of eyespots in a butterfly and a hawkmoth. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 61, 1419-1424.
- Visser, J.H., 1983, Differential sensory perceptions of plant-compounds by insects. *ACS Symposium Series* 208, 215-230.
- Visser, J.H., 1986, Host odor perception in phytophagous insects. *Annual Review of Entomology* 31, 121-144.
- Visser, J.H., Ave, D.A., 1978, General green leaf volatiles in the olfactory orientation of the Colorado beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Entomologia Experimentalis Et Applicata* 24, 738-749.
- Visser, J.H., Thiery, D., 1986, Effects of Feeding Experience on the Odor-Conditioned Anemotaxes of Colorado Potato Beetles. *Entomologia Experimentalis Et Applicata* 42, 198-200.
- Waldbauer, G.P., 1968, The consumption and utilization of food by insects. *Adv. Insect Physiol.* 5, 229-288.
- Wallbank, B.E., Wheatley, G.A., 1979, Some response of Cabbage root fly (*Delia brassicae*) to allyl isothiocyanate and other volatile constituents of crucifers. *Annals of Applied Biology* 91, 1-12.
- Weidemann, H.J., Köhler, J., 1996, *Nachtfalter, Spinner und Schwärmer*. Naturbuch Verlag, Augsburg.
- Weissbecker, B., Holighaus, G., Schutz, S., 2004, Gas chromatography with mass spectrometric and electroantennographic detection: analysis of wood odorants by direct coupling of insect olfaction and mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 1056, 209-216.

Wibe, A., 2004, How the choice of method influence on the results in electrophysiological studies of insect olfaction. *Journal of Insect Physiology* 50, 497-503.

Kapitel VII: Zusammenfassende Diskussion

| | | |
|---------|--|-----|
| 1 | Die Variabilität der Duftemission der Bäume | 219 |
| 1.1 | Artspezifische Duftmuster..... | 219 |
| 1.2 | Saisonunterschiede | 221 |
| 1.3 | Tageszeitunterschiede | 221 |
| 1.4 | Einfluss der Umweltfaktoren: Stress, Exposition, Kondition | 222 |
| 1.5 | Auswahl der Methoden für die Duftanalyse | 223 |
| 2 | Lebensraum der Falter | 224 |
| 2.1 | Waldrand als Habitat | 224 |
| 2.2 | Abendpfauenaug (<i>Smerinthus ocellatus</i> L.) und Gabelschwanz (<i>Cerura vinula</i> L.) | 225 |
| 3 | Chemoökologische Interaktionen zwischen den Pflanzen und herbivoren Insekten .. | 226 |
| 3.1 | Pflanzenabwehrmechanismen | 226 |
| 3.2 | Anpassung der Insekten an die Pflanzenabwehrmechanismen | 228 |
| 3.3 | Sinneswahrnehmung der Insekten..... | 229 |
| 3.3.1 | Optischer Sinn | 229 |
| 3.3.2 | Chemische Sinne | 229 |
| 3.3.2.1 | Geschmackssinn | 230 |
| 3.3.2.2 | Geruchssinn | 231 |
| 3.4 | Verhalten | 232 |
| 3.4.1 | Kritischer Blick auf die methodischen Ansätze | 232 |
| 3.4.2 | Larven..... | 234 |
| 3.4.3 | Imagines | 234 |
| 3.4.3.1 | Attraktive und repellente Duftstoffe für das Abendpfauenaug (<i>Smerinthus ocellatus</i> L.) und den Gabelschwanz (<i>Cerura vinula</i> L.)... 236 | |
| 4 | Zusammenfassung | 239 |
| | Literaturverzeichnis:..... | 242 |

1 Die Variabilität der Duftemission der Bäume

1.1 Artspezifische Duftmuster

Die Pflanzendiversität wird weltweit auf bis zu 500.000 Arten geschätzt. In Folge der Evolution haben sich die einzelnen Arten an die unterschiedlichen Bedingungen angepasst. Pflanzen sind lebendige Organismen die wachsen, altern und sterben. Damit sind unterschiedliche physiologische Prozesse, wie z.B. Atmung, Stoffwechsel und Photosynthese verbunden. Diesen Prozessen liegen chemische Reaktionen zu Grunde, die zur Veränderung der Pflanze und ihrer Umgebung beitragen. Bei diesen und auch anderen Prozessen entstehen viele Substanzen, die in den gesamten komplizierten innerartlichen und zwischenartlichen Interaktionen eine wichtige Rolle spielen. So divers wie die Pflanzenwelt, ist auch die Welt

der Volatile, die sie emittieren. Einzelne chemische Substanzen bilden einzigartige, artspezifische Zusammensetzungen. Dadurch, dass einige Pflanzen sich ähnlichen Bedingungen angepasst haben, sieht man auch Ähnlichkeiten in den Duftmustern.

In dieser Arbeit wurden die Duftspektren der Bäume analysiert. Die Botanik definiert Bäume als mehrjährige, holzige Samenpflanzen, die einen dominierenden Spross aufweisen, der durch sekundäres Dickenwachstum an Umfang zunimmt. Diese Merkmale unterscheiden einen Baum von Sträuchern, Farnen, Palmen und anderen holzigen Pflanzen. Stamm, Äste und Zweige verlängern sich jedes Jahr durch Austreiben von Endknospen und Seitenknospen. Im Gegensatz zum Strauch ist es das besondere Merkmal der Bäume, dass die Endknospen über die Seitenknospen dominieren. Die untersuchten Salweiden und Zitterpappeln gehören zwar zu den Bäumen, können aber unter besonderen Umständen auch in Strauchform vorkommen. Verschiedene überirdische Pflanzenorgane wie verholzte Triebe, Früchte, Blüten und Blätter können ganz unterschiedliche Düfte aussenden. Die Duftemission kann mit der Rolle des Organs zusammenhängen. So ist es zum Beispiel bei den Blüten, die nicht nur durch optische sondern auch durch olfaktorische Signale die Bestäuber anlocken. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Analyse der Blattdüfte. Die Hauptaufgabe der Blätter ist die Photosynthese, wobei auch Atmung, Wachstum, Zersetzung, Gasaustausch und viele chemische Reaktionen in den Blättern stattfinden. Die Blätter duften meisten weniger intensiv als die Blüten solange sie nicht mechanisch verletzt sind. Nach der Zerstörung des Gewebes entweichen viele GLVs (green leaf volatiles) in die Umgebungsluft. Aber nicht jede Verletzung ist gleich. Nach Insektenfraß werden teils andere Volatile als nach einer gleich großen, mechanischen Verletzung freigesetzt. Diese Tatsache wurde experimentell an der Tabak- und Kartoffelpflanze nachgewiesen (Schütz et al., 1997; De Moraes et al., 1998). Der Insektenfraß kann sowohl lokale als auch systemische Änderungen des Duftmusters auslösen. Der Speichel des Insekts reagiert mit dem Inhalt des Blattes und ergibt ein Duftmuster, der spezifisch für Herbivorenfraß ist (Turlings et al., 2000; Pare et al., 2005). Manchmal sind die HIPVs (herbivore induced plant volatiles) sogar je nach Herbivorenart unterschiedlich (De Moraes et al., 1998; Smid et al., 2002). Blattdüfte werden häufig von den Blattfressern wahrgenommen. Die Pflanze hat aber keine Interesse daran die Herbivoren anzulocken, aber das Anziehen von Gegenspieler der Herbivoren, wie Parasitoide und Räuber, macht mehr Sinn, und wird häufig „praktiziert“. Mit solchen tritrophischen Beziehungen beschäftigten sich schon viele Autoren (Turlings et al., 1990; Takabayashi et al., 1991; Turlings et al., 1991; De Moraes et al., 1998; De Moraes et al., 2001; Chen und Fadamiro, 2007). In dieser Arbeit

liegt der Fokus auf der Habitatfindung der ausgewählten Falterarten. Die Substanzen, die dabei eine Rolle spielen, werden in geringen Konzentrationen emittiert und müssen sehr empfindlich wahrgenommen werden, damit sie über weite Entfernungen wirken können.

1.2 Saisonunterschiede

Die Laubbäume in europäischen geographischen Breiten mussten sich an die kalte Winterzeit anpassen. Durch das Abwerfen des Laubes und die Verholzung der Zellen schützen sie sich vor Frost. Das führt dazu, dass unverholzte und verholzte Pflanzenteile eine verschiedene Physiologie haben und daher unterschiedliche Volatile emittieren. Die Blätter werden jedes Jahr neu gebildet und altern innerhalb der Vegetationsperiode. Diese Alterungsprozesse beeinflussen nicht nur die Qualität sondern auch die Quantität der Duftemissionen. Auch die phenolischen Inhaltstoffe der Pflanzengewebe variieren von Monat zu Monat. Der Anteil phenolischer Glykoside in der Rinde von Weiden (*Salix daphnoides*, *Salix pentandra*, *Salix purpurea*) wurde an drei Terminen in der Vegetationsperiode (März, Juni und Juli) verglichen. Man konnte eine deutliche Abnahme der Konzentration im Verlauf der Zeit beobachten (Forster et al., 2008). Auch eigene Versuche zeigten deutliche Unterschiede in den Duftspektren im Laufe der Vegetationsperiode. So wurden im August über 40 Substanzen, die weder im Mai noch im Juli messbar waren, gefunden. Die Saisonunterschiede im Duftspektrum sind auch von den sich ändernden Temperaturbedingungen abhängig. Bei den Aufnahmen im Freiland stößt man auf ein methodisches Problem. Es ist unmöglich im Frühjahr, im Sommer und im Herbst bei gleichen Temperaturbedingungen die Duftproben zu nehmen. Selbst wenn eine Momentaufnahme die gleiche Temperatur zeigt sind die Tagesamplituden deutlich anders. Diese Tatsache erschwert quantitative aber auch qualitative Vergleiche. Wegen sehr vielen Variablen, die bei Freilandaufnahmen eine wichtige Rolle spielen, wurde die Analyse der Saisonunterschiede nur auf die Qualität beschränkt. Die Quantität wurde an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

1.3 Tageszeitunterschiede

Die meisten Autoren vergleichen die Tag- mit der Nachtemission und weisen auf deutliche Unterschiede, die vor allem auf Photosynthese und Transpiration zurückgeführt werden (Pare und Tumlinson, 1999; De Moraes et al., 2001). Bei den untersuchten Pappeln und Weiden wurde auch eine Variabilität der Duftemission im Laufe des Tages beobachtet. Ähnlich wie beim Saisonverlauf lässt sich hier der Faktor Temperatur nicht ausschließen. Die Unterschiede waren geringer als zwischen den Monaten und betrafen vor allem die Quantität

und die relative Zusammensetzung der Duftmischung. Die Grünblattdüfte (z.B. (Z)-3-Hexenyl-acetat) die zu jedem Zeitpunkt auffindbar waren, zeigten deutliche quantitative Unterschiede im Laufe des Tages. Die tageszeitabhängige Variation wurde bei Kiefern (*Pinus pinea*) am Beispiel der Terpenenemissionen festgestellt (Staudt et al., 2000). Die untersuchten Falter dienten in eigenen Untersuchungen als Informationsfilter. Deswegen wurden die Proben genau zu dem Zeitpunkt genommen, wann die Falter aktiv sind.

1.4 Einfluss der Umweltfaktoren: Stress, Exposition, Kondition

Die Volatile entstehen als Neben- oder Hauptprodukte physiologischer Prozesse. Die biotischen und abiotischen Umweltfaktoren wie Lichtexposition, Wasser- und Salzgehalt im Boden oder Herbivorenfraß beeinflussen die Kondition der Bäume und gleichzeitig ihre VOC Emissionen (Baldwin et al., 2006). Je nachdem, wo das Optimum der Pflanze liegt und wie breit der Toleranzbereich ist, können die gleichen Bedingungen einen unterschiedlichen Einfluss auf die Entwicklung haben. Zitterpappeln und Salweiden gehören zu den Pionierbäumen und haben relativ geringe Habitatansprüche. Jedoch stoßen sie auch an ihre Grenzen und können bei besonders ungünstigen Umweltbedingungen unter Stress stehen. Dann emittieren sie andere Duftkomponenten als ungestörte Pflanzen. In stressigen Situationen können sogar manche Pflanzenarten auf dem volatilen, also chemischen, Weg kommunizieren und sich vor biotischen Stressfaktoren wie Herbivoren oder Krankheiten warnen. Dicke und Hilker (2003) untersuchten diesen Effekt bei *Arapidopsis thaliana* (Dicke und Hilker, 2003). Auch eine interspezifische Kommunikation zwischen Tabakpflanzen (*Nicotiana attenuata*) und dem Beifuss *Artemisia tridentata tridentata* wurde dokumentiert (Karban et al., 2000; Karban und Maron, 2002; Karban et al., 2004; Baldwin et al., 2006). Verschieden Hybridpappelarten *Populus deltoides* x *nigra* (Ping et al., 2001; Frost et al., 2007; Frost et al., 2008) und *Populus tomentosa*, *P. simonii* x *P. pyramidalis* (Ping et al., 2001) kommunizieren auch miteinander. Eine bekannte Kommunikationschemikalie ist Methylsalicylat (MeSa). Ihre Rolle wurde bei der Resistenzentwicklung gegen einen Virus bei den Tabakpflanzen nachgewiesen (Shulaev et al., 1997). Methylsalicylat wurde auch in den untersuchten Weiden und Pappeln nachgewiesen. Bei den Pappeln konnte man größere Mengen des Methylsalicylats als bei den Weiden beobachten. Es zeigten sich auch quantitative Unterschiede in der emittierten Menge dieses Stoffes bei verschiedenen Behandlungsvarianten (sonnige und schattige Exposition). Die Zitterpappeln in der sonnigen Exposition emittierten die größten Mengen Methylsalicylat. Die beiden untersuchten Falterarten konnten diese Substanz wahrnehmen. Am häufigsten reagierten weibliche

Gabelschwänze (34%). Die männlichen Tiere dieser Art haben diesen Stoff nicht wahrgenommen. Bei den Abendpfaueaugen konnten beide Geschlechter den Stoff wahrnehmen und die Reaktionen wurden etwas häufiger bei den Männchen als bei den Weibchen beobachtet. Weitere elektrophysiologische Versuche zeigten, dass schon sehr geringe Mengen von Methylsalicylat eine Reaktion auslösen.

Die weiblichen Gabelschwänze reagierten signifikant gegenüber der negativen Kontrolle auf die Konzentration 10^{-7} (in Paraffinöl g/g) und Abendpfaueaugen auf 10^{-6} (in Paraffinöl g/g). Methylsalicylat beeinflusste auch das Verhalten der Falter. Im Verhaltensversuch zeigte sich Methylsalicylat als attraktiv für Gabelschwanz Weibchen und männliche Abendpfaueaugen. Für die weiblichen Abendpfaueaugen wirkte Methylsalicylat im untersuchten Konzentrationsbereich repellent. Die männlichen Gabelschwänze zeigten weder positive noch negative Reaktionen. Möglicherweise gewinnen die weiblichen Gabelschwänze anhand der Wahrnehmung von Methylsalicylat eine Information über die Exposition und die Kondition des Wirtsbaumes.

1.5 Auswahl der Methoden für die Duftanalyse

Eine Reihe von Methoden zur Sammlung und Extraktion der Duftmoleküle steht der Wissenschaft zur Verfügung (Tholl et al., 2006). Aufgrund der Laborausstattung standen für diese Arbeit drei verschiedene Methoden: CLSA (closed-loop stripping analysis), SPME (solid phase microextraction) und TDS (thermal desorption system) zur Auswahl. SPME sammelt die Duftmoleküle passiv, d.h. ohne Luftbewegung. TDS und CLSA filtern die Duftmoleküle aus der durch eine Pumpe bewegte Luft und werden als aktive Methoden bezeichnet. Alle drei Systeme verlangen die Einrichtung eines abgeschlossenen Bereichs um die Duftquelle herum. Die aktiven Systeme CLSA und TDS arbeiten zusätzlich mit Pumpen, die die Luft in Bewegung bringen. Die TDS Methode ist empfindlicher als die CLSA und die SPME Methodik, das heißt dass die gleiche Duftstoffmenge in viel kürzerer Zeit adsorbiert wird (Tholl et al., 2006). Der Vorteil der CLSA Methode liegt bei der Analyse im Gaschromatograph (GC). Das TDS-Röhrchen wird einmalig erhitzt und alle Duftmoleküle wandern durch die GC-Säule. Nach einer Messung ist keine Wiederholung möglich. Bei den CLSA Proben arbeitet man mit etwa 50µl Lösungsmittel (Dichloromethan und Methanol) in dem die Duftstoffe gelöst sind. Die Flüssigkeit wird Portionsweise (1µl) in den GC injiziert. Das ist eine sehr gute Methode, wenn man parallel zur GC Messung auch eine EAD Aufnahme durchführen möchte. Die Insektenantennen zeigen eine große biologische

Variabilität, aber dank der CLSA Methode sind mehrere GC-MS/EAD Wiederholungen mit den Duftproben möglich.

Zu der Quantifizierung der Duftproben gehört auch eine Quantifizierung der beprobten Blattmasse. Eine Blattflächenermittlung wäre im Freiland sehr zeitintensiv. Durch die Verwendung der LbT-Methodik war anhand einer schnellen und einfachen Messung der Länge der beblätterten Triebe die Ermittlung der Blattmasse und Blattfläche möglich. Durch artspezifische Kalibrierung der Methode wurde auch die Variabilität und die Genauigkeit der erhobenen Daten eingeschätzt (Paczowska et al., 2009).

2 Lebensraum der Falter

2.1 Waldrand als Habitat

Waldränder sind ganz besondere Habitate. Wo sich zwei Welten treffen herrscht Vielfalt. Mit der Gestaltung der Waldränder haben sich mehrere Autoren beschäftigt (Aichmüller, 1991; Kögel et al., 1993; Kuster, 1995; Tidow et al., 1997). Der Schwerpunkt lag hier aber auf den Waldaußenrändern. Ein breiter Saum mit vielen Übergangszonen und zahlreichen Strukturen wird angestrebt. Genau so wichtig, aber oft übersehen, sind Waldinnenränder wie Wegesränder, breitere Rückegassen, große Lichtungen, Bäche und Kreuzungen. Diese Strukturen bieten geeignete Habitate für einige sehr empfindliche und anspruchsvolle Arten wie den großen Eisvogel (*Limenitis populi*), den Großen Schillerfalter (*Apatura iris*) und den Kleine Schillerfalter (*Apatura ilia*) (Füldner, 2004). An Waldrändern herrschen sehr diverse Lichtverhältnisse. Je nach Himmelsrichtung bzw. Hangneigung und Überschildung werden bestimmte „Flecken“ entweder in den Morgenstunden oder in den Nachmittagsstunden besonnt. Gerade die Lichtverhältnisse spielen hier eine besondere Rolle im Bezug auf die Artendiversität (Pausas und Austin, 2001).

Viele Pflanzen und Tierarten finden gerade am Waldrand optimale Lebensbedingungen. Oft findet man hier Pflanzen aus der Familie der Salicaceae. Bis vor kurzem gehörte dazu außer den Pappeln (*Populus*) und den Weiden (*Salix*) noch die Gattung *Chosenia*, die mit einer Art vertreten ist. Seit der Zuordnung einiger Arten der ehemaligen Familie Flacourtiaceae zu den Salicaceae ist die Familie der Salicaceae deutlich gattungsreicher geworden. Jedoch assoziieren viele Praktiker die Salicaceae hauptsächlich mit Pappeln und Weiden. Generell ist die Gattung *Salix* im Mitteleuropa mit 34 bekannten Spezies artenreicher als die Gattung *Populus* (Schichtl, 1992). Viele oligophage Insekten nehmen verschiedene *Salix* oder *Populus* Arten als Wirtspflanze an. Bei *Salix* werden die glatten „schmalblättrigen“ und die rauen

„breitblättrigen“ Weiden von manchen Lepidopterenarten nicht gleichermaßen präferiert. Die Salweide gehört zu den breitblättrigen Weiden und wird oft bevorzugt angenommen, weswegen viele Meldungen sich nur auf diese Art beziehen (Füldner und Damm, 2003).

Die in dieser Arbeit betrachtenden Zitterpappeln und Salweiden gehören zu den lichtbedürftigen Pionierbaumarten und kommen häufig in den Übergangszonen zwischen Wald und Wiese und an Wegesrändern vor. Die Zitterpappel und die Salweide bilden eine Basis für viele strukturreiche Nahrungsnetze. Die Waldranduntersuchungen ergaben in einem relativ kurzen Zeitraum (1997-2002), mit Berücksichtigung nur einer Insektenordnung, 83 Großschmetterlingsarten an Salweide (*Salix caprea*) und 65 Arten an der Zitterpappel (*Populus tremula*) (Füldner, 2004). Das sind sehr hohe Zahlen und in Mitteleuropa ist keine andere Pflanzenart bekannt, die einer solchen Vielzahl von Lepidopteren als Nahrung dienen (Füldner und Damm, 2002, 2003). Über 60% aller Arten wurden an beiden Baumarten gefunden. Diese artenreichen Strukturen bieten auch Habitats und Nahrungsquellen für zahlreiche Parasitoide und Räuber. Diese erfüllen eine wichtige Funktion bei der natürlichen Kontrolle von Schädlingen und bei der Minderung bzw. Verzögerung von deren Massenvermehrungen.

2.2 Abendpfauenaug (*Smerinthus ocellatus* L.) und Gabelschwanz (*Cerura vinula* L.)

Das Abendpfauenaug (*Smerinthus ocellatus*) und der Große Gabelschwanz (*Cerura vinula*) können sich an beiden Baumarten entwickeln. Dies wurde nicht nur in der Laborzucht sondern auch durch Raupenfunde im Freiland nachgewiesen. Diese beiden Schmetterlingsarten sind phylogenetisch weit voneinander entfernt. Sie gehören zu zwei unterschiedlichen Familien in unterschiedlichen Überfamilien (Sphingoidea und Noctuoidea) der gleichen Untersektion Bombycina. Das Abendpfauenaug ist ein Schwärmer (Sphingidae) und der Gabelschwanz gehört zu den Zahnspinnern (Notodontidae). Aus ökologischer Sicht haben diese Falter jedoch viele gemeinsame Eigenschaften. Beide gehören zu den Nachtfaltern die keine Nahrung aufnehmen, da sie zurückgebildete Mundwerkzeuge haben. Die Imagines sind kurzlebig und verbrauchen nur die von der Raupe gespeicherte Energie. Sowohl männliche als auch weibliche Falter beider Arten sind gute Flieger. Die Weibchen suchen nach optimalen Eiablageplätzen und legen ihre Eier einzeln oder paarweise ab. Nach der Eiablage kümmern sie sich nicht weiter um ihre Nachkommen. Doch ist die gezielte Suche nach dem geeigneten Platz auch eine Art der Brutfürsorge. Die Raupen sind oligophag und können nicht nur an Blättern verschiedener Pappeln und Weiden sondern auch an einigen Obstgehölzen fressen. Auf der Basis der Häufigkeit von Funden wurden für das

Abendpfaueauge an erster Stelle die Weiden und für den Gabelschwanz die Pappeln als Futterpflanzen genannt. Die Fundorte der Raupen haben deutlich stärkere Gewichtung als Laborfütterungsversuche mit verschiedenen Pflanzenarten. Oft werden Futterpflanzen genannt die nur im Labor angenommen wurden, ohne dass Freilandfunde an diesen Pflanzen vorliegen (Füldner und Damm, 2002). Das lässt sich nicht nur auf die Nahrungspräferenzen sondern auch auf die Konkurrenzverhältnisse zurückführen. Laut Literatur bevorzugen beide Arten sonnige Habitate. Jedoch sind die Weiden-Habitate, in denen das Abendpfaueauge oft gefunden wird, feuchter als die Zitterpappelgruppen mit dem Gabelschwanz.

Beide Falterarten überwintern im Puppenstadium. Hier sieht man eine gute Anpassung an das Habitat. Die Puppe des Abendpfaueauges ist mit einer Fettschicht überzogen, die sie vor Feuchtigkeit schützt. Die Raupen buddeln sich etwa 20cm tief in den Boden um nicht weggespült zu werden. Die Puppen des Gabelschwanzes überwintern in einem harten Holzkokon, der sie vor dem Austrocknen schützt. Beide Falter entwickeln sich gut an beiden untersuchten Baumarten, aber deren genetische Anpassung deutet auf leicht unterschiedliche ökologische Präferenzen hin. Diese beiden Falterarten zeigen trotzdem einen breiten ökologischen Toleranzbereich und sind anpassungsfähig. Der Gabelschwanz wird sogar als Kulturfolger genannt (Ebert et al., 1994). Es gibt aber Arten mit einem wesentlich schmaleren Toleranzbereich. Diese Arten reagieren viel sensibler auf Habitatänderungen, sind wesentlich seltener oder sogar vom Aussterben bedroht. Ein Beispiel sind der Grosse und der Kleine Schillerfalter (*Apatura iris*, *Apatura ilia*) und der Eisvogel (*Limenitis populi*) (Füldner, 2004). Eine experimentelle Arbeit mit diesen Arten wäre sehr schwierig, deswegen wurden die Mitbewohner des Großen und Kleinen Schillerfalters und des Eisvogels gewählt, um die Grundlagen der olfaktorischen Orientierung der Falter am Waldrand zu erforschen. Das chemoökologische Kennenlernen dieses Systems soll gezielte, effektive und effiziente Schutz- und Pflegemaßnahmen ermöglichen.

3 Chemoökologische Interaktionen zwischen den Pflanzen und herbivoren Insekten

3.1 Pflanzenabwehrmechanismen

Pflanzen und Insekten haben sich seit über 350 Millionen Jahren aneinander angepasst. Durch einen ständigen Überlebenswettkampf sind diverse Mechanismen zum Schutz und zur Verteidigung entstanden. Generell kann man diese Mechanismen in statische bzw. konstitutive und aktive bzw. induzierte aufteilen. Bei induzierter Abwehr gibt es viele

Substanzen die von mehreren Pflanzenarten für diesen Zweck genutzt werden. Herbivore Insekten aktivieren in Pflanzen sowohl lokale als auch systemische Produktion von Jasmonaten, Wasserstoffperoxid, Oligogalacturonsäuren, Methylsalicylat (Shulaev et al., 1997) oder Monoterpenen (Brilli et al., 2009). Einige der produzierten Substanzen sind leicht flüchtig (volatile organic compounds-VOCs) und können über weite Entfernungen übertragen werden. Die induzierte Abwehr basiert dagegen auf artspezifischen Substanzen (Gatehouse, 2002). Auch diese können sowohl als Inhaltsstoffe der Zellen oder in volatiler Form existieren. Die flüchtigen Substanzen spielen eine wichtige Rolle in der Kommunikation ohne direkten Kontakt. Auf diese Art können Pflanzen miteinander kommunizieren, sich vor Gefahren warnen und entsprechende Schutzmechanismen aktivieren. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Kommunikation zwischen Pflanzen und Insekten. Viele herbivore Insekten sind in der Lage, die pflanzlichen Schutzmechanismen zu tolerieren. Diese Anpassung kann auch konstitutiv oder induziert sein. Sowohl die Schutzmechanismen der Pflanzen als auch die Anpassung der Insekten sind mit energetischem Aufwand für die Organismen verbunden. In den meisten natürlichen Systemen pendelt sich ein energieeffizientes Niveau ein, auf dem sowohl Insekten als auch Pflanzen leben können, wobei aber deren Entwicklung suboptimal ist. Zum Ende der Vegetationsperiode findet man kaum Pflanzen die von keinem herbivoren Insekt angefressen sind. Trotz der Schutzmechanismen der Pflanzen wurden sie gefunden und verzehrt. Auch die zur Abwehr dienenden Inhaltstoffe der Pflanzen haben die Insekten vom Konsum der Pflanzenzellen nicht vollständig abgehalten. Jedoch werden die Menge und das Artspektrum der herbivoren Insekten von der konstitutiven Abwehr und von den induzierten Abwehrmechanismen stark beeinflusst. Die Insekten haben raffinierte Methoden zur Auffindung der Pflanzen entwickelt und die Pflanzen „tolerieren“ einen gewissen Biomasseverlust. Diese Pflanze-Insekt-Interaktion kann man mit einer Räuber-Beute-Beziehung vergleichen. Diese Interaktion ist auch ein möglicher Antrieb für die Artbildung. Sie führen zu einer dynamischen Entwicklung der Biodiversität. Ohne die genauen Prozesse zu beschreiben kann man folgende pflanzliche Abwehrstrategien nennen.

1) Pflanzen, die versuchen nicht entdeckt zu werden. Um ihre Existenz nicht zu verraten, emittieren sie wenige Duftstoffe, versuchen „unsichtbar“ im Duftspektrum der Umgebung zu sein.

2) Pflanzen, die durch mechanische Barrieren den Insektenbefall verhindern. Harte Kutikula oder dicke Wachsschicht bzw. dichte Behaarung sind deren Schutzmechanismen. Nur

Insekten mit besonderer morphologischer Anpassung, wie starken Mundwerkzeugen, können diese Barriere durchbrechen. Somit wird die Anzahl der Herbivoren reduziert.

3) Pflanzen, die in ihren Zellen toxische Stoffe enthalten. Diese Stoffe können entweder stets vorhanden sein oder erst beim Befall produziert werden. Je nach dem zu welcher Gruppe diese Stoffe gehören ist deren Wirkungsmechanismus unterschiedlich.

4) Pflanzen die sehr tolerant auf Biomassenverlust reagieren. Durch schnelles Wachstum und eine hohe Vermehrungsrate werden die Verluste schnell kompensiert. Ein gewisser Masseverlust ist in der Lebensplanung schon einkalkuliert.

Zitterpappeln und Salweiden gehören zu den schnellwachsenden Pionierbäumen. Beide Arten zeigen eine hohe Vermehrungsrate und sind auch vergleichsweise anspruchslos gegenüber Umweltfaktoren. Sie produzieren zwar toxische Stoffe, wie z.B. Salicin (ein natürliches Schmerzmittel mit bitterem Geschmack), werden aber trotzdem von einer großen Anzahl Pflanzenfresser vertilgt. Bei Weiden findet sich eine große Konzentration von Salicin in der Rinde, die Zitterpappeln enthalten bedeutende Menge Salicin in den Blättern. Die wilden Tiere nehmen instinktiv Zitterpappelblätter als Heilmittel auf. Pappeln und Weiden haben keine dicke oder harte Kutikula. Nur die Salweide hat eine dichte Behaarung auf den Blättern und kann dadurch kleine Insekten am Fraß hindern. Die hohe Artendiversität phytophager Schmetterlingsraupen an der Salweide deutet auf eine eingeschränkte Wirkung dieses Schutzmechanismus hin. Man könnte sie anhand von diesen Eigenschaften zu der Gruppe 4) zuordnen. Die Emission der volatilen Substanzen ist recht gering, deswegen kann man diese Baumarten auch zu der Gruppe 1) zuordnen.

3.2 Anpassung der Insekten an die Pflanzenabwehrmechanismen

Trotz allen raffinierten Abwehr- und Versteckstrategien der Pflanzen findet sich immer mindestens eine herbivore Art, die sich erfolgreich angepasst oder spezialisiert hat. Auch bei den Insekten kann man von konstitutiven und induzierten Mechanismen sprechen (Gatehouse, 2002). Die Basisprinzipien verschiedener Anpassungsstrategien wurden sehr gut von Harborne (1988) erklärt. Ein wichtiger Punkt ist die Aufteilung der Insekten in unterschiedlichen Spezialisierungsgruppen. Je enger die Spezialisierung in Bezug auf die Nahrungsquelle ist, desto spezifischer müssen die Anpassungsmechanismen sein. In der Klasse der Insekten findet man zahlreich Phagiestufen, von anspruchslosen Polyphagen bis zu streng spezialisierten Monophagen. An Salweiden und an Zitterpappeln wurden vor allem

polyphage Arten gefunden (Földner und Damm, 2002, 2003). Bei den Pappeln wurde auch festgestellt, dass für 90% der gefundenen polyphagen Arten die Zitterpappel eine wenig wichtige oder zufällige Nahrungspflanze war (Földner und Damm, 2002). Diese Baumarten werden also gerne als „Ersatzfutter“ angenommen, wenn zum Beispiel die Lieblingspflanze gerade nicht da ist. Deswegen eignen sich solche „schmackhaften“ Pionierbäume als Füllung der grünen Korridore zur Vernetzung von Habitaten.

3.3 Sinneswahrnehmung der Insekten

Insekten besitzen eine breite Werkzeugpalette um ihre Umwelt wahrzunehmen. Jedoch sind nicht alle Sinne gleichmäßig ausgeprägt. Zur Verfügung stehen hier folgende Sinne: chemischer Sinn (Geschmackssinn und Geruchssinn), optischer Sinn, akustischer Sinn, mechanischer Sinn (Drucksinn, Tastsinn) und thermischer Sinn.

3.3.1 Optischer Sinn

Bei der Betrachtung des optischen Sinns kann man mehrere Formen des Sehens unterscheiden. Es sind: Helligkeitssehen, Richtungssehen, Bewegungssehen, Bild- oder Formsehen und Farbsehen. Insekten besitzen zwei Organe mit denen sie sehen können. Es sind Ocellen und Facettenaugen (Komplexaugen). Die Ocellen dienen der Lichtwahrnehmung und sind nicht bei jeder Insektenordnung vorhanden. Die Facettenaugen bestehen aus vielen einzelnen Ommatidien (bis 28.000 bei Libellen). Jedes Ommatidium bildet einen Einzelpunkt der Umwelt ab. Je mehr Ommatidien, desto schärfer ist das Mosaik-Bild welches die Insekten sehen. Die Komplexaugen haben den Vorteil, dass sie ein höheres zeitliches Auflösungsvermögen als Linsenaugen haben (bis 250 Bilder pro Sekunde; beim Mensch sind es 24). Deswegen können höhere Bewegungsgeschwindigkeiten realisiert werden. Der optische Sinn hat wegen dem fehlenden Akkomodationsvermögen der Linse eine geringere Reichweite als der olfaktorische Sinn, aber eine weitere Reichweite als der gustatorische Sinn. Für Insekten zählt der optische Sinn zu den dominierenden Wahrnehmungsmöglichkeiten. Er dient zusammen mit dem chemischen Sinn der Habitat-, Nahrungs- und Partnerfindung.

3.3.2 Chemische Sinne

Zu den chemischen Sinnen zählen Geruchs- und Geschmackssinn. Diese Sinne sind phylogenetisch gesehen die ältesten. Insekten riechen mit Rezeptorzellen der Antennen und schmecken mit Zellen auf verschiedenen Körperteilen, besonders auf den Mundgliedmaßen, Füßen und Antennen. Diese Art der Wahrnehmung und der Kommunikation ist sehr präzise und erfordert relativ wenig Energieaufwand. Die chemosensitiven Sinnesorgane der Insekten,

die sog. Sensillen sind Differenzierungen der Kutikula. Insektensensillen gehören in die Gruppe der Kleinorgane deren Entwicklung aus einer Epithelzelle hervorgeht. In einem Sensillum befinden sich ein bis 40 Rezeptorzellen. Die Rezeptorzelle sendet einen oder mehrere periphere Ausläufer (Dendriten) in die Flüssigkeit (die „Sensillum-Lympe“) enthaltende Sinneshaar und nimmt mit ihrem Nervenfortsatz (Axon) Verbindung mit dem zentralen Nervensystem auf (Schneider, 1970). Die neusten Untersuchungen zeigen, dass die Rezeptorzellen (receptor neurons, RN) sogar in einem Sensillum auf unterschiedliche Substanzen ausgerichtet sein können (Ulland et al., 2008). Bei dem Falter *Mamestra brassicae* wurden 21 Typen der olfaktorischen Rezeptorzellen nachgewiesen (Ulland et al., 2008).

Sensillen nehmen mechanische, hygrostatische, thermische, gustatorische und olfaktorische Reize wahr. Je nach Morphologie, Strukturmerkmalen und Sensitivität unterscheidet man unterschiedliche Sensillentypen. Die aktuelle Nomenklatur unterscheidet: *Sensilla coeloconica*, *S. basiconica*, *S. styloconica*, *S. chaetica*, *S. trichodea*, *S. ampulacea*, *S. campaniformia* und *S. placodea*. Die chemischen Reize werden von *Sensilla basiconica*, *S. trichodea*, *S. chaetica*, *S. styloconica*, *S. coeloconica* und *S. placodea* übertragen (Altner, 1977). Die Moleküle erreichen die Sensillenlymphe durch Wand- bzw. Apikalporen. Olfaktorische Sensillen zeichnen sich durch Wandporen aus und die sog. Schmeckhaare haben meistens einen Apikalporus.

3.3.2.1 Geschmackssinn

Der Geschmackssinn dient vor allem der Nahwahrnehmung. Dementsprechend zeichnet er sich durch eine relativ hohe Reizschwelle aus. Die Geschmackssensillen befinden sich nicht nur im Bereich des Mundapparates sondern auch oft auf den Füßen. Zur Wahrnehmung ist hier immer ein direkter Kontakt mit dem Substrat erforderlich. Auf diesem Weg können flüssige und feste Substrate identifiziert werden. Die sog. Schmeckhaare (*S. trichodea*, *S. basiconica*, *S. styloconica*) haben unterschiedlich gebaute terminale Porenregionen. Manchmal ist die Spitze schräg abgestützt, manchmal ist sie ganz platt. Im Bereich der terminalen Porenregion ist ein visköses Sekret nachgewiesen worden (Morita, 1957, Stürckow, 1967, Stürckow, 1971). Es umgibt die Enden der Dendriten und dürfte somit als reizleitende Substanz wirken und zugleich die Dendritenmembranen vor Austrocknung schützen. Das Verständnis für Geschmacks- und Geruchswahrnehmung ist wichtig bei der Interpretation der Verhaltensversuche, die einen wichtigen Teil dieser Arbeit ausmachen.

3.3.2.2 Geruchssinn

Der Geruchssinn dient vor allem der Fernwahrnehmung. Im Gegensatz zum Geschmackssinn zeigt der Geruchssinn eine relativ niedrige Reizschwelle. Die olfaktorischen Sensillen befinden sich vor allem auf den Insektenantennen aber zum Teil auch auf den Maxillen und Palpen (de Bruyne und Baker, 2008). Sie zeichnen sich durch Wandporen aus. Die Duftmoleküle können durch diese Poren in das Haarlumen gelangen. Die Struktur der Wand und das System der Poren sind sehr komplex. Auch die Größe der Poren variiert stark. Bei guten REM (Rasterelektronenmikroskop) Aufnahmen mit Vergrößerungen über 40.000 sind die Poren sichtbar. In eigenen REM Aufnahmen der Antennen von Gabelschwanz und Abendpfauenauge ist es nicht gelungen die Poren deutlich zu erkennen.

Die Duftmoleküle die in die Sensillen gelangen verbinden sich mit spezifischen Proteinen (OBPs odorant binding proteins) und wandern als Duftstoff-OBP Komplex zum Rezeptor. Die Anwesenheit und die Lokalisation von OBPs ist ein wichtiger Hinweis auf die Duftwahrnehmung. Die Rezeptoren werden ORNs (olfactory receptor neurons) genannt. Die ORNs bei Insekten sind bipolare Neuronen. Verschiedene Klassen von ORNs sind entweder eng oder breit spezialisiert. Ein sehr enges Wahrnehmungsspektrum haben die ORNs, die auf Pheromone spezialisiert sind. Die interspezifischen Duftstoffe werden durch weniger spezialisierte Rezeptoren wahrgenommen. Unabhängig von der Spezialisierung und von der Lage auf dem Körper werden alle olfaktorischen Signale in den sog. Antennallobus im Insektengehirn übertragen. Die olfaktorischen Sensillen fallen unter zwei Strukturkategorien: mit doppelter oder mit einfacher Wand. Die meisten olfaktorischen Sensillen haben einfache dünne Wände und sind abgestumpft und kegelförmig (de Bruyne und Baker, 2008). Solch ein klassisches *Sensillum basiconicum* wurde nur bei den weiblichen Abendpfauenaugen in der Nähe der Antennenspitze beobachtet. Jedoch zeigten viele Untersuchungen mit SSR (single sensillum recording) auch Reaktionen auf olfaktorische Reize bei haarförmigen *S. basiconicum* und bei *S. trichodeum*. Diese Sensillentypen waren die zahlenmäßig am meisten beobachteten beim Gabelschwanz und beim Abendpfauenauge. *S. trichodeum* zeigte oft eine Spezialisierung für Sexualpheromone (Pers und Otter, 1978). Die Struktur und die Menge der Sensillen und deren Größe sind oft geschlechtsspezifisch. Männchen haben oft Sensillen die auf die Pheromonwahrnehmung spezialisiert sind. Aber auch wenn die gleichen Sensillentypen bei beiden Geschlechtern vorhanden sind, sind oft die männlichen Sensillen kräftiger und zahlreicher (Castrejon-Gomez et al., 1999). Auch beim Gabelschwanz und beim Abendpfauenauge konnte man diese Art des Geschlechtsdimorphismus beobachten.

3.4 Verhalten

Die von den Pflanzen emittierten chemischen Substanzen sind zusammen mit den optischen Reizen eine wichtige Entscheidungsgrundlage für phytophage Insekten. Diese Insekten suchen nach Nahrungsquellen für sich oder nach einem geeigneten Eiablageplatz, also nach der Nahrungsquelle für ihre Nachkommen. Holometabole Insekten haben oft während ihrer verschiedenen Entwicklungsstadien unterschiedliche Nahrungsansprüche. Meistens brauchen die Larven wesentlich mehr Nahrung als die Imagines. Bei vielen Lepidopteren verzehren die Larven große Mengen grüner Pflanzenmasse während die Imagines sich hauptsächlich von Pflanzensäften ernähren. Bei den untersuchten Faltern *Smerinthus ocellatus* und *Cerura vinula* nehmen die Imagines gar keine Nahrung auf, deswegen kann man hier nicht von fraßstimulierenden Stoffen reden. Die attraktiven Substanzen können entweder zur Paarung oder zur Eiablage stimulieren. Es bleibt noch die Frage, ob nur Imagines über den Fraßort entscheiden oder auch die Larven gezielt nach ihrer Nahrung suchen. Welche Entfernungen sie dabei bewältigen können hängt von der Mobilität der Raupen ab.

3.4.1 Kritischer Blick auf die methodischen Ansätze

Es gibt verschiedene Ansatzmöglichkeiten, um zu erfahren welchen Einfluss die unterschiedlichen Duftstoffe bzw. Duftgemische auf das Verhalten der Insekten haben (Hare, 1998). Jeder Versuch muss an die konkrete Insektenart angepasst werden. Nicht nur morphologische Merkmale, wie z.B. die Körpergröße, sondern auch die Ethologie der Insekten (z.B. Fortbewegungsart, Aktivitätszeit) müssen dabei berücksichtigt werden. Auch die Umweltbedingungen, wie z.B. Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Licht, Geräusche, Farben, Himmelsrichtung usw., können das Verhalten der Insekten beeinflussen (Bernays und Chapman, 1994; Hare, 1998). Ein optimaler Verhaltensversuch soll sowohl im Labor als auch im Freiland durchgeführt werden. Im Freiland ist es meistens unmöglich homogene Bedingungen zu finden um nur einen ausgewählten Parameter zu testen. Im Bereich der Agrarentomologie können Versuche auf dem Versuchsacker durchgeführt werden (Hare, 1998). Bei einer Forschung an Waldrändern wird es aber niemals gelingen, zwei gleiche Waldränder zu finden oder zu gestalten. Deswegen mussten die Verhaltensversuche dieser Arbeit im Labor durchgeführt werden.

Im Labor versucht man einerseits die Insekten zum natürlichen Verhalten zu stimulieren, andererseits sollen möglichst viele Parameter gleichmäßig gehalten werden, damit man den Einfluss einer Variablen, wie z.B. der Duftstoffemission, testen kann. Verhaltensversuche mit Insekten können entweder bei einer aktiven Luftbewegung im sog. Windtunnel oder nur mit

passivem Luftaustausch durchgeführt werden. Die eigenen Versuche wurden mit passivem Luftaustausch gemacht. Bei den Versuchen im Windtunnel spielt die Luftgeschwindigkeit eine sehr große Rolle. Es erfordert zahlreiche Vorversuche um eine optimale Luftgeschwindigkeit zu finden. Aus Zeitgründen und wegen einer geringen Anzahl der verfügbaren Tiere konnten solche Vorversuche nicht durchgeführt werden. Es bestand auch der Verdacht, dass die Luftbewegung die Versuchstiere beim Fliegen stören würde. Auch die Tatsache, dass die untersuchten Arten vor allem in den windstillen Abendstunden und an windgeschützten Waldrändern fliegen sprach gegen die Anwendung eines Windtunnels.

Der nächste Aspekt bei den Verhaltensversuchen ist die Art der Beobachtung, die Datenaufnahme und die Datenauswertung. Eine direkte, manuelle Beobachtung ist die genaueste aber zeitaufwendigste Methode. Es sind auch Videoaufnahmen möglich, diese müssen aber auch analysiert werden. Videoaufnahmen sind bei schlechten Lichtverhältnissen schwierig, bzw. bei kompletter Dunkelheit ist eine Infrarotkamera notwendig. Eine Videoaufnahme produziert ein zweidimensionales Bild, während die Falter sich in einer dreidimensionalen Umgebung aufhalten. Für die vorliegende Arbeit wurde eine manuelle Methode verwendet. Für die Datenanalyse und Auswertung ist es notwendig, bestimmte Kriterien festzulegen nach denen man aufgenommene Daten kategorisiert. Hier ist ein Kenntnis der Insektenbiologie notwendig nach der diese Kriterien für jede Art individuell angepasst werden. Typische bei den Versuchen berücksichtigte Parameter sind der Landeplatz oder die Anzahl der abgelegten Eier. Aber auch das Flugverhalten und die Länge der nacheinander folgenden Flugphasen (Rojas et al., 2000) oder die Anzahl der Zwischenstopps können bei der Verwendung von verschiedenen Duftstoffen unterschiedlich sein. Die Anzahl der abgelegten Eier war bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Gewächshausverhaltensversuchen zu gering, um eine statistisch auswertbare Aussage zu treffen. Es wäre auch nicht möglich Männchen mit Weibchen zu vergleichen. Eine wichtige Überlegung für die Auswertung der Ergebnisse ist auch die Gewichtung von einzelnen Parametern. Diese Gewichtung ist auch sehr individuell und nicht nur von Art zu Art sondern auch von Autor zu Autor unterschiedlich. Aus allen diesen Gründen ist die Vergleichbarkeit der Verhaltensversuche sehr schwierig. Hier ist die übersichtliche und sorgfältige Dokumentation, die auch für dritte Personen verständlich ist, von großer Bedeutung. Eine Methode die bei einer Art sehr gut funktioniert hat ist möglicherweise für eine andere Art überhaupt nicht verwendbar.

3.4.2 Larven

Es wurden nur die Larven des Abendpfauens getestet. Im Laborversuch mit den L1 Abendpfaunlarven konnte keine olfaktorische Orientierung der Raupen festgestellt werden. Die Raupen krabbelten in zufällige Richtungen bis sie mit der Futterpflanze in Kontakt kamen. Ab diesem Moment werden gustatorische und mechanische Sinne als Entscheidungsgrundlage zugezogen. Es wird davon ausgegangen, dass L1 Larven nicht in der Lage sind, die vom Mutterfalter gewählte „Wirtspflanze“ zu verlassen und anhand olfaktorischer Orientierung nach einer neuen Futterquelle zu suchen. Desto wichtiger ist eine gezielte und selektive Suche nach einem Eiablageplatz durch den Mutterfalter.

3.4.3 Imagines

Die Imagines haben in deren kurzem Leben eine wichtige Mission zu erfüllen. Sie müssen einen Partner finden, sich paaren und ihre Eier am richtigen Ort ablegen. Die Partnersuche übernehmen meistens die Männchen, wobei die Aufgabe der Eiablageplatzsuche bei den Weibchen verbleibt. Damit sich aber beide Geschlechter mit höherer Wahrscheinlichkeit begegnen, können beide geeignete Eiablageplätze auffinden. Meistens erfolgt das Auffinden auf olfaktorischem Wege. Jedoch ist das Riechvermögen zwischen den Geschlechtern nicht gleichermaßen ausgeprägt. Eigene Versuche an beiden Falterarten bestätigen diese Hypothese. Auch die Individuen zeigen untereinander eine große Variabilität in der Ausprägung des Geruchsinns. Bei den Insekten mit einer hohen Reproduktionsrate ist manchmal nur ein kleiner Teil der Population fähig ein neues Habitat zu besiedeln. Diese Pionierindividuen tragen zur Artverbreitung bei. Durch mehrfache Wiederholung der EAD Messungen an möglichst vielen Individuen wurde versucht auch diesen kleinen Populationsteil zu erfassen. Deswegen wurden auch die Stoffe die bei etwa 20% der Messungen wahrgenommen wurden als besonders interessant bezeichnet. Es waren z.B. Methylsalicylat, Linalool, Benzylalkohol und Benzaldehyd. Weitere EAG-Messungen an weiblichen Tieren zeigten, dass die Wahrnehmbarkeitsgrenze dieser Stoffe meistens bei 10^{-7} (g/g) in Paraffinöl liegt (Ausnahmen: Methylsalicylat beim Abendpfaunauge: 10^{-6} (g/g); Benzaldehyd beim Gabelschwanz bei 10^{-4} (g/g)). Um die Rolle dieser Duftstoffe zu untersuchen wurden weitere Versuche durchgeführt. Diese sollten auf Attraktivität- oder Repellenzwirkung der Substanzen hinweisen. Da die Falter keine Nahrung aufnehmen wird davon ausgegangen, dass die attraktiven Stoffe die Weibchen zur Eiablage stimulieren und für die Männchen ein Wegweiser zum geeigneten Habitat sind.

Bei anderen Arten finden sich oft die gleichen Chemikalien die zum Fraß und zur Eiablage stimulieren. Dies ist z.B. beim Kohlweißling der Fall (Harborne, 1988). Jedoch ist diese Aussage schwer nachvollziehbar, besonders wenn Imagines und Larven auf unterschiedliche Nahrungsressourcen angewiesen sind. In erster Linie wurden die Fraßstimulatoren untersucht und erst dann forschte man über ovipositionsattraktive Stoffe.

Diese Arbeit betrachtet die das Verhalten der Insekten beeinflussenden volatilen Substanzen. Aber auch viele nicht-volatile Stoffe, wie z.B. Polyacetylen, Falcarindiol oder Bergapten, die in der Wachsschicht der Karottenblätter anwesend sind, können Ovipositionsstimulanten sein (Stadler und Buser, 1984; Degen et al., 1999). Attraktive volatile Substanzen haben ein breites Wirkungsfeld und können die herbivoren Insekten über große Entfernungen anlocken. Wie groß der Wirkungsradius ist hängt von der Empfindlichkeit der Antennen, der Intensität der Duftquelle, der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit ab (Carde und Willis, 2008). Manche Insekten, z.B. der Feuerprachtkäfer *Melanophila acuminata*, können schon die Anwesenheit von Duftstoffen bei 1pg/ml Luft aufspüren. Wenn die Geruchsquelle intensiv duftet, wie z.B. brennendes Holz, kann die chemische Information sogar über 50km weite Entfernungen übertragen werden (Schütz et al., 1999). Die untersuchten Falter zeigten ebenfalls einen sehr empfindlichen Geruchssinn. Schon die geringste getestete Dosis (10^{-7} Konzentration in Paraffinöl, g/g) einiger Substanzen löste bei den Falterantennen eine signifikante Reaktion aus. Pappeln und Weiden duften nicht so intensiv wie ein Waldbrand. Innerhalb von zwei Stunden können bei einem Zweig mit etwa 20cm LbT (Länge der beblätterten Triebe) je nach Substanz Konzentrationen zwischen 10^{-7} (g/g) bis 10^{-5} (g/g) gesammelt werden. Wenn man diese Emission auf einen kleinen Busch mit 20m LbT hochrechnet kann eine Emission von 10^{-4} (g/g) bis 10^{-2} (g/g) pro Tag ermittelt werden. Wie weit und wie schnell die Substanzen auf dem Luftweg übertragen werden hängt sehr von den Wetterbedingungen, wie Wind, Luftfeuchte und Temperatur, ab. Jedoch deutet die bei 10^{-7} liegende Wahrnehmbarkeitsgrenze auf einen sehr sensiblen Geruchssinn hin. Manchmal kann auch die Konzentration des Duftstoffes das Verhalten der Insekten beeinflussen. Der gleiche Stoff kann in geringer Konzentration attraktiv und in hoher Konzentration neutral oder sogar repellent wirken. Eine sehr hohe Konzentration eines Duftstoffes kann sogar die Wahrnehmung anderer Duftstoffe durch maximale Sättigung der Rezeptoren blockieren. Weiterhin dienen manche Stoffe der Fernorientierung und helfen das richtige Habitat bzw. die richtige Wirtspflanze zu finden, während andere Stoffe erst kurz vor oder nach der Landung bei der Auswahl des Eiablageplatzes behilflich sind. Bei der Interpretation der Beobachtung von Ovipositionsverhalten ist es schwierig bei der Nahorientierung zwischen der

gustatorischen und olfaktorischen Wahrnehmung zu unterscheiden. Ein wichtiger Hinweis auf die olfaktorische Wahrnehmung ist die elektrophysiologische Reaktion der Antenne im EAD und EAG Test. Von den vielen EAD aktiven Duftstoffen haben nur einige das Verhalten der Falter beeinflusst. Im Verhaltensversuch wurden nur acht Stoffe getestet und bei jedem von diesen Stoffen wurde bei mindestens einer Art entweder eine positive oder eine negative Reaktion beobachtet. Ein Überblick über die Ergebnisse erleichtert die Tabelle 3.1. Stoffe wie Nonanal, Decanal und Benzylalkohol waren in der getesteten Konzentration fast immer attraktiv.

Tabelle 3.1. Überblick über die Verhaltensreaktionen auf getestete Duftstoffe. A= attraktiv, R= repellent, 0= neutral

| Duftstoff | Abendpfauenaug | | Gabelschwanz | |
|-------------------------|----------------|---|--------------|---|
| | ♀ | ♂ | ♀ | ♂ |
| Hexylacetat | A | A | 0 | R |
| (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat | R | 0 | 0 | 0 |
| (Z)-3-Hexen-1-ol | A | 0 | 0 | A |
| Nonanal | A | A | A | 0 |
| 2-Ethyl-1-hexanol | A | A | 0 | 0 |
| Decanal | A | A | A | 0 |
| Methylsalicylat | R | 0 | A | R |
| Benzylalkohol | A | A | A | 0 |

Besonders unübersichtlich ist die Rolle von Methylsalicylat, das auf Abendpfauenaugen-Weibchen und auf das Gabelschwanz-Männchen repellent, jedoch auf Gabelschwanz-Weibchen attraktiv wirkte.

3.4.3.1 Attraktive und repellente Duftstoffe für das Abendpfauenaug (*Smerinthus ocellatus* L.) und den Gabelschwanz (*Cerura vinula* L.)

Hexylacetat wurde in Duftproben aller Expositionsvarianten beider Baumarten nachgewiesen. Bei den Zitterpappeln waren signifikant höhere Mengen von diesem Stoff vorhanden. Zwischen den sonnigen und schattigen Expositionen wurden keine quantitativen Unterschiede nachgewiesen. Die beiden Falterarten und beide Geschlechter haben den Stoff wahrgenommen. In beiden Fällen reagierten die Männchen häufiger als die Weibchen. Für die weiblichen Gabelschwänze, die bei etwa 50% der EAD-Messungen eine Reaktion zeigten, wurden in Dosis-Antwort-Experimenten schon ab der Konzentration 10^{-7} (g/g) signifikante Signale beobachtet. Bei den Abendpfauenaugen wurde keine Dosis-Antwort-Kurve erstellt, da nur bei etwa 8% der EAD Messungen eine Reaktion zu sehen war. Obwohl ein so geringer

Anteil der Population eine elektrophysiologische Reaktion zeigte, wirkte Hexenylacetat auf beide Geschlechter des Abendpfauenauges attraktiv. Für Gabelschwanz-Weibchen war der Geruch neutral und für Männchen wirkte er repellent.

(Z)-3-Hexen-1-yl-acetat gehört zu den typischen Grünblattdüften und wurde mit unterschiedlichen Quantitäten in allen Duftproben gefunden. Bei den Zitterpappeln waren höhere Emissionen zu finden. Man konnte nur bei den Zitterpappeln signifikant größere Stoffmengen in der schattigen Exposition nachweisen. Die Falter reagierten fast immer auf diesen Stoff und die Wahrnehmbarkeitsgrenze der Weibchen lag für das Abendpfauenauge bei 10^{-7} (g/g) und für den Gabelschwanz bei 10^{-6} (g/g). Auf das Verhalten hatte dieser Stoff aber nur in einem Fall eine negative Wirkung auf das Weibchen des Abendpfauenauges (Tabelle 3.1). An diesem Beispiel kann man sehr gut erkennen, dass eine konstante und starke Reaktion in den EAD Messungen nicht unbedingt eine verhaltensmodifizierende Wirkung bedeutet.

(Z)-3-Hexen-1-ol ist ein weiterer Grünblattduft der in allen Duftproben vorhanden war. Eine vorläufige Analyse deutete auf keine quantitativen Unterschiede hin, deswegen wurden die Substanz nicht mittels Single Ion Analyse ausgewertet. Dieser Stoff wird von sehr vielen Insektenarten wahrgenommen (Käfer, Falter, Wespen...) und wird häufig als positive Kontrolle verwendet um die Fitness der Insektenantenne zu testen. Auch bei den Tests an den Abendpfauenaugen und den Gabelschwänzen wurde vor jedem EAD Durchlauf die Antwort auf (Z)-3-Hexen-1-ol geprüft. Im EAG konnte man bei beiden Arten eine sehr hohe Empfindlichkeit (10^{-7} g/g) nachweisen. (Z)-3-Hexen-1-ol war im Verhaltenstest für Gabelschwanz Männchen und für Abendpfauenaugen Weibchen attraktiv.

Nonanal kam in Duftproben aller Expositionsvarianten vor aber bei den Zitterpappeln in signifikant höherer Menge. Es konnten keine Unterschiede zwischen den Expositionen nachgewiesen werden. In den EAD-Messungen wurde Nonanal fast immer wahrgenommen (von beiden Geschlechtern beider Arten). Die Abendpfauenaugen konnten es in der Konzentration 10^{-5} (g/g) und die Gabelschwänze in der Konzentration 10^{-7} (g/g) riechen. Eine attraktive Wirkung wurde bei allen außer beim Gabelschwanz Männchen beobachtet.

2-Ethyl-1-hexanol kommt auch in allen Duftproben vor aber man konnte hier keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen feststellen. In den EAD Messungen konnte man bei den Gabelschwänzen eine ähnliche Tendenz wie beim Benzylalkohol beobachten, nämlich dass Männchen häufiger als Weibchen reagierten. Bei den Abendpfauenaugen haben nur weibliche Tiere den Stoff gerochen. In den EAG Experimenten zeigte sich, dass weibliche Abendpfauenaugen wesentlich empfindlicher (10^{-7} g/g) als weibliche Gabelschwänze (10^{-4}

g/g) auf diesen Stoff reagieren und signifikante Antworten geben. Im Verhaltensversuch war dieser Duft bei beiden Geschlechtern des Abendpfaueauges attraktiv. Möglicherweise lag es an der Konzentration, die zu gering für den Gabelschwanz war. Die verwendete Paraffinlösung hatte zwar eine Konzentration 10^{-3} (g/g), aber im Versuchskäfig verdünnt sich der Duftstoff schnell auf Konzentrationen unter der Wahrnehmungsschwelle. Für den Gabelschwanz kann dieser Stoff allenfalls bei der Nahorientierung eine Rolle spielen.

Decanal ist ein Stoff der auf Abbauprozesse der Zellen hinweist. Er wurde in allen Duftproben gefunden. Das heißt, dass gewissen Verbräunungsprozesse überall vorhanden waren. Bei den Zitterpappeln waren signifikant höhere Mengen von Decanal vorhanden. Die Exposition hatte in diesem Fall kein Einfluss auf die Duftstoffquantität. In den EAD Messungen reagierten bei beiden Falterarten nur die Weibchen. Dosis-Antwort-Kurven waren sehr unterschiedlich. Der Gabelschwanz hat den Stoff erst bei einer sehr stark konzentrierten Dosis von 10^{-1} (g/g) wahrgenommen. Dies deutet auf eine Nutzung des Stoffes zur Nahbereichsorientierung hin. Das Abendpfaueauge zeigte signifikante Reaktionen bei der Konzentration 10^{-5} (g/g), also auch deutlich später als bei den anderen Duftstoffen. Erstaunlicherweise war Decanal für alle außer für die Gabelschwanzmännchen attraktiv. Diese Inkonsistenz der Ergebnisse kann möglicherweise auf extreme Unterschiede innerhalb der Population zurückgeführt werden.

Methylsalicylat ist eine bekannte Kommunikationschemikalie, die vor allem von Pflanzen in Stresssituationen emittiert wird. Sie wurde in den meisten Proben gefunden aber die quantitative Analyse zeigte extrem hohe Werte bei den Zitterpappeln aus der sonnigen Exposition. Weiden enthielten deutlich weniger MeSa als Pappeln. Im EAD haben beim Gabelschwanz nur die Weibchen reagiert. Bei den Abendpfaueaugen haben beide Geschlechter reagiert, die Männchen aber häufiger als die Weibchen. Beide Arten zeigten sehr hohe Empfindlichkeiten in den Dosis-Antwort-Analysen. (Abendpfaueauge beim 10^{-6} g/g, Gabelschwanz beim 10^{-7} g/g). Verhaltenstechnisch waren die Reaktionen sehr inhomogen- von attraktiv über neutral bis repellent. Gabelschwanz Weibchen wurden von Methylsalicylat angelockt. Es deckt sich mit der Habitatpräferenz des Gabelschwanzes, da er gerne trockene Zitterpappelgebiete mit hohen MeSa Emissionen bevorzugt. Dort entwickeln sich auch die Larven am besten. Etwas überraschend war, dass die Gabelschwanz Männchen vom Methylsalicylat abgeschreckt wurden. Möglicherweise orientiert sich das Männchen mehr an den Pheromonen der Weibchen und weniger an dem Habitatduft. Für Abendpfaueaugenweibchen war der Duft von Methylsalicylat unattraktiv, was auch logisch nachvollziehbar war. Die Abendpfaueaugen bevorzugten eher feuchte Weiden Habitate und

jegliche Zeichen von Trockenstress sind für sie ein negatives Signal. Dank der Wahrnehmung von Methylsalicylat können Insekten Informationen über die Gesundheits- und Fitnesssituation der Bäume gewinnen. Wie sie diese Informationen interpretieren hängt nicht nur von der Insektenart, sondern auch von anderen Zusatzparametern, wie z.B. die Anwesenheit anderer Duftstoffe, ab.

Benzylalkohol wurde in allen vier Pflanzengruppen nachgewiesen. Zwischen den beiden Baumarten konnte man keine signifikanten Unterschiede beobachten. Jedoch gab es Differenzen zwischen den sonnigen und den schattigen Expositionen der Salweiden. Die schattigen Pflanzen emittierten mehr Benzylalkohol. Die beiden Falterarten haben elektrophysiologische Reaktionen auf diesen Stoff gezeigt. Vor allem die Gabelschwänze reagierten sehr häufig (bei 50-75% der EAD Messungen) darauf. Bei den Abendpfaunaugen konnten nur bei den Weibchen häufige Reaktionen nachweisen werden. Der Stoff wurde schon bei einer Konzentration von 10^{-7} (g/g) gerochen. Bei den Verhaltensversuchen war Benzylalkohol für beide Geschlechter des Abendpfaunauges und für Gabelschwanz Weibchen attraktiv.

4 Zusammenfassung

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Klärung von Fragen der Grundlagenforschung wie z.B. welche Stoffe vom Gabelschwanz und Abendpfaunauge wahrgenommen werden und welche Auswirkung diese auf deren Verhalten haben. Es wurde auch untersucht welchen Einfluss die Futterqualität (Baumart) und der Fraßort (Exposition) auf die Raupenentwicklung haben. Dieses Vorwissen bildet eine Basis für das Untersuchen weiterer Zusammenhänge, wie z.B. ob der Fraßort der Raupe die Selektivität der weiblichen Falter beim Eiablageverhalten beeinflusst.

Das Abendpfaunauge und der Gabelschwanz gehören zu den oligophagen Waldrandbewohnern. Das Abendpfaunauge bevorzugt freistehende Weidenbüsche und Bäume an sonnigen, warmen, eher feuchten Stellen wie Fluss- und Teichufern (Ebert et al., 1994; Weidemann und Köhler, 1996). Der Große Gabelschwanz präferiert dagegen sonnenexponierte Waldränder mit Zitterpappeln und Salweiden Jungwuchs (Ebert et al., 1994). Die Wirtsfindung beider Arten basiert auf dem olfaktorischen Sinn. Dank der Wahrnehmung eines breiten Volatilspektrums haben sie die Möglichkeit, nicht nur deren zahlreiche Wirtspflanzen voneinander zu unterscheiden sondern auch deren Fitness zu erkennen. Sowohl überall vorhandene Grünblattdüfte (z.B. (Z)-3-Hexen-1ol) als auch hoch

spezifische Stressmarker (z.B. Methylsalicylat) werden von den Imagines wahrgenommen. Jedoch unterscheiden sich die beiden Arten in der Empfindlichkeit und in der verhaltensbiologischen Reaktion auf die unterschiedlichen Duftstoffe. Zwei unterschiedliche Insekten, die die gleichen Wirtspflanzen besiedeln, können unterschiedliche chemische Mechanismen für die Identifizierung nutzen (Juniper und Southwood, 1986).

Es wurden geschlechtsspezifische Unterschiede im Geruchssinn der Falter festgestellt. Nur weibliche Abendpfaunaugen haben im EAD Versuch auf Methylpalmitat, Benzylalkohol, Decanal und 2-Ethyl-1-hexanol reagiert. Ausschließlich weibliche Gabelschwänze haben Methylsalicylat, 3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol, Benzaldehyd, Decanal und 3-Hexenylbutyrat gerochen.

Sieben von den EAD aktiven Stoffen ((Z)-3-Hexen-1-ol, Linalool, Benzylalkohol, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat, Nonanal, 2-Ethyl-1-hexanol und Benzaldehyd) zeigten bei den weiblichen Abendpfaunaugen schon in der niedrigsten Konzentration 10^{-7} (g/g) eine signifikante Reaktion. Diese Stoffe können also der weiträumigen Orientierung dienen. Methylsalicylat wurde ab einer Konzentration von 10^{-6} (g/g) wahrgenommen. Octanal und Decanal wurden erst ab der Konzentration 10^{-5} (g/g) signifikant wahrgenommen, können somit also das Falterverhalten bei der Nahbereichsorientierung (innerhalb eines Baumes) beeinflussen.

Fünf von den EAD aktiven Stoffen (Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Linalool, Methylsalicylat und Benzylalkohol) lösten bei den weiblichen Gabelschwänzen schon in der niedrigsten Konzentration von 10^{-7} (g/g) eine signifikante Reaktion aus. Diese Stoffe können also der weiträumigen Orientierung dienen. Nonanal und 2-Ethyl-1-hexanol wurden erst in der Konzentration 10^{-4} (g/g) signifikant wahrgenommen. Deswegen können sie das Falterverhalten in der Nahorientierung (innerhalb eines Baumes) beeinflussen.

Für die weiblichen Abendpfaunaugen waren im Verhaltensversuch Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Nonanal, 2-Ethyl-1-hexanol, Decanal und Benzylalkohol attraktiv und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und Methylsalicylat waren repellent. Bei den Abendpfaunaugen Männchen waren Hexylacetat, Nonanal, 2-Ethyl-1-hexanol, Decanal und Benzylalkohol attraktiv. Kein Stoff wirkte repellent. Die Präferenzen im Verhaltensversuch deuten darauf, dass die weiblichen Abendpfaunaugen vor allem fitte, gesunde Bäume bevorzugen. Der Stressmarker Methylsalicylat wirkte sogar repellent. Beide Geschlechter reagierten mit Attraktivität auf Benzylalkohol, Decanal, 2-Ethyl-1-hexanol, Nonanal und Hexylacetat. Die Wahrnehmung von Benzylalkohol, Hexylacetat und Nonanal ermöglichen dem Falter die

Unterscheidung zwischen Salweide und Zitterpappel, da Zitterpappeln signifikant mehr von diesen Stoffen emittieren.

Interessant ist die repellente Wirkung des (Z)-3-Hexen-1-yl-acetates. Der Trockenstress führt zur Reduktion der Emission von (Z)-3-Hexen-1-yl-acetate (Paczkowska et al., 2006), aber trotzdem meiden die Weibchen Stellen mit starkem (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat Geruch. Möglicherweise ist es eine Frage der Konzentration, weil das Abendpfaueauge sehr empfindlich auf (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat reagiert (ab 10^{-7} g/g). Die Tatsache, dass der untersuchte Falter auf sieben Stoffe in der Konzentration 10^{-7} (g/g) reagiert, deutet auf seinen hoch spezialisierten und empfindlichen Geruchsinn hin.

Für weibliche Gabelschwänze waren im Verhaltensversuch Nonanal, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol attraktiv. Bei den Männchen war nur (Z)-3-Hexen-1-ol attraktiv während Hexylacetat und Methylsalicylat repellent wirkten. Man beobachtete also ein sehr unterschiedliches Verhalten zwischen den beiden Geschlechtern. Das erschwert die Interpretation der Daten. Männchen fliegen nur zu den allgemeinen Grünblattdüften ((Z)-3-Hexen-1-ol) und lassen sich von Stresssignalen (z.B. Methylsalicylat) abschrecken. Weibchen fliegen gerade zu den geschwächten Bäumen die Seneszenzmarker (Nonanal, Decanal) und Stressmarker (Methylsalicylat) emittieren. Möglicherweise sind dort die Abwehrmechanismen der Pflanze schwächer. Man vermutete auch eine bessere ernährungsphysiologische Verwertung der Blattmasse der gestressten Bäume. Diese Hypothese basierte auf der Korrelation zwischen Stressereignissen (Trockenheit, Sturm usw.) und Insektenkalamitäten (Mattson und Addy, 1975; Port und Thompson, 1980; Stoszek et al., 1981). Jedoch konnten die Experimente von Thomas und Hodkinson (1991) an Nachtfaltern diese Hypothese nicht eindeutig bestätigen.

Sowohl die Laborversuche als auch die Freilandexperimente an Abendpfaueaugen weisen darauf hin, dass die Salweide die günstigere Futterpflanze ist. Ihre Verwertung ist effizienter, da weniger Blattmasse benötigt wird um die gleichen Körpermassen zu erreichen (Kapitel VI.).

Die Laborversuche am Gabelschwanz suggerieren, dass in diesem Fall die Zitterpappel aus ernährungsphysiologischer Sicht eine bessere Futterpflanze darstellt. Ihre Verwertung ist effizienter, da weniger Blattmasse benötigt wird, um die gleichen Körpermassen zu erreichen (Kapitel V.).

Die Ergebnisse der Laborversuche entsprechen den natürlichen Habitatpräferenzen und erklären die Häufigkeit der Fundorte.

Im Freiland konnte man bei beiden Arten einen hoch signifikanten Einfluss des Standortes auf die Überlebensrate beobachten. Für Abendpfaugenaugen war der erfolgreichste Standort an Salweiden in der Sonne. Im Freilandversuch waren die Abendpfaugenaugenpuppen von den Salweidenstandorten signifikant schwerer als von den Pappelstandorten.

Für den Gabelschwanz waren die erfolgreichsten Standorte Zitterpappel-Schatten und Salweide-Sonne. Die Tatsache, dass am Standort Zitterpappel-Sonne die Verpuppungserfolgsquote relativ gering war kann man zum Teil mit hoher Aktivität der Prädatoren (Ameisen, Ohrenkneifer) erklären (Kapitel V.).

Literaturverzeichnis:

- Aichmüller, R., 1991, Aufbau reich gegliederter Waldränder. Allgemeine Forst Zeitung 46, 707-708.
- Altner, H., 1977, Insektensensillen: Bau- und Funktionsprinzipien. Verh. Dtsch.Zool.Ges., 139-153.
- Baldwin, I.T., Halitschke, R., Paschold, A., von Dahl, C.C., Preston, C.A., 2006, Volatile signaling in plant-plant interactions: "Talking trees" in the genomics era. Science 311, 812-815.
- Bernays, E.A., Chapman, R.F., 1994, Host-plant selection by phytophagous insects. Chapman and Hall, New York.
- Brilli, F., Ciccioli, P., Frattoni, M., Prestininzi, M., Spanedda, A.F., Loreto, F., 2009, Constitutive and herbivore-induced monoterpenes emitted by *Populus x euroamericana* leaves are key volatiles that orient *Chrysomela populi* beetles. Plant Cell and Environment 32, 542-552.
- Carde, R.T., Willis, M.A., 2008, Navigational strategies used by insects to find distant, wind-borne sources of odor. Journal of Chemical Ecology 34, 854-866.
- Castrejon-Gomez, V.R., Valdez-Carrasco, J., Cibrian-Tovar, J., Camino-Lavin, M., Osorio, R., 1999, Morphology and distribution of the sense organs on the antennae of *Copitarsia consueta* (Lepidoptera : Noctuidae). Florida Entomologist 82, 546-555.
- Chen, L., Fadamiro, H.Y., 2007, Differential electroantennogram response of females and males of two parasitoid species to host-related green leaf volatiles and inducible compounds. Bulletin of Entomological Research 97, 515-522.
- de Bruyne, M., Baker, T.C., 2008, Odor detection in insects: Volatile codes. Journal of Chemical Ecology 34, 882-897.
- De Moraes, C.M., Lewis, W.J., Pare, P.W., Alborn, H.T., Tumlinson, J.H., 1998, Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids. Nature 393, 570-573.
- De Moraes, C.M., Mescher, M.C., Tumlinson, J.H., 2001, Caterpillar-induced nocturnal plant volatiles repel conspecific females. Nature 410, 577-580.
- Degen, T., Buser, H.R., Stadler, E., 1999, Patterns of oviposition stimulants for carrot fly in leaves of various host plants. Journal of Chemical Ecology 25, 67-87.
- Dicke, M., Hilker, M., 2003, Induced plant defences: from molecular biology to evolutionary ecology. Basic and Applied Ecology 4, 3-14.
- Ebert, G., Hirneisen, N., Krell, F.T., Mörtter, R., Ratzel, U., Siepe, A., Steiner, A., Traub, B., 1994, Die Schmetterlinge Baden-Württenbergs, Vol 4. Eugen Ulmer, Stuttgart, 535 p.

- Forster, N., Ulrichs, C., Zander, M., Katzel, R., Mewis, I., 2008, Influence of the season on the salicylate and phenolic glycoside contents in the bark of *Salix daphnoides*, *Salix pentandra*, and *Salix purpurea*. *Journal of Applied Botany and Food Quality-Angewandte Botanik* 82, 99-102.
- Frost, C.J., Appel, M., Carlson, J.E., De Moraes, C.M., Mescher, M.C., Schultz, J.C., 2007, Within-plant signalling via volatiles overcomes vascular constraints on systemic signalling and primes responses against herbivores. *Ecology Letters* 10, 490-498.
- Frost, C.J., Mescher, M.C., Carlson, J.E., De Moraes, C.M., 2008, Why do distance limitations exist on plant-plant signaling via airborne volatiles? *Plant Signal Behav* 3, 466-468.
- Füldner, K., 2004, Eisvogel und Schillerfalter-Hinweise zum Erfassen und Schutz dieser seltenen Tagfalter an Waldmänteln. *Forst u. Holz* 59, 241-245.
- Füldner, K., Damm, M., 2002, Die Makrolepidopterenfauna der Zitterpappel (*Populus tremula* L.) in Waldmantelgesellschaften in Südniedersachsen (Lepidoptera). *Nachrichten des Entomologischen Vereins Apollo* 23 (1/2), 89-96.
- Füldner, K., Damm, M., 2003, Die Makrolepidopterenfauna der Salweide (*Salix caprea* L.) in Waldmantelgesellschaften in Südniedersachsen (Lepidoptera). *Nachrichten des Entomologischen Vereins Apollo* 24 (1/2), 65-73.
- Gatehouse, J.A., 2002, Plant resistance towards insect herbivores: a dynamic interaction. *New Phytologist* 156, 145-169.
- Harborne, J.B., 1988, *Introduction to ecological biochemistry*, 3. Edition. Academic Press, London.
- Hare, J.D., 1998, Bioassay methods with terrestrial invertebrates, In: Millar, J.G., Haynes, K.F. (Eds.) *Methods in Chemical Ecology*. Kluwer Academic Publishers, London, pp. 212-269.
- Juniper, B., Southwood, S.R., 1986, *Insects and the plant surface*. Edward Arnold, London.
- Karban, R., Baldwin, I.T., Baxter, K.J., Laue, G., Felton, G.W., 2000, Communication between plants: induced resistance in wild tobacco plants following clipping of neighboring sagebrush. *Oecologia* 125, 66-71.
- Karban, R., Huntzinger, M., McCall, A.C., 2004, The specificity of eavesdropping on sagebrush by other plants. *Ecology* 85, 1846-1852.
- Karban, R., Maron, J., 2002, The fitness consequences of interspecific eavesdropping between plants. *Ecology* 83, 1209-1213.
- Kögel, K., Achtziger, T., Blick, A., Geyer, A., Reif, A., Richert, E., 1993, Aufbau reich gegliederter Waldränder- ein E+E-Vorhaben. *Natur und Landschaft* 68, 386-394.
- Kuster, A., 1995, Anlage und Pflege von stufigen Waldränder. *Wald und Holz* 76, 14-19.
- Mattson, W.J., Addy, N.D., 1975, Phytophagous Insects as Regulators of Forest Primary Production. *Science* 190, 515-522.
- Paczkowska, M., Füldner, K., Paczkowski, S., Schütz, S., 2009, The „Length of branches with leaves (LbT)“ as a scale for leaf mass and leaf area. *Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent.* 17, 339-342.
- Paczkowska, M., Füldner, K., Weissteiner, S., Beniwal, R.S., Polle, A., Schütz, S., 2006, Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand. *Mitt. Dtsch. Ges. allg. angew. Ent.* 13, 213-217.
- Pare, P.W., Farag, M.A., Krishnamachari, V., Zhang, H.M., Ryu, C.M., Kloepper, J.W., 2005, Elicitors and priming agents initiate plant defense responses. *Photosynthesis Research* 85, 149-159.
- Pare, P.W., Tumlinson, J.H., 1999, Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiology* 121, 325-331.
- Pausas, J.G., Austin, M.P., 2001, Patterns of plant species richness in relation to different environments: An appraisal. *Journal of Vegetation Science* 12, 153-166.

- Pers, J.v.d., Otter, C.J., 1978, Single cell responses from olfactory receptors of small ermine moths (Lepidoptera: Yponomeutidae) to sex attractants. *Journal of Insect Physiology* 24, 337-343.
- Ping, L.Y., Shen, Y.B., Jin, Y.J., Hao, J.H., 2001, Leaf volatiles induced by mechanical damage from diverse taxonomic tree species. *Acta Botanica Sinica* 43, 261-266.
- Port, G.R., Thompson, J.R., 1980, Outbreaks of insect herbivores on plants along motorways in the United Kingdom. *Journal of Applied Ecology* 17, 649-656.
- Rojas, J.C., Wyatt, T.D., Birch, M.C., 2000, Flight and oviposition behavior toward different host plant species by the cabbage moth, *Mamestra brassicae* (L.) (Lepidoptera : Noctuidae). *Journal of Insect Behavior* 13, 247-254.
- Schichtl, H.M., 1992, Weiden in der Praxis. Patzer, Berlin, Hannover, 130 p.
- Schneider, D., 1970, Molekulare Grundlagen der chemischen Sinne bei Insekten. *Naturwissenschaften* 58, 194-200.
- Schütz, S., Weissbecker, B., Hummel, H.E., Apel, K.H., Schmitz, H., Bleckmann, H., 1999, Insect antenna as a smoke detector. *Nature* 398, 298-299.
- Schütz, S., Weissbecker, B., Klein, A., Hummel, H.E., 1997, Host plant selection of the Colorado potato beetle as influenced by damage induced volatiles of the potato plant. *Naturwissenschaften* 84, 212-217.
- Shulaev, V., Silverman, P., Raskin, I., 1997, Airborne signalling by methyl salicylate in plant pathogen resistance. *Nature* 385, 718-721.
- Smid, H.M., van Loon, J.J.A., Posthumus, M.A., Vet, L.E.M., 2002, GC-EAG-analysis of volatiles from Brussels sprouts plants damaged by two species of *Pieris* caterpillars: olfactory receptive range of a specialist and a generalist parasitoid wasp species. *Chemoecology* 12, 169-176.
- Stadler, E., Buser, H.R., 1984, Defense chemicals in leaf surface wax synergistically stimulate oviposition by a phytophagous insect. *Experientia* 40, 1157-1159.
- Staudt, M., Bertin, N., Frenzel, B., Seufert, G., 2000, Seasonal variation in amount and composition of monoterpenes emitted by young *Pinus pinea* trees - Implications for emission modeling. *Journal of Atmospheric Chemistry* 35, 77-99.
- Stoszek, K.J., Mika, P.G., Moore, J.A., Osborne, H.L., 1981, Relationships of Douglas-fir tussock moth defoliation to site and stand characteristics in Northern Idaho Forest Science 27, 431-442.
- Takabayashi, J., Noda, T., Takahashi, S., 1991, Plants produce attractants for *Apanteles kariyai*, a parasitoid of *Pseudaletia separata* - cases of communication and misunderstanding in parasitoid-plant interactions. *Applied Entomology and Zoology* 26, 237-243.
- Tholl, D., Boland, W., Hansel, A., Loreto, F., Roöse, U.S.R., Schnitzler, J.-P., 2006, Practical approaches to plant volatile analysis. *The Plant Journal* 45, 540-560.
- Thomas, A.T., Hodkinson, I.D., 1991, Nitrogen water-stress and the feeding efficiency of lepidopteran herbivores. *Journal of Applied Ecology* 28, 703-720.
- Tidow, S., Schütz, M., Krüsi, B.O., 1997, Probleme bei der Bewertung und Pflege von Waldränder. *Inf. Bl. d. Forsch. Bereiches Landschaft WSL* 33.
- Turlings, T.C.J., Alborn, H.T., Loughrin, J.H., Tumlinson, J.H., 2000, Volicitin, an elicitor of maize volatiles in oral secretion of *Spodoptera exigua*: Isolation and bioactivity. *Journal of Chemical Ecology* 26, 189-202.
- Turlings, T.C.J., Tumlinson, J.H., Heath, R.R., Proveaux, A.T., Doolittle, R.E., 1991, Isolation and identification of allelochemicals that attract the larval parasitoid, *Cotesia marginiventris* (Cresson), to the microhabitat of one of its hosts. *Journal of Chemical Ecology* 17, 2235-2251.
- Turlings, T.C.J., Tumlinson, J.H., Lewis, W.J., 1990, Exploitation of herbivore-induced plant odors by host-seeking parasitic wasps. *Science* 250, 1251-1253.

- Ulland, S., Ian, E., Stranden, M., Borg-Karlson, A.K., Mustaparta, H., 2008, Plant volatiles activating specific olfactory receptor neurons of the cabbage moth *Mamestra brassicae* L. (Lepidoptera, Noctuidae). *Chemical Senses* 33, 509-522.
- Weidemann, H.J., Köhler, J., 1996, *Nachtfalter, Spinner und Schwärmer*. Naturbuch Verlag, Augsburg.

Abstract

Waldränder zeigen eine strukturelle Diversität die mit hoher Artendiversität zusammenhängt. Es wurde auch festgestellt, dass nicht jeder Waldrand dem anderem gleich ist, denn ob sonnig oder schattig-, nord- oder süd- exponiert, verändern sich die mikroklimatischen Bedingungen. Bäume werden von zahlreichen Insektenarten als Nahrung und Lebensraum genutzt, wobei unterschiedliche Expositionen eine Rolle bei der Habitatfindung spielen. Eine wichtige Insektengruppe sind hier die Schmetterlinge. Auf Grund der Voruntersuchung von Damm, 2003 an waldrandbesiedelten Lepidopteren wurden zwei Falterarten, das Abendpfauenauge *Smerinthus ocellatus* L. und der Große Gabelschwanz *Cerura vinula* L. für weitere chemoökologische Studien der Wahrnehmung und des Verhaltens ausgewählt. Es sollte der Mechanismus der Habitat- und Wirtspflanzenfindung erklärt werden.

Für die Verbesserung der Quantifizierung der Blattmasse wurde die LbT-Methode (Länge der beblätterten Triebe) optimiert und angewendet. Die Duftproben wurden von Bäumen an unterschiedlich exponierten Waldrändern und im Gewächshaus mit der CLSA-Methode genommen und mit dem Gaschromatograph mit gekoppeltem Massenspektrometer analysiert. Weiterhin wurden elektrophysiologische Signale der Insektenantennen auf chromatographisch getrennten Duftmustern abgeleitet (EAD). Ausgewählte Duftstoffe wurden anschließend in Paraffinverdünnungsreihen untersucht (EAG), um herauszufinden, ab welcher Konzentration sie wahrgenommen werden. Anschließend wurden Verhaltensversuche an Imagines und an Larven von Abendpfauenaugen mit ausgewählten Einzelsubstanzen durchgeführt. Parallel wurde die Entwicklung der Larven in Abhängigkeit von Waldrandstrukturparametern und Futterqualität im Freiland und im Labor untersucht.

Die Duftmuster der untersuchten Pappeln und Weiden bestehen aus über 200 Einzelsubstanzen. Der Überlappungsbereich der einzelnen Duftstoffe (Beta-Diversität) zwischen untersuchten Salweiden und Zitterpappel liegt bei 0,5, also ist etwa die Hälfte der Substanzen gleich und die andere Hälfte artspezifisch. Es wurden tageszeit- und saisonbedingte Unterschiede festgestellt. Auch die Kondition der Pflanze beeinflusst ihr Duftmuster (s. Kapitel IV). Einer der Markersubstanzen war hier (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat. Die Menge dieses Stoffes nahm unter Stressbedingungen ab. Ein weiterer Stressmarker war Methylsalicylat (s. Kapitel III). Dieser Stoff wurde bei Stress vermehrt emittiert.

Im EAD Versuch konnten 22 elektrophysiologisch aktive Stoffe für den Gabelschwanz und 28 für das Abendpfaueauge ausgewählt werden (s. Kapitel V und VI). Auch hier war der Überlappungsbereich relativ groß (16 Stoffe wurden von beiden Arten wahrgenommen). Man konnte sowohl geschlechtsspezifische als auch individuelle Unterschiede feststellen.

Beide Falterarten zeigten einen sehr sensiblen Geruchssinn. Viele Stoffe konnten in den niedrigsten der getesteten Konzentrationen (10^{-7} in Paraffinöl) wahrgenommen werden. Unter anderem waren es auch die Substanzen deren Emissionen expositions- oder konditionsabhängig waren (Methylsalicylat, (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat).

Für die weiblichen Abendpfaueaugen waren im Verhaltensversuch Hexylacetat, (Z)-3-Hexen-1-ol, Nonanal, 2-Ethyl-1-hexanol, Decanal und Benzylalkohol attraktiv und (Z)-3-Hexen-1-yl-acetat und Methylsalicylat waren repellent. Bei den Männchen des Abendpfaueauges waren Hexylacetat, Nonanal, 2-Ethyl-1-hexanol, Decanal und Benzylalkohol attraktiv. Für weibliche Gabelschwänze waren im Verhaltensversuch Nonanal, Decanal, Methylsalicylat und Benzylalkohol attraktiv. Bei den Männchen war nur (Z)-3-Hexen-1-ol attraktiv während Hexylacetat und Methylsalicylat repellent wirkten. Die Ergebnisse zeigten, dass beide Arten mit Hilfe ihrer olfaktorischen Sinnesorgane potentiell nicht nur die Baumart, sondern auch die Exposition und die Kondition der Bäume wahrnehmen können.

Die Versuche mit den Larvalstadien beider Arten zeigten, dass für das Abendpfaueauge Salweide und für den Gabelschwanz die Zitterpappel günstiger ist.

In Gewächshausversuchen zeigten das adulte Abendpfaueauge die Tendenz zu eher feuchten, halbschattigen oder sonnigen Expositionen überwiegend an Weiden und der adulte Große Gabelschwanz eine Tendenz zu sonnig exponierten Pappeln. Das Verhalten der Imagines war oft nicht eindeutig und weiterhin ist es nicht geklärt warum beide Geschlechter auf den Habitatduft recht unterschiedlich reagieren. Es verbleibt auch noch die Vermutung, dass der Standort an dem die Larven aufwachsen die olfaktorische Wahrnehmung und das Verhalten der Imagines beeinflussen kann. Dies würde ein Teil der individuellen Variabilität erklären. Um dies zu bestätigen sind weitere Versuche notwendig.

Abstract

Forest margins show a high structural diversity, which is correlated to high species diversity. The microclimatic conditions of forest margins depend on their exposition and the availability of sunlight; therefore forest margins show differences between each other. The exposition influences the insect species composition living there. An important order of insects living in forest margins are Lepidoptera. According to a previous study on forest margins by Damm

(2003), two Lepidoptera species (*Smerinthus ocellatus* L. and *Cerura vinula* L.) were selected for further chemoeological studies, in order to investigate the mechanisms of habitat- and host plant finding.

The LbT-method (length of branches with leaves) was optimized and applied for these studies. Furthermore, odors of forest margin trees with different expositions were sampled by the CLSA method and analyzed by GC-MS. Electrophysiological signals were recorded on fractionized odor samples (GC-MS/EAD). Selected odors were tested in paraffin oil dilutions on the antennae of the two butterfly species, in order to find the species specific detection threshold. Behavioral studies on imagines and larvae were performed. The development of the larvae was investigated in dependence of forest margin parameters and nutrition quality in the field and in the lab.

The volatile pattern of the sampled poplar and willow branches consist of more than 200 compounds. The beta-diversity was around 0.5, which shows that 50% of the volatiles were emitted by both trees and 50% were species specific. The volatile pattern depended on the day time and the season. The condition of the plant influences the volatile pattern (chapter IV). Under stress, the marker compound (Z)-3-hexen-1-yl-acetate was emitted in lower concentration and methylsalicylate was emitted in higher concentrations (chapter III). The EAD studies led to a selection of 22 electrophysiological active compounds for *Smerinthus ocellatus* and 28 for *Cerura vinula* (chapter V and VI). 16 compounds were detected by both species. Differences in the volatile detection depended on species and sex. Both species had a very sensitive sense of olfaction. Several compounds were detected at a concentration of 10^{-7} in paraffin oil, especially the marker compounds for exposition and condition (methylsalicylate and (Z)-3-hexen-1-yl-acetate). In the behavioral studies, female *Smerinthus ocellatus* were attracted by hexylacetate, (Z)-3-hexen-1-ol, nonanal, 2-ethyl-1-hexanol, decanal, and benzylalcohol, while (Z)-3-hexen-1-yl-acetate and methylsalicylate were repellent. Males were attracted by hexylacetate, nonanal, 2-ethyl-1-hexanol, decanal, and benzylalcohol. Female *Cerura vinula* were attracted by nonanal, decanal, methylsalicylate, and benzylalcohol. Males were attracted by (Z)-3-hexen-1-ol and repelled by hexylacetate and methylsalicylate. These results indicate that both species are able to identify species, exposition, and condition of their host plants. Studies on the feeding of larvae showed that *Smerinthus ocellatus* showed increased growth on leaves from *Salix caprea*, and *Cerura vinula* showed increased growth on leaves from *Populus tremula*. Host plant choice tests with adult individuals showed that *Smerinthus ocellatus* slightly prefers moist and partially shaded or sunny expositions of *Salix caprea* and *Cerura vinula* slightly prefers *Populus tremula* with sunny exposition. However, the behavior of the

imagines showed only tendencies and the reason for their differing behavior remains unclear. The hypothesis remains that the exposition during the larval development influences the olfaction of the imago and, in consequence, the behavior of the imago. In order to confirm this hypothesis, further studies have to be performed.

Veröffentlichungen:

1. PACZKOWSKI, S., PACZKOWSKA, M., DIPPEL, S., FLEMATTI, G. & SCHÜTZ, S.
“Volatile combustion products of wood attract *Acanthocnemus nigricans*
(Coleoptera: Acanthocnemidae)” beim Journal of Insect Behavior, accepted with
major revisions (10.2011)
2. PACZKOWSKI, S., PACZKOWSKA, M., MAIBAUM, F. & SCHÜTZ, S. "Decaying
mouse volatiles perceived by *Calliphora vicina* Rob.-Desv." Journal of Forensic
Science, angenommen am 02.08.2011
3. PACZKOWSKA, M., RACHOW, C. & SCHÜTZ, S.: Electrophysiological reaction and
behavioural response of the oligophagous moths *Smerinthus ocellatus* and *Cerura
vinula* towards methyl salicylate and other host plant odors. Mitteilungen der
Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie (angenommen
im 12.2011)
4. PACZKOWSKA, M., FÜLDNER, K., PACZKOWSKI, S. & SCHÜTZ, S. The „Length of
branches with leaves (LbT)“ as a scale for leaf mass and leaf area. Mitteilungen
der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie: Band
17[2009] (339-342).
5. PACZKOWSKA, M., FÜLDNER, K., WEISSTEINER, S., BENIWAL, R.S., POLLE, A. &
SCHÜTZ, S.: Die Rolle des Pappelgeruchs für Schmetterlinge am Waldrand,
Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte
Entomologie: Band 15[2005].2006 (213-217).

Lebenslauf



Persönliche Angaben

Name: Marta Paczkowska
 Geburtsdatum: 24. Juni 1980
 Geburtsort: Warschau
 Familienstand: verheiratet, 2 Kinder (2005, 2007)
 Staatsangehörigkeit: polnisch

Ausbildung

28.02.2012 Rigorosum an der Georg-August-Universität Göttingen
 1.06.2005- 31.05.2009 Stipendiatin des Cusanuswerks- Promotionsförderung, Arbeit an der Promotion zum Thema: „Olfaktorische Habitatfindung ausgewählter Macrolepidopteren (*Smerinthus ocellatus* und *Cerura vinula*) an Salweide und Zitterpappel in Waldmantelgesellschaften“
 01.07.2004 Magisterprüfung
 Magisterarbeit zum Thema: „Pholiophage Insekten der Familie *Chrysomelidae* in einem Naturschutzreservat Skarpa Ursynowska in Warschau“ am Institut für Waldschutz und Ökologie
 10.2002-08.2003 Erasmus Auslandsaufenthalt an der Georg-August-Universität Göttingen
 1999- 2004 Studium der Forstwissenschaften an der Warschauer Agrikulturellen Universität (Landwirtschaftshochschule) (Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie)
 28.05.1999 Schulabschluss- Abitur
 1995-1999 Oberschule XLIX L.O. (Lyzeum) J.W. Goethe in Warschau
 1987-1995 Grundschule Nr. 69 in Warschau

Arbeitsverhältnisse:

Ab 01.10.2011 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden Württemberg in Freiburg- Projektleitung, Projekt: Gravierende neue Erkrankungen an Weisstannen.
 01.06.2009-30.09.2011 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der an der Georg-August-Universität Göttingen, Büsgen Institut, Abteilung Forstzoologie und Waldschutz-Projekt BIOHOT.
 2004 -2008 Tätigkeit in dem Waldbau Institut (Universität Warschau)- Übersetzung wissenschaftlicher Texte zum Thema Eichen- und Fichtenverjüngung.
 01.11.2004-31.05.2005 Angestellte an der Universität Göttingen-Institut für Forstzoologie und Waldschutz- als wissenschaftliche Hilfskraft mit dem Aufgabenbereich: Unterstützung des wissenschaftlichen Personals in Forschung und Lehre
 09-10.2004 Werkvertrag an der Universität Göttingen- Arbeit zum Thema: Quantifizierung von Blattmasse unterschiedlicher Waldmantelbaumarten.

01-31.08.2003 Arbeit in dem Institut für Forstzoologie und Waldschutz (Georg-August-Universität Göttingen) als studentische Hilfskraft.

Lehrtätigkeiten

SoSe 2011 Waldfauna-Seminar- 2. Semester Master
 01.2010 und 2011 Winterbodensuche Exkursion, Organisation und Durchführung
 2007-2011 Forstzoologie Grundvorlesung Bachelor (1. und 2. Semester)
 Themen: Systematik; Insektenordnungen; Bäume im urbanem
 Raum; Schädlinge an Samen und Zapfen
 2007-2011 Insektenbestimmungskurse Bachelor 2. Semester
 06-07.2009 und 2010 Methodenpraktikum Master 2. Semester (Fangmethoden,
 Insektenmonitoring, Bodenfauna)
 WiSe 2009/2010 und Biodiversitätseminar Master 3. Semester,
 WiSe 2010/2011 Seminar- Messung der Biodiversität, Master 3.Semester
 WiSe 2010/2011

Tagungen

21.03-24.03.2011 Entomologentagung DGaaE in Berlin. Poster zum Thema:
 “High sensitivity of the oligophagous moths *Smerinthus*
ocellatus and *Cerura vinula* towards host plants odors”
 04.2010 Workshop in Torun (Polen) „Forensically important Diptera:
 identification workshop“
 01.2010 Evaluationstagung „Elternschaft in der Wissenschaft,
 Wissenschaft und Familie im interdisziplinären und
 intergenerationellen Dialog“ in Hannover, ein Vortrag.
 07.2009 Sommerakademie in St. Marienthal “Familiengerechte
 Umweltwissenschaften” (Vortrag, Poster)
 03.2009 Entomologentagung DGaaE in Göttingen. Vortrag zum Thema:
 The „Length of branches with leaves (LbT)“ as a scale for leaf
 mass and leaf area.
 21.03-24.03.2005 Entomologentagung DGaaE in Dresden. Poster zum Thema:
 “The role of the poplar’s volatiles for the butterflies of the forest
 margin”

Betreute Studentenarbeiten

Bachelor: Helena Lippe 2006
 Christine Rachow 2007
 Mario Desgronte 2008
 Tim Schepanek 2009
 Master: Diana Schwarzentraub 2008
 Christine Rachow 2010
 Projekt: David Kopetsch 2006
 Annamaria Polatzek 2007

Sonstiges

06.2011 Führerschein Klasse B
 06.2011-08.2011 Photoshop-Kurs
 04.2007-04.2011 GIS-Kurs
 Dezentrale Gleichstellungsbeauftragte der
 Forstwissenschaftlichen Fakultät, (eigene Initiativprojekte:
 Spielplätze am Nordkampus, Eltern-Kind-Raum).

| | |
|---------|--|
| Ab 2008 | Mitgliedschaft in der Deutsch-Polnischen Gesellschaft. |
| Ab 2005 | Mitgliedschaft im BDF (Bund Deutscher Forstleute), Organisation von Exkursionen |
| 02.2004 | Staatsprüfung in Deutsch: „Zentrale Oberstufenprüfung“ |
| 07.2002 | Praktikum im Oberforstamt Płock |
| 08.2001 | Teilnahme einem Forschungsprojekt des Botanisches Institut im Sudetenland |

Veröffentlichungen

PACZKOWSKA, M., RACHOW, C. & SCHÜTZ, S.:
Electrophysiological reaction and behavioural response of the
oligophagous moths *Smerinthus ocellatus* and *Cerura vinula*
towards methyl salicylate and other host plant odors.
Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und
angewandte Entomologie, angenommen im 12.2011.

PACZKOWSKI, S., PACZKOWSKA, M., DIPPEL, S., FLEMATTI, G. &
SCHÜTZ, S. "Volatile combustion products of wood attract
Acanthocnemus nigricans (Coleoptera: Acanthocnemidae)"
Journal of Insect Behavior, accepted with major revisions
10.2011.

PACZKOWSKI, S., PACZKOWSKA, M., MAIBAUM, F. & SCHÜTZ, S.
"Decaying mouse volatiles perceived by *Calliphora vicina*
Rob.-Desv." Journal of Forensic Science, angenommen im
08.2011.

PACZKOWSKA, M., FÜLDNER, K., PACZKOWSKI, S. & SCHÜTZ, S.
The „Length of branches with leaves (LbT)“ as a scale for leaf
mass and leaf area. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für
allgemeine und angewandte Entomologie: Band 17[2009]. (339-
342)

PACZKOWSKA, M., FÜLDNER, K., WEISSTEINER, S., BENIWAL, R.S.,
POLLE, A. & SCHÜTZ, S.: Die Rolle des Pappelgeruchs für
Schmetterlinge am Waldrand, Mitteilungen der Deutschen
Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie:
Band 15[2005].2006 (213-217).

Sprachkenntnisse

polnisch - Muttersprache,
deutsch - fließend,
englisch - sehr gut,
schwedisch - Grundkenntnisse

Hobby

Tanzen, Malen, Fotografieren