

Flug- und Ausbreitungsverhalten von Bockkäfern der Gattung *Monochamus*

Masterarbeit

im Rahmen des Studiums Forstwissenschaften
eingereicht von

Eva Maria Vorwagner, BSc

Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz

Department für Wald und Bodenwissenschaften

Universität für Bodenkultur Wien

Betreuer: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Hoch

Wien, September 2015

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich beim Verfassen der vorliegenden Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

In erster Linie danke ich Priv.-Doz. DI Dr. Gernot Hoch (BFW) für die Ermöglichung und Betreuung der Masterarbeit. Er war bei Fragen stets erreichbar, hat mich während des gesamten Prozesses fachlich unterstützt und so manche Schwierigkeit lösbar gemacht. Ihm hab ich es zu verdanken, dass mein Interesse im Bereich der Entomologie und des Forst- und Waldschutzes weiter gewachsen ist. Ebenso danke ich Diana Mittermayr (BFW) für die Einschulung in die richtige Handhabung der Bockkäfer. Ein großer Dank gebührt dem Bundesforschungszentrum für Wald, das mir die erforderlichen Laborräume und Materialien zur Verfügung gestellt und damit die vorliegende Arbeit erst ermöglicht hat.

Mein besonderer und tiefer Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern Alois und Zázilia danke ich für die Ermöglichung dieses Studiums und dafür, dass sie mich stets in all meinen Entscheidungen unterstützen. Danke auch an meine Brüder Alois und Harald, welche mir viel Kraft gegeben haben dieses Studium zu Ende zu bringen.

Für die Hilfe beim Fang von Käfern für meine Versuche möchte ich mich bei Michael Maunz und Stefan Hampel bedanken.

Schließlich möchte ich mich noch bei meinen Freunden und Studienkollegen für die schöne Zeit in Wien und an der BOKU bedanken. Vor allem Katrin Windisch und Sarah Becker habe ich es zu verdanken, dass so manche Projekte und Prüfungen angenehm verlaufen sind.

Katrin und ihrem Bruder Michael Windisch gebührt letztlich ein großer Dank für das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Kurzfassung

Langhornböcke der Gattung *Monochamus* sind Überträger des Kiefernholznematoden (*Bursaphelenchus xylophilus*) in allen Gebieten seines Vorkommens. Monitoring und effektive Bekämpfung der durch den Nematoden ausgelösten Kiefernwelke benötigen präzise Daten über das Flug- und Ausbreitungsverhalten der Vektoren. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden mittels Flugmühlen die Flugparameter Flugdistanz, Flugdauer und Fluggeschwindigkeit für *Monochamus sartor* und *M. sutor* ermittelt. Von den getesteten *M. sartor* absolvierten 59,3% zumindest einen Flug > 3 min an der Flugmühle. Bei *M. sutor* lag dieser Anteil bei 44,4%. *M. sartor* legte pro Flug im Mittel 670 ± 82 m (Weibchen) bzw. 810 ± 97 m (Männchen) zurück, die mittlere Flugdauer betrug $15,86 \pm 1,43$ min (W) bzw. $16,00 \pm 1,32$ min (M) und die mittlere Geschwindigkeit $0,79 \pm 0,07$ m/s (W) bzw. $0,88 \pm 0,12$ m/s (M). *M. sutor* erreichte pro Flug im Mittel 482 ± 176 m (W) bzw. 1433 ± 599 m (M), in $10,39 \pm 3,58$ min (W) bzw. $21,97 \pm 7,45$ min (M) und mit einer Geschwindigkeit von $0,79 \pm 0,07$ m/s (W) bzw. $0,94 \pm 0,19$ m/s (M). Zusätzlich wurden morphologische Käfermerkmale wie Käfergröße und Elytrenlänge als Einflussfaktoren auf die Flugleistung untersucht, sowie die Auswirkungen von Raumtemperatur und Außenwetter auf das Flugverhalten analysiert.

Schlagwörter: *Monochamus sartor*, *M. sutor*, Flugparameter, Flugmühle, Kiefernwelke,

Abstract

Longhorn beetles of the genus *Monochamus* are vectors of the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) throughout its range. Monitoring and effective control of pine wilt disease, which is caused by the nematode, requires precise information about flight- and dispersal behaviour of the vectors. The aim of this study is to provide flight parameters, such as flight distance, duration and flight speed of *M. sartor* and *M. sutor* by using flight mills. Of all tested *M. sartor* 59.3% performed at least on extended flight > 3 min on the flight mill. For *M. sutor* this proportion was 44.4%. Mean distance travelled by *M. sartor* per flight was 670 ± 82 m (female) and 810 ± 97 m (male), respectively. Flight duration was 15.86 ± 1.43 min (f) and 16.00 ± 1.32 min (m), flight speed was 0.79 ± 0.07 m/s (f) and 0.88 ± 0.12 m/s (m), respectively. *M. sutor* travelled 482 ± 176 m (f) and 1433 ± 599 m (m), respectively, per flight. Duration was 10.39 ± 3.58 min (f) and 21.97 ± 7.45 min (m), flight speed was 0.79 ± 0.07 m/s (f) and 0.94 ± 0.19 m/s (m), respectively. In addition, morphological characteristics such as the beetle size and the length of the elytra were examined as factors influencing flight performance; also the effects of ambient temperature and the outside weather on the flight behaviour were analysed.

Keywords: *Monochamus sartor*, *M. sutor*, flight parameter, flight mill, pine wilt disease

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	2
Kurzfassung	3
Abstract.....	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung.....	6
2 Stand des Wissens.....	7
2.1 Die Kiefernwelke	7
2.1.1 Geschichtlicher Verlauf.....	7
2.1.2 Modellierung der Krankheitsausbreitung - Toolkit REPHRAME	8
2.1.3 Kiefernholznmatoide (<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>).....	10
2.1.4 Wirtspflanzen.....	13
2.1.5 EU-Projekte und Schutzmaßnahmen.....	13
2.1.6 Schutzmaßnahmen in Österreich	14
2.2 <i>Monochamus</i> spp.	15
2.2.1 <i>Monochamus sartor</i> (Schneiderbock)	16
2.2.2 <i>Monochamus sutor</i> (Schusterbock)	17
2.2.3 <i>Monochamus galloprovincialis</i> (Bäckerbock)	18
2.2.4 <i>Monochamus saltuarius</i> (Samtfleckiger Fichtenbock)	19
2.2.5 Verbreitung und Wirtsbäume	19
2.2.6 Lebenszyklus.....	21
2.2.7 Maßnahmen zur Vermeidung und Bekämpfung von <i>Monochamus</i> spp.	23
2.3 Flugverhalten von Insekten.....	23
2.3.1 Käferflug.....	23
2.3.2 Versuche zur Flugfähigkeit von Insekten	24
3 Material und Methoden.....	28
3.1 Insekten.....	28
3.1.1 Käfer aus Laborzucht	28
3.1.2 Käfer aus Lockstofffallen	28
3.1.3 Zucht der Käfer.....	29
3.2 Flugmühlversuche	30
3.2.1 Flugmühle	30
3.2.2 Versuchsablauf.....	32
3.2.3 Grundlegende Klassifikationen	34
3.3 Datenanalyse	34
3.3.1 Berechnung der Flugleistung	34

3.3.2	Statistische Berechnung	34
4	Ergebnisse	36
4.1	Anteil fliegender und nicht fliegender Käfer	36
4.1.1	<i>Monochamus sartor</i>	36
4.1.2	<i>Monochamus sutor</i>	37
4.2	Flugparameter	38
4.2.1	Beispiele individueller Flugleistung	38
4.2.2	<i>Monochamus sartor</i>	40
4.2.3	<i>Monochamus sutor</i>	42
4.3	Flugleistung über Lebenszeit	44
4.3.1	<i>Monochamus sartor</i>	44
4.3.2	<i>Monochamus sutor</i>	49
4.4	Morphologische Käfermerkmale und ihre Auswirkung auf die Flugleistung	49
4.4.1	Einfluss des mittleren Käfergewichtes auf die Flugleistung	50
4.4.2	Einfluss der Flügellänge auf die Flugleistung	53
4.5	Gewichtsveränderung in Abhängigkeit von der Flugdistanz	56
4.5.1	<i>Monochamus sartor</i>	56
4.5.2	<i>Monochamus sutor</i>	57
4.6	Einfluss von Temperatur und Wetter auf die Flugleistung	59
4.6.1	Temperatureinfluss auf die Flugleistung	59
4.6.2	Wettereinfluss auf die Flugleistung	60
5	Diskussion	63
6	Schlussfolgerung	72
	Literaturverzeichnis	73
	Eidesstattliche Versicherung	81

1 Einleitung

Die durch den Kiefernholznematoden *Bursaphelenchus xylophilus* (STEINER und BUHRER 1934) Nickle 1970 verursachte Kiefernwelke (KIYOHARA und TOKUSHIGE 1971) wird weltweit als eine Bedrohung für Waldökosysteme, insbesondere für Kiefernwälder, angesehen (WEBSTER und MOTA 2008). Durch den globalen Transport von Holzgütern steigt das Risiko, Forstschädlinge wie *B. xylophilus* in Verpackungsholz oder im Zuge von Holzimporten in neue Gebiete einzuschleppen (MEYER et al. 2004).

Die Übertragung von *B. xylophilus* zwischen den Bäumen geschieht durch Langhornböcke der Gattung *Monochamus*, die weltweit als technische und sekundäre Forstschädlinge an Nadelhölzern vorkommen. Die Kontrolle der Vektoren ist eine entscheidende Maßnahme zur Verhinderung einer weiteren Ausbreitung der Kiefernwelke.

Es kann als wahrscheinlich angesehen werden, dass der Kiefernholznematode, neben dem europäischen Vektor *Monochamus galloprovincialis*, auch von *M. sartor* und *M. sutor* übertragen wird (LINIT 1988, AKBULUT und STAMPS 2011). Beide Käfer kommen in Österreich vor und treten vorwiegend an Fichte (*Picea abies*) sowie Kiefer (*Pinus* spp.) in höheren Lagen auf (HELLRIGL 1974a). Obwohl unklar ist, inwieweit es an der Fichte unter natürlichen Bedingungen zum Ausbruch der Welke kommen kann, dient auch sie als Wirtsbaum für *B. xylophilus* (FUTAI und SHUTERLAND 1989). Käme es in Österreich zur Einschleppung von *B. xylophilus*, würden der Ausbruch und die Verbreitung der Kiefernwelke nicht lange auf sich warten lassen. Kenntnisse über die Ausbreitungsvektoren sind somit eine wichtige Voraussetzung, um zielgerechte Abwehr- und Bekämpfungsmaßnahmen treffen zu können. Studien zur Flugaktivität von *M. sartor* und *M. sutor* sind für die Risikobewertung und das Monitoring einer möglichen Kiefernwelke-Ausbreitung in Österreich erforderlich. Angaben über Flug- und Ausbreitungsverhalten der Insektenvektoren sind dazu notwendig.

Für die Zwecke der vorliegenden Arbeit wurden daher Flugmühlen eingesetzt, um verschiedene Flugparameter zu eruieren. Im Folgenden werden mögliche Korrelationen zwischen Gewicht und Flugdistanz sowie Temperatur und Flugdistanz untersucht. Von da ausgehend sollen statistische Unterschiede zwischen den Käferarten, den Geschlechtern, dem Körpergewicht und den Flügellängen in Bezug auf die Ausbreitungskapazität der Käfer aufgezeigt werden.

2 Stand des Wissens

2.1 Die Kiefernwelke

2.1.1 Geschichtlicher Verlauf

Entdeckung des Nematoden

1905 wurde in Japan ein Kiefernsterben mit zunächst ungeklärter Ursache beobachtet. Anfänglich wurde davon ausgegangen, dass in Kiefernholz und -rinde vorkommende Insekten – so z.B. Käfer der Familie der Bockkäfer (Cerambycidae), Rüsselkäfer (Curculionidae) und Borkenkäfer (Scolytidae) – als Auslöser der Welkekrankheit anzusehen wären (ZHAO et al. 2008). Im Zuge eines nationalen Projektes in Japan wurde allerdings gezeigt, dass diese Käfer keine gesunden Kiefern befallen können. Da die Eiablage nur in geschwächten Bäumen erfolgen kann, musste die Kiefernwelke einen anderen Erreger als Auslöser haben.

1969 isolierten TOKUSHIGE und KIYOHARA aus abgestorbenen Kiefern Nematoden der Gattung *Bursaphelenchus*. In den 1970er Jahren konnte mittels Inokulationstests die Pathogenität des Kiefernholznematoden (*Bursaphelenchus xylophilus*) nachgewiesen werden (ZHAO et al. 2008). Dieser gilt seitdem als Erreger der Kiefernwelke. Bereits 1934 war der Nematode durch STEINER und BRUHRER als *Aphelenchoides xylophilus* beschrieben worden.

Ausbreitung der Krankheit

Die Kiefernwelke ist eine der gefährlichsten Bedrohungen für Kiefernwälder weltweit (WEBSTER und MOTA 2008). Das Ursprungsgebiet des Nematoden befindet sich in Nordamerika. Nach Japan gelangte er vermutlich durch Schnittholzimporte und Verpackungsholz (WÄCHTER und AMLACHER 2014). In den 1980er Jahren kam es zur Verbreitung der Kiefernwelke im Norden des Landes (FUTAI 2008), wo es noch heute zu einem Schadholzanfall von ca. 1 Mio. m³ jährlich kommt (SCHRÖDER 2004). Dies entspricht etwa 20% des japanischen Jahreseinschlages (MEYER et al 2004). Neben Japan wurden auch Korea und China in den frühen 1980er Jahren von der Krankheit erreicht (SHIN und ZHAO 2008).

In Europa trat die Krankheit 1999 in Portugal an *Pinus pinaster* auf (JULIUS KÜHN INSTITUT o.J.). Seitdem werden in Portugal jährlich rund 50.000 welkende Kiefern gefällt,

wobei sich das Befallsgebiet der Kiefernwelke über eine Fläche von 258.000 ha erstreckt (SCHRÖDER 2004). 2008 wurde ein Befall in Spanien gemeldet, der allerdings nur wenige Bäume umfasste (JULIUS KÜHN INSTITUT o.J.). Auf der portugiesischen Insel Madeira wurde der Erreger 2009 nachgewiesen (TOMICZEK 2013).

Als erstes zentraleuropäisches Land war die Schweiz im Frühjahr 2011 durch *B. xylophilus* betroffen. Der Erreger war hier in Nadelrinde zur Gartendekoration aus Portugal importiert worden. Da der Weiterverkauf der Rinde sofort gestoppt wurde, konnte eine weitere Etablierung der Krankheit verhindert werden. Nadelholz aus Portugal ist seitdem als Risikoware einzustufen. In der Schweiz muss vor jeglicher Art des Weiterverkaufes eine amtliche Laboruntersuchung durch den Eidgenössischen Pflanzenschutzdienst durchgeführt werden (BAFU 2011).

In Österreich ist der Kiefernneematode bislang noch nicht aufgetreten. Bei einer Einschleppung wären jedoch weitreichende Folgeerscheinungen zu erwarten (HOYER TOMICZEK und TOMICZEK 2005). Eine von der Europäischen Union durchgeführte Studie bezüglich der Auswirkungen eines Befalls auf den heimischen Wald prognostiziert ein Absterben von etwa 50% aller Nadelbäume (TOMICZEK 2013). *B. xylophilus* ist in Österreich, sowie auch in anderen EU- Ländern, als Quarantäneschädling eingestuft (TOMICZEK und HOYER TOMICZEK 2005).

2.1.2 Modellierung der Krankheitsausbreitung - Toolkit REPHRAME

Im Zuge des von der EU finanzierten Forschungsprojektes REPHRAME (Research Extending Plant Health Risk and Monitoring Evaluation, siehe 2.1.5) kam es zur Entwicklung eines Prognose-Modells zur Bestimmung einer möglichen Krankheitsausbreitung. Anhand der durchschnittlichen Sommertemperatur oder einer einfachen geografischen Modellierung (Längen- und Breitengrade sowie Höhenlage), wird versucht, das Vorkommen und Auftreten der Kiefernwelke vorherzusagen (REPHRAME 2015). Das Temperaturmodell kann dabei auch zum Testen künftiger Klimaszenarien verwendet werden (PROJEKTKONSORTIUM REPHRAME 2015).

Aktuelle und zukünftige Klimaverhältnisse spielen eine wichtige Rolle in Bezug auf die Krankheitsausbreitung. Abb. 2-1 zeigt die Modellausbreitung der Kiefernwelke in Europa in Bezug auf die Klimaentwicklung. Zu sehen ist hier, dass von West- nach Osteuropa durchgehend mit Welkeerscheinungen zu rechnen ist, wobei von einer schwerpunktmäßigen Konzentration im südlichen Raum ausgegangen wird (REPHRAME 2015).

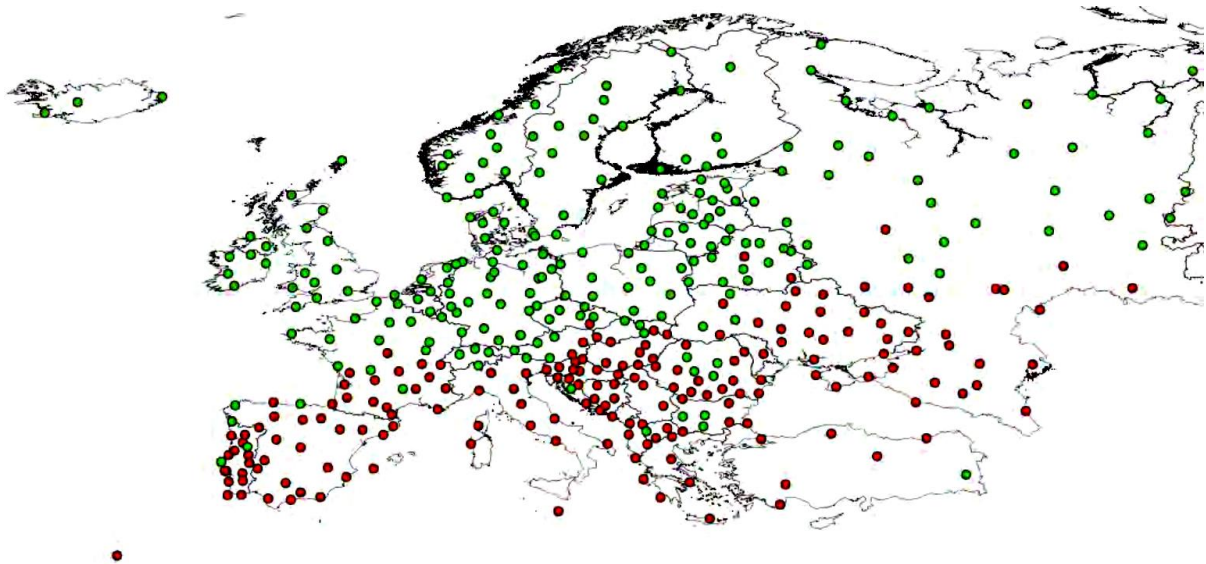


Abb. 2-1 Kiefernwelke-Modellierung in Europa in Bezug auf Klimaentwicklung: Rote Punkte stellen Standorte dar, an denen es zur Welke kommt, grüne Punkte repräsentieren Standorte, an denen es nicht zur Welke kommt (REPHRAME 2015)

Da in Europa künftig mit höheren Sommertemperaturen zu rechnen ist, wird sich das Ausbreitungsgebiet der Kiefernwelke auch verstärkt nach Norden ausdehnen (REPHRAME 2015).

Das Toolkit wurde exemplarisch für zwei Gebiete in Österreich eingesetzt. Der Standort Gaming wurde ausgewählt, da dort die meisten derjenigen *M. sartor* und *M. sutor* Käfer gefangen worden waren, die für die vorliegende Arbeit als Testinsekten dienten. Folglich ist in diesem Gebiet eine Modellierung der Krankheitsausbreitung von besonderem Interesse.

Für den Standort Wien ist auf Grund dieser Modellrechnung für den Fall eines Auftretens von *B. xylophilus* sowohl gemäß Temperatur- als auch gemäß Standort-Modellierung ein hohes Gefährdungspotential durch die Kiefernwelke gegeben.¹

Am Standort Gaming (Niederösterreich) verhält sich die Sachlage anders. Hier ergibt sich unter Verwendung des Temperaturmodells ein niedriges Risiko der Kiefernwelke, da laut dieser Modellrechnung die herrschenden Durchschnittstemperaturen für die Welke ungeeignet sind. Ein mittleres Risiko der Kiefernwelke ergibt sich unter Einsatz der Methode zur Standortmodellierung.²

¹ **Eingangsdaten zur Verwendung des Toolkit:**

Wien Breitengrad: 48.209°, Längengrad: 16.37°, Höhenlage: 180 m (CITY MAPS 2015)
mittlere Sommertemperatur: 21,0°C , mittlere Jahrestemperatur 11,6°C (ZAMG 2015)

² **Eingangsdaten zur Verwendung des Toolkit:**

Gaming Breitengrad: 47.7833°, Längengrad: 15.1833333°, Höhenlage: 1003 m (CITY MAPS 2015)
mittlere Sommertemperatur: 17,5°C, mittlere Jahrestemperatur: 8,7°C (ZAMG 2015)

2.1.3 Kiefernholznematode (*Bursaphelenchus xylophilus*)

Der Kiefernholznematode ist ein 1 Millimeter kleiner Fadenwurm mit einer drehrunden, lang gestreckten und wurmförmigen Gestalt, der sich schlängelnd fortbewegt (POLOMSKI 2008).

Am Kopf des Nematoden befindet sich ein Mundstachel mit dessen Hilfe er Pflanzenzellen zur Nahrungsaufnahme ansticht (SCHRÖDER 2014). Der Kiefernholznematode zählt zur Gattung der *Bursaphelenchus*, da am männlichen Schwanzende eine sogenannte „Bursa“ (Hautlappen) sitzt, mit der das Weibchen bei der Fortpflanzung festgehalten wird (SCHRÖDER 2014). Die Entwicklung von *B. xylophilus* findet ausschließlich im Baum statt, wo sich der Nematode überwiegend von Pilzen ernährt (MEYER et al. 2004). In Abb. 2-2 und Abb. 2-3 sind sowohl männliche als auch weibliche Nematoden dargestellt.

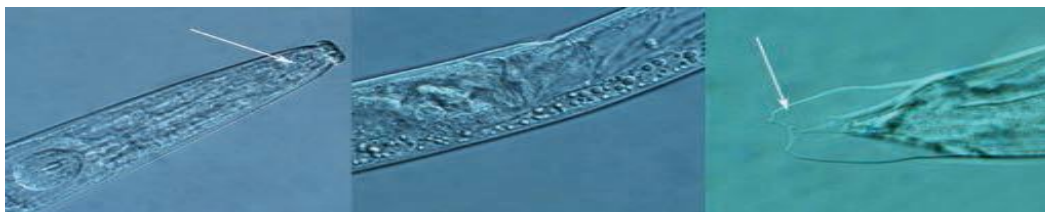


Abb. 2-2 Kiefernholznematode. Von l. n. r.: Kopf mit Mundstachel (Pfeil); Ausschnitt weiblicher Nematode; männliches Schwanzende (Pfeil) (Fotos: Informationsblatt JKI 2014)



Abb. 2-3 Kiefernholznematode (Foto: BFW 2012)

Die in Europa und auch in Österreich am häufigsten vorkommende Kiefernart *Pinus sylvestris* zählt zu den auf *B. xylophilus* hoch anfälligen Kiefernarten (SCHRÖDER 2004). Eine Pathogenität des Nematoden gegenüber den Kiefernarten in Nordamerika ist auf Grund von deren Resistenz nicht gegeben (WINGFIELD 1987 und BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT 2003).

Ist *B. xylophilus* in einem toten Baum vorhanden, bedeutet das nicht zwangsläufig, dass er als Todesursache des Baumes angesehen werden muss (WINGFIELD 1987). Inokulationstests in Bezug auf die Pathogenität des Nematoden sind sehr bedeutend. Im Lauf der Jahre zeigten diese Tests, dass der Erreger durchaus als wesentliche Ursache eines Baumsterbens in Betracht gezogen werden kann (BEDKER und BLANCHETTE 1988). Somit ist es auch denkbar, dass *B. xylophilus* als pathogener Faktor bedeutsamer geworden ist.

Nicht alle *Bursaphelenchus*-Arten lösen eine Kiefernwelke aus. Es gibt einige einheimische Arten von geringerer Pathogenität, so z.B.: *B. mucronatus* oder *B. vallesianus* (POLOMSKI 2008). Versuche mit Sämlingen können dabei helfen, Auskunft über die Pathogenität der *Bursaphelenchus*-Arten zu geben (DAYI und AKBULUT 2012). Unter allen *Bursaphelenchus*-Arten zeigt vor allem *B. mucronatus* die größte morphologische und biologische Ähnlichkeit zu *B. xylophilus* (MAMIYA und ENDA 1979, BAARSCH 1996). Beide Arten teilen die gleichen Nahrungsressourcen und Insektenvektoren (PEREIRA et al. 2013). *B. mucronatus* besitzt zwar ein größeres Verbreitungsgebiet, hat jedoch im Vergleich zu *B. xylophilus* eine geringere tötende Wirkung auf Nadelbäume (MAMIYA und ENDA 1979, PEREIRA et al. 2013).

B. xylophilus benötigt einen Vektor, um auf seine Wirtsbäume gelangen zu können, weshalb er mit Bockkäfern der Gattung *Monochamus* in einer Wechselbeziehung lebt (SCHRÖDER 2004). Diese Bindung wird vermutlich durch Anlockung der Larven von *B. xylophilus* mit volatilen Substanzen der Puppen von *Monochamus* spp. verursacht (EVANS et al. 1996). Eine solche Wechselwirkung zwischen Nematoden und Käfern ist für den Fortbestand der Nematodenpopulation überlebensnotwendig (LINIT 1988).

Aufgrund der hohen mittleren Anzahl an Nematoden, welche pro Käfer transportiert werden, ist *Monochamus* spp. mit Abstand der wichtigste Verbreiter (LINIT 1988). Das Vorkommen der Kiefernholznematoden ist daher abhängig vom Auftreten der *Monochamus*-Arten und die rasante Ausbreitung der Kiefernwelke geht möglicherweise wiederum mit dem Massenauftreten von *Monochamus* spp. einher (MEYER 2002).

Im Kiefernholz lebende Nematodenlarven besiedeln die Tracheen und die innenseitigen Bereiche der Flügeldecken der Bockkäfer. So werden sie vom Käfer beim Schlüpfen und Verlassen der Brutbäume mittransportiert (SCHRÖDER 2004). Die Jungkäfer führen ab Juni ihren Reifungs- und Ernährungsfraß an frischen, grünen Kiefernästen durch (HELLRIGL 1974). So kommt es zur Übertragung der Nematoden auf gesunde Bäume (ZHAO et al. 2008). Während der Käfer durch sein Nagen an den frischen Nadeln oder an der Rinde dem Baum eine Wunde zuführt, lassen sich die Nematoden in diese fallen (ZHAO et al. 2008). Die durch die Nematoden geschädigten Bäume dienen wiederum als Brutbäume für die nächste Käfergeneration, da die Käfer ihre Eier nur in kränkelnde Bäume ablegen (ZHAO et al. 2008).

Nachdem sich die Käferlarven entwickelt und im Holz überwintert haben, kommt es zur Verpuppung. Durch chemische Stoffe werden zu diesem Zeitpunkt die Nematoden angelockt und versammeln sich um die Puppenwiege, um die frisch schlüpfenden Käfer gleich besiedeln und einen neuen Kreislauf initiieren zu können (SCHRÖDER 2014).

Der gesamte Ablauf der Krankheitsübertragung ist in Abb. 2-4 vereinfacht dargestellt. Hierbei werden die Kiefernholznematoden grün und der Vektor in orange separat abgebildet.

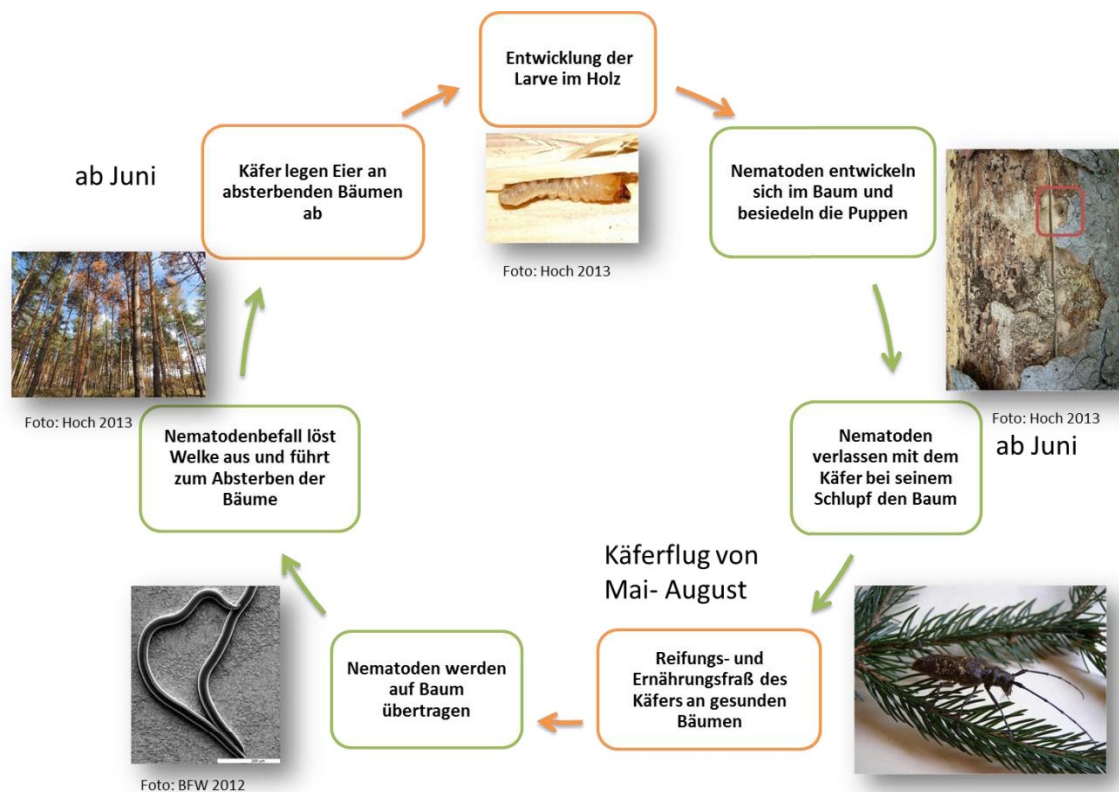


Abb. 2-4 Übertragungsschema des Kiefernholznematoden (grün) durch seinen Vektor (orange) (nach WIENGFIELD et al. 1984, SCHRÖDER 2014)

Eine Infektion muss allerdings nicht ausschließlich mittels eines Vektors erfolgen. In seltenen Fällen kann es über Wurzelkontakt oder über kurze, am Boden zurückgelegte Strecken zu einer Übertragung der Nematoden kommen (TOMICZEK 2013). Diese Art der Übertragung wurde bisher allerdings nur im Labor nachgewiesen. Auch wurde festgestellt, dass die Nematoden in anderen Pflanzen wandern können (BRAASCH 1996). Dies kann bei Vorhandensein von Baumverletzungen und bei direktem Kontakt mit infiziertem Holz geschehen (MEYER 2002). Ergebnisse aus Studien von REPHRAME zeigten, dass eine vektorlose Übertragung von *B. xylophilus* nur bei fehlender Baumrinde möglich ist (REPHRAME 2015).

Der Flug der adulten *Monochamus* spp. Käfer ist daher die beste Verbreitungsmöglichkeit für die Nematoden (REPHRAME 2015). Deshalb ist es notwendig, über Flugdauer und -strecke des Käfers Bescheid zu wissen sowie darüber, wie weit die Nematoden verschleppt werden können. Erst auf Basis dieses Wissens lassen sich entsprechende Maßnahmen zur Bekämpfung und Vermeidung der Kiefernwelke planen und umsetzen.

B. xylophilus wird vor allem im Splintholz der Kiefer vorgefunden, welches dicht an die Leitungsbahnen des Baumes grenzt (SCHRÖDER 2004). Bei sehr starker Vermehrung der

Nematoden kommt es zum Verschluss der Leitungsbahnen, die Saftströme werden unterbrochen und der Baum reagiert mit Abwehrreaktionen (REPHRAME 2012). Das plötzliche Welken von Kronenteilen oder das Abwelken der gesamten Baumkrone gilt daher als ein äußerlich sichtbares Befallsmerkmal (TOMICZEK et al. 2005). Da es sich bei Krankheitsverlauf und Krankheitsbild der Kiefernwelke allerdings um unspezifische Symptome handelt, kann ein definitiver Nachweis der Krankheit nur mittels Untersuchungen des Holzes im Labor erfolgen (SCHRÖDER 2014).

2.1.4 Wirtspflanzen

Krankheitssymptome der Kiefernwelke treten unter natürlichen Bedingungen vor allem an verschiedenen Kiefernarten (*Pinus* spp.) auf, allerdings sind nur wenige unter ihnen stark anfällig. Zu tatsächlichen Welkeerscheinungen kommt es nur bei anfälligen Kiefernarten (MEYER et al. 2004). In der unten stehenden Tabelle (Tabelle 2-1) sind jene Kiefernarten angeführt, welche als Wirtspflanzen für die Kiefernwelke in Frage kommen.

Neben der Kiefer dient auch eine Reihe anderer Bäume als Wirtspflanzen für den Kiefernholznematoden, wie z.B. Tannen-, Fichten-, Lärchen- und Douglasienarten, sowie einige andere Nadelbäume. Diese können allerdings einen Befall durch den Nematoden meist tolerieren (MEYER et al. 2004).

Tabelle 2-1: auf die Kiefernwelke anfällige Kiefernarten nach natürlicher geografischer Verbreitung (EVANS et al. 1996)

Europa	Nordamerika	Asien
<i>Pinus sylvestris</i>	Heimische Arten sind tolerant bzw. resistent	<i>Pinus densiflora</i>
<i>Pinus nigra</i> <i>Pinus pinaster</i>	Eingeführte Kiefern werden beschädigt	<i>Pinus kesiya</i> <i>Pinus koraiensis</i>
<i>Pinus mugo</i> <i>Pinus halepensis</i>		<i>Pinus luchuensis</i> <i>Pinus thunbergii</i>

2.1.5 EU-Projekte und Schutzmaßnahmen

Der Kiefernholznematode gilt laut Durchführungsbeschluss 2012/535/EU der EU-Kommission als Quarantäneschadorganismus. Das bedeutet, dass Wirtsmaterial (z.B. Holz) vor einem Export in die EU so zu behandeln ist, dass weder Nematode noch Vektorkäfer überleben können (EUROPEAN COMMISSION 2012). Bei einem Import in die EU gilt seit 2009 für Verpackungsholz der ISPM Nr. 15, welcher besagt, dass das Holz phytosanitär zu behandeln und mit einer Markierung zu versehen ist. Zu den anerkannten phytosanitären

Maßnahmen zählen die Hitzebehandlung und die Behandlung mit Methylbromid (ISPM Nr. 15 2009).

Der Durchführungsbeschluss regelt des Weiteren jene Maßnahmen, die beim Auftreten des Kiefernholznmato-den in einem anderen EU-Mitgliedstaat zu setzen sind. Alle Mitglieds-länder sind dazu verpflichtet, eine jährliche Erhebung des Vorkommens von *B. xylophilus* durchzuführen (EUROPEAN COMMISSION 2012).

In den Jahren 2002 bis 2007 setzte sich die EU-Forschungskooperation Plant Health Risk and Monitoring Evaluation (PHRAME) primär mit Fragen und Fakten im Zusammenhang mit dem Kiefernholznmato-den, der Kiefernwelke, sowie deren Vektoren auseinander (HOYER-TOMICZEK und TOMICZEK 2005).

2011 bis 2014 wurde das Projekt durch Research Extending Plant Health Risk and Monitoring Evaluation (REPHRAME) fortgesetzt und erweitert. Im Fokus lagen die in PHRAME definierten Schlüsselvariablen, vor allem die Rolle der Käfervektoren und die Anfälligkeit von Kiefern und anderen Nadelbäumen in Europa auf die Kiefernholznmato-den (REPHRAME o.J.a und REPHRAME o.J.b).

Als ein Ergebnis kam es zu einem einfachen web-basierten „Kiefernholznmato-den Tool Kit“ (siehe 2.1.2) zur praktischen Beratung und Risikobewertung der Kiefernwelke für ganz Europa (REPHRAME o.J.c). Daher erforschte REPHRAME detailliert, wie sich die Nematoden innerhalb der und zwischen den Wirts-bäumen bewegen (REPHRAME 2012).

Im Zuge von REPHRAME lag ein Schwerpunkt der Arbeit des Bundesforschungszentrums für Wald (BFW) in Wien darin, neue Daten zum Flugverhalten von *M. sartor* und *M. sutor* zu erforschen (REPHRAME 2012).

2.1.6 Schutzmaßnahmen in Österreich

Da die in Österreich heimischen Kiefern sehr anfällig auf den Kiefernholznmato-den und somit für die Kiefernwelke sind, gibt es zahlreiche Maßnahmen zur Vermeidung einer weiteren Verbreitung und Einschleppung. Bei einem Auftreten von *B. xylophilus* wären die Schäden in der Forst- und Holzwirtschaft enorm (TOMICZEK 2013). Entsprechend den EU-Richtlinien 2012/535/EU war jedes Mitgliedsland verpflichtet, diesbezüglich bis Ende 2013 einen Notfallplan auszuarbeiten.

Der Notfallplan für Österreich beinhaltet jene Maßnahmen, welche bei einem Auftreten (oder Verdacht des Vorkommens) des Kiefernnmato-den zu treffen sind (TOMICZEK 2013). Kommt es in einem bestimmten Gebiet zu einem positiven Nachweis von *B. xylophilus*, so sind eine Befalls- und eine Pufferzone auszuweisen. Die Befallszone ist hierbei mit einem

Mindestradius von 500 m um jeden befallenen Baum definiert (TOMICZEK 2013). In der Befallszone werden von außen nach innen alle anfälligen Bäume gefällt und auf Befall durch *B. xylophilus* untersucht. Bei neuerlichem positivem Nachweis des Kiefernholznmatothen muss die Befallszone um weitere 500 m erweitert werden (TOMICZEK 2013).

Die Pufferzone erstreckt sich über mindestens 20 km um den Befallsherd. In dieser Zone wird ein gründliches Monitoring (inklusive Pheromonfallen für die Käfervektoren) durchgeführt. Probenahmen von Bäumen mit und ohne Symptome werden eingeleitet (TOMICZEK 2013). Kommt es zur Auffindung eines befallenen Baumes, sind Puffer- und auch Befallszone erneut zu erweitern.

Wissen über Flug- und Ausbreitungsverhalten des Vektors von *B. xylophilus* sind in diesem Zusammenhang von zentraler Bedeutung.

2.2 *Monochamus* spp.

Mit 25.000 Arten stellen die Bockkäfer eine der artenreichsten Gruppen unter den Insekten dar (BENSE 1995). Nach HELLRIGL (1974) sind etwa 20% der in Europa vorkommenden Bockkäfer von forstlichem Interesse. Die Gattung *Monochamus* ist ein Vertreter derselben und gehört innerhalb der Familie der Cerambycidae zur Unterfamilie der *Lamiinae* (BENSE 1995). BENSE (1995) unterscheidet in diesem Zusammenhang auch zwischen „Frischholzschädlingen“ (in berindetem, relativ frischem und saftfrischem Holz) und „Trockenholzschädlingen“ (in abgestorbenem, saftarmen Holz). Die Bockkäfer der Gattung *Monochamus* sind hierbei Vertreter der „Trockenholzschädlinge“ und zählen zur Gruppe der sekundären Insekten (TRÄGÅRDH 1929, HELLRIGL 1971 und 1974, RASKE 1972, BENSE 1995). Entsprechend ihrem Vorkommen gelten die *Monochamus*-Arten vorwiegend als technische Schädlinge (SCHWENKE 1974).

In Mitteleuropa kommen vier Arten der Gattung *Monochamus* vor: *Monochamus sartor* (FABRICIUS 1787) - Schneiderbock, *Monochamus sutor* (LINNAEUS 1758) - Schusterbock, *Monochamus galloprovincialis* (OLIVIER 1795) - Bäckerbock und *Monochamus saltuarius* (GEBLER 1830) - Samtfleckiger Fichtenbock, welche alle ihre Entwicklung ausschließlich in Nadelbäumen vollziehen.

Im Folgenden sind diese vier Arten näher dargestellt, da sie auch als potentielle Vektoren für die Kiefernwelke im europäischen Raum bekannt sind.

2.2.1 *Monochamus sartor* (Schneiderbock)

M. sartor ist vorwiegend in gebirgigen Gegenden verbreitet (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Seine Entwicklung erfolgt primär in Nadelbäumen, vor allem in Fichte, zweitrangig aber auch in Tanne und Kiefer sowie an anderen Nadelbäumen (KLAUSNITZER und SANDER 1978).

Der Körper des Käfers ist vorwiegend schwarz, die Behaarung an Kopf, Pronotum und Elytren ist spärlich, weiß oder gelblich gefärbt und wird in Richtung Flügeldeckenende etwas dichter (HELLRIGL 1971). Im vorderen Drittel der Elytren findet man einen Quereindruck, der ein markantes Unterscheidungsmerkmal im Vergleich zu anderen *Monochamus*-Arten darstellt (HELLRIGL 1974). Das Scutellum des Käfers ist gleichmäßig hell gefärbt und hat keine kahle Mittellinie, wie auf Abb. 2-7 zu sehen ist (HELLRIGL 1974). Elytren und Pronotum der Weibchen weisen einige weiße Tomentflecken auf, die beim männlichen Käfer oft fehlen oder nur spärlich vorhanden sind (HELLRIGL 1971). Ein weiteres Kriterium zur Geschlechterbestimmung sind die längeren Fühler des Männchens, die die Körper der männlichen Exemplare beinahe um das doppelte überragen (HELLRIGL 1971). *M. sartor* gilt als großer und robuster Käfer unter den *Monochamus*-Arten (Abb. 2-6) (WALLIN et al. 2013).

Zur Eiablage werden von den Käferweibchen des *M. sartor*, wie auch von allen anderen *Monochamus*-Weibchen, sogenannte Eitrichter angelegt (Abb. 2-5). Hierbei kommt es zum Annagen des Holzes bis zur Bast-schicht (KLAUSNITZER und SANDER 1978).

In Österreich setzt die Flugaktivität von *M. sartor* im Juni ein. Der Flughöhepunkt befindet sich Mitte Juli bis Mitte August (HOCH et al. 2014). Kurze Unterbrechungen im Flugverhalten sind meist durch Temperatureinbrüche und Niederschlagsereignisse gegeben.



Abb. 2-5 Eischlitze zur Anlage von Eitrichtern an einem Fichtenbrutholz durch *Monochamus* spp. verursacht



Abb. 2-6 *M. sartor* Weibchen mit Angabe der Körperlänge (Foto: HOCH 2014)



Abb. 2-7 *M. sartor* Scutellum (Foto: HOCH 2014)

2.2.2 *Monochamus sutor* (Schusterbock)

M. sutor ist im Gebirge vertreten und kann gebietsweise sehr häufig vorkommen (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Als Wirtsbäume dienen vorwiegend Fichte und Tanne, in zweiter Linie aber auch Kiefer (KLAUSNITZER und SANDER 1978). In den Pyrenäen und in Skandinavien dient die Kiefer sogar als Hauptwirtsbaumart (KLAUSNITZER und SANDER 1978). *M. sutor* ist meist etwas kleiner als *M. sartor*, die Körperlänge variiert zwischen 15 und 25 mm (HELLRIGL 1971) (Abb. 2-8). Er ist ein mittelgroßer Vertreter unter den *Monochamus*-Arten (WALLIN et al. 2013). Der Körper ist überwiegend schwarz gefärbt, Pronotum und Elytren haben viele gelbliche oder weiße Flecken (HELLRIGL 1971). Im vorderen Drittel der Flügeldecke fehlt der Quereindruck, das Scutellum ist weißlich befleckt und längs der Mitte durchgehend geteilt (HELLRIGL 1974). Die Teilung des Scutellum ist anhand von Abb. 2-9 ersichtlich. Die Geschlechterunterscheidung ist wie bei *M. sartor* durch die Länge der Fühler möglich (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Die Eiablage erfolgt ebenfalls in Form von Eitrichern in die Bastschicht der Wirtsbäume (KLAUSNITZER und SANDER 1978).

M. sutor beginnt wie *M. sartor* im Juni mit seiner Flugaktivität, allerdings lässt sich bei dieser Art kein klarer Flughöhepunkt festlegen (HOCH et al. 2014).



Abb. 2-8 *M. sutor* Weibchen mit Angabe der Körperlänge (Foto: HOCH 2014)



Abb. 2-9 *M. sutor* Scutellum (Foto: HOCH 2014)

2.2.3 *Monochamus galloprovincialis* (Bäckerbock)

Die Körpergrundfarbe von *M. galloprovincialis* ist einheitlich schwarz, wobei der Kopf des Käfers schütter gelb bis grau behaart ist (HELLRIGL 1971). Pronotum und Elytren sind gelbbraun oder gelbgrau gefleckt (HELLRIGL 1971). Das Scutellum bei *M. galloprovincialis* ist ebenfalls gelblich befleckt und bis zur Mitte V-förmig geteilt (HELLRIGL 1974), wie anhand von Abb. 2-11 zu erkennen ist. Abb. 2-10 zeigt *M. galloprovincialis*, der unter den *Monochamus*-Arten als mittelgroßer Vertreter gilt (WALLIN et al. 2013). Befallen werden von diesem Bockkäfer fast ausschließlich Kiefern, wobei die mittleren und oberen Stammteile des Baumes bevorzugt werden (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Somit ist *M. galloprovincialis* auch als Hauptvektor für die Kiefernwelke in Europa bekannt (AKBULUT und STAMPS 2011).

M. galloprovincialis zählt zu den frühen Fliegern. Bereits an den ersten Tagen im Juni sind Käfer dieser Art flugaktiv (HOCH et al. 2014). Der Flughöhepunkt befindet sich zwischen Ende Juni und Anfang Juli (HOCH et al. 2014).



Abb. 2-10 *M. galloprovincialis* und Angabe der Körperlänge (Foto: HOCH 2014)



Abb. 2-11 *M. galloprovincialis* Scutellum (Foto: HOCH 2014)

2.2.4 *Monochamus saltuarius* (Samtfleckiger Fichtenbock)

M. saltuarius ist in Mitteleuropa eine wesentlich seltenere Art unter den Bockkäfern der Gattung *Monochamus* (KLAUSNITZER und SANDER 1978). In Asien und Europa befällt *M. saltuarius* Kiefern und Fichten (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Allerdings kann der Käfer auch an Tanne, Zeder und Lärche vorkommen (HELLRIGL 1971). *M. saltuarius* ist in Ostasien nachweislich als Vektor der Kiefernwelke bekannt (HELLRIGL 1971 und 1974, AKBULUT und STAMPS 2011, WALLIN et al. 2013). Der Körper ist, wie bei den anderen Käfern der Gattung *Monochamus*, dunkel gefärbt und mit vielen hellen Tomentflecken versehen (HELLRIGL 1971). Zwischen den hellen Flecken weist er eine samtschwarze Grundbehaarung auf (HELLRIGL 1971). Das Scutellum ist längs der Mitte vollständig oder zu drei Vierteln geteilt, wie Abb. 2-13 zeigt (HELLRIGL 1971). Ein Quereindruck in der Flügeldecke fehlt (BENSE 1995 und HELLRIGL 1971). Die Körperlänge variiert von 11 bis 20 mm (Abb. 2-12), somit ist *M. saltuarius* der kleinste vorkommende Vertreter der *Monochamus*-Arten in Mitteleuropa (HELLRIGL 1971, WALLIN et al. 2013).



Abb. 2-12 *M. saltuarius* und Angaben der Körperlänge (Foto: HOCH 2014)



Abb. 2-13 *M. saltuarius* Scutellum (Foto: HOCH 2014)

2.2.5 Verbreitung und Wirtsbäume

Die Verbreitung der Käfer hängt von vielen abiotischen, biotischen und anthropogenen Faktoren ab. Zudem ist eine wichtige Voraussetzung für das Vorkommen von *Monochamus*-Arten das Vorhandensein von geeigneten Wirtsbäumen (MEYER 2002).

Anhand von Tabelle 2-2 wird ersichtlich, inwiefern sich die in Österreich vorkommenden Arten (siehe 2.2.1 bis 2.2.4) bezüglich ihrer Wirtsbäume und geografischen Verbreitung unterscheiden. Von den heimischen Arten befällt *M. galloprovincialis* bevorzugt Kiefern, die

drei anderen Arten findet man hauptsächlich an Fichte (BENSE 1995, EVANS et al. 1996, HOCH et al. 2014). Jedoch ist *M. sutor* in den Pyrenäen und in Skandinavien gleichermaßen bedeutend an der Kiefer.

M. sutor ist mit Abstand die am weitesten verbreitete Art in Europa und ändert je nach Vorkommensgebiet ihr Wirtsspektrum. In den Pyrenäen und in Skandinavien ist der Käfer bevorzugt an Kiefer, in den Alpen bevorzugt an Fichte zu finden (MEYER 2002, HOCH et al. 2014). *M. sutor* kommt in den Pyrenäen, den Alpen, am Nordbalkan und in ganz Mittel- Nordeuropa sowie Russland vor (KLAUSNITZER und SANDER 1978).

M. sartor ist hingegen eher in Mitteleuropa vertreten und wird in Nord-Osteuropa von *M. sartor urussovi* (einer Unterart) abgelöst (WALLIN et al. 2013, HOCH et al. 2014).

Als Vektor für *B. xylophilus* ist *M. saltuarius* im asiatischen Raum bekannt (HELLRIGL 1971, AKBUTUL und STAMPS 2001, WALLIN et al. 2013). Diese Art kommt sporadisch in den Gebirgen Europas bis Sibirien und Japan vor, wobei ihre westlichsten Vorkommen in Österreich und den deutschen Alpen zu verzeichnen sind (MEYER 2002).

Die geografische Verbreitung der vier europäischen *Monochamus*-Arten ist auch durch das Klima geprägt. Alle Arten sind an die gemäßigten Breiten gebunden (MEYER 2002).

Tabelle 2-2: *Monochamus*-Arten in Asien und Europa, Wirtsbäume, geografische Verbreitung (basierend auf Angaben in BENSE 1995, EVANS et al. 1996, HOCH et al. 2014)

Monochamus Art	Wirtsbäume	Geografische Verbreitung
<i>M. galloprovincialis</i>	<i>Pinus</i> , <i>Abies</i> , <i>Picea</i> , <i>Larix</i>	Nordafrika, Süd- und Zentraleuropa, Russland, Sibirien
<i>M. saltuarius</i>	<i>Picea</i> , <i>Pinus</i> , <i>Abies</i> , <i>Cedrus</i> , <i>Larix</i>	Japan, China, Sibirien, Litauen, Zentral- und Ostalpen, Mittel- und Osteuropa, südlich Italiens
<i>M. sartor</i>	<i>Picea</i> , <i>Abies</i> , <i>Pinus</i> , <i>Larix</i> , <i>Cedrus</i>	Mitteleuropa (Frankreich bis Ukraine), Japan, China, Sibirien, Russland, Finnland, Polen
<i>M. sutor</i>	<i>Picea</i> , <i>Pinus</i> , <i>Abies</i> , (<i>Laubholz</i>)	China, Sibirien, Russland, Georgien, Skandinavien, Baltische Staaten, Zentral- und Osteuropa: Pyrenäen und Alpen

2.2.6 Lebenszyklus

Grundsätzlich sind die Aspekte des Lebenszyklus für die vier mitteleuropäischen *Monochamus*-Arten einheitlich, daher kommt es hier zu einer gemeinschaftlichen Darstellung. Bei der Paarung verteidigen die Männchen ihre Weibchen und zeigen ein deutliches Revierverhalten (MEYER 2002). Um für längere Zeit fertile Eier ablegen zu können, müssen sich die Weibchen mehrfach paaren (LINIT 1988). Die Paarung erfolgt ebenso wie die nachfolgende Eiablage in der Dämmerung oder während der Nachtstunden (LINIT 1988).

Die Eiablage erfolgt ab Juni meist in sogenannten Eitrichern (siehe Abb. 2-5) in der Rinde, unter die Borke oder an Wundstellen im Holz (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Das Bockkäferweibchen legt maximal vier Eier pro Eitrichter ab (HELLRIGL 1974, BENISE 1995). Feuchtigkeit, Temperatur und andere Umweltfaktoren bestimmen die Dauer der Eientwicklung (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Die Legeperiode der *Monochamus*-Arten beginnt im Juni und endet im September (HELLRIGL 1974, KLAUSNITZER und SANDER 1978).

Die Larven schlüpfen nach ein bis zwei Wochen (HELLRIGL 1974). Eine genaue Anzahl der Larvenstadien lässt sich nur vermuten, da diese eine verborgene Lebensweise führen (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Voraussetzung für eine optimale Larvenentwicklung ist ein Feuchtegehalt von 20% im Brutmaterial, da bei dieser Feuchte auch das Wachstum von Pilzen in den Larvengängen möglich ist (SCHWENKE 1974). Anfangs fressen die Larven plätzend im Bast, nach weiteren 14 Tagen beginnen sie den Splint zu schürfen (HELLRIGL 1974). Markant sind dabei die anfallenden Bohrspäne, welche in großen Mengen ausgeworfen werden und somit als erstes, für *Monochamus* typisches, Befallsmerkmal dienen (HELLRIGL 1974). Die Larvenaktivität macht sich zusätzlich durch Lauterzeugung bemerkbar (BENSE 1995, HOCH et al. 2014). *Monochamus*-Arten legen sogenannte Platzgänge an, wie am Beispiel von Abb. 2-14 a gut zu erkennen ist.



Abb. 2-14 Fraßbild von *M. sartor* a Platzgang b Larvengang ins Holz zur Verpuppung c Ausbohrloch der Käfer (Foto: HOCH 2013)

Die Larven benötigen nur eine kurze Zeitspanne zur Entwicklung. Häufig jedoch, besonders bei feuchten und kalten Klimabedingungen, kann es zum Überliegen der Larven für eine Dauer von bis zu einem Jahr kommen (HELLRIGL 1974).

In Abb. 2-15 ist ein Einbohrloch von *M. sartor* zu erkennen. Bei *Monochamus* spp. kommt es während der mittleren Larvenstadien zur Anlage von Holzgängen (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Dies sind tiefe Gänge bis ins Holzinne, an deren Ende es zur Verpuppung kommt (KLAUSNITZER und SANDER 1978) (Abb. 2-14 b). Die Verpuppung erfolgt bei *Monochamus*-Arten im Frühjahr für ca. 20 Tage (HELLRIGL 1974).

Nach zwei- bis dreiwöchiger Puppenruhe bohrt sich der fertig entwickelte Käfer etwa im Juni durch ein kreisrundes Flugloch aus (HELLRIGL 1974) (Abb. 2-14 c). Die Nahrungsaufnahme erfolgt zunächst als Reifungsfraß (HELLRIGL 1974, KLAUSNITZER und SANDER 1978, BENSE 1995). Später geht dieser in einen sogenannten Ernährungsfraß über (HELLRIGL 1974, KLAUSNITZER und SANDER 1978). Der Ernährungsfraß wird über das gesamte Käferleben durchgeführt (HELLRIGL 1974). Ausgeführt werden Reifungs- und Ernährungsfraß in der Baumkrone der Wirtsbäume an grünen Nadeln, jungen Trieben oder an der Rinde (HELLRIGL 1974, HOYER-TOMICZEK und TOMICZEK 2005). Mitunter kann ein charakteristisches Fraßbild entstehen, welches als Merkmal für einen *Monochamus*-Befall heranzuziehen ist (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Die Lebensdauer der Imagines liegt bei *Monochamus* spp. bei mehreren Monaten (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Wie andere Bockkäfer haben auch die *Monochamus*-Arten zu einer bestimmten Jahreszeit ihre Flug- bzw. Aktivitätszeit, die im vorliegenden Fall im Frühjahr liegt (KLAUSNITZER und SANDER 1978).



Abb. 2-15 Einbohrloch von *M. sartor* (Foto: HOCH 2013)

2.2.7 Maßnahmen zur Vermeidung und Bekämpfung von *Monochamus* spp.

Zur Vermeidung von Bockkäfern der Gattung *Monochamus* ist laut HELLRIGL (1974) eine saubere Waldwirtschaft, rechtzeitiges Entrinden von Nadelholzstämmen und eine rasche Abfuhr des Holzes notwendig. Waldlager sollten nicht zu langfristig angelegt und natürliche Gegenspieler (z.B.: Specht) gefördert werden. HELLRIGL (1974) spricht auch von waldbaulichen Maßnahmen wie Schaffung günstiger Standortverhältnisse, richtige Holzartenwahl sowie -mischung und Vermeidung von Grundwasserabsenkung.

Nach MEYER (2002) ist das Zerkleinern des Schlagabraumes eine weitere vorbeugende Maßnahme, da so bruttaugliches Material für die holzbrütenden Insekten vermieden werden kann. Zusätzlich stellt er die direkte Bekämpfung der *Monochamus*-Arten nach dem Einbohren der Larve in Frage, da die hauptsächliche Entwertung des Holzes ohnehin schon geschehen ist. Der reguläre Holzeinschlag sollte über den Winter erfolgen, eine Holzlagerung im Bestandesschatten ist vorzuziehen, um günstige Entwicklungsbedingungen für die Käferlarven zu vermeiden. Um eine Entwicklung von *Monochamus* spp. zu unterbinden ist weiters das sogenannte „kiln drying“ eine geeignete Methode, bei der es zur Kammertrocknung des Holzes bis zu einem Feuchtigkeitsgehalt von unter 20% kommt.

Mikrowellentrocknung wurde als weitere optionale Behandlungsform des Holzes untersucht, stellte sich allerdings als zu aufwändig heraus (KISHI 1995).

2.3 Flugverhalten von Insekten

2.3.1 Käferflug

Käfer besitzen lange Elytren (SCHWENKE 1974), welche sie beim Flug im Allgemeinen spreizen, die aber keine Antriebmuskulatur besitzen (SCHNEIDER 1975). Man unterscheidet verschiedene Typen des Elytren-Einsatzes beim Käferflug. Die Bockkäfer zählen hierbei zum *Melolontha*-Typ, hier schwingen die Elytren nur indirekt mit und liefern so 17 - 20% des Auftriebs beim Geradeausflug (SCHNEIDER und MEURER 1975). Anhand von Abb. 2-16 kann man die gespreizte Haltung der Elytren beim Flug gut erkennen. Morphologische Größen wie Körpergröße und Flügelänge sind dafür bekannt, die Flugfähigkeit und Flugleistung zu bestimmen. Man geht daher davon aus, dass größere Käfer auch weiter fliegen können als kleine (DAVID et al. 2013). Die absolute Größe spielt für die Flugenergetik eine Rolle (NACHTIGALL 2003). Im Vergleich zu Zweiflüglern verhält es sich so, dass Käfer

deutlich weniger schnell und deutlich weniger wendig in ihrem Flug sind (SCHMIDT und SCHMIDT 2014).



Abb. 2-16 *M. sartor* beim Abflug (Foto: HALBIG 2012)

Die meisten Bockkäferarten sind flugaktiv und ausgesprochen schnelle Flieger. Ihre Flugzeit liegt zwischen Mai und Juli (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Im Gebirge vorkommende Arten (wie auch *M. sartor* und *M. sutor*) weisen eine verhältnismäßig kürzere Flugzeit auf (KLAUSNITZER und SANDER 1978). Den Käfern ist es dennoch möglich, auf der Nahrungswanderung große Distanzen (nicht nur fliegend) zurückzulegen (NACHTIGALL 2003).

2.3.2 Versuche zur Flugfähigkeit von Insekten

Zur Überprüfung der Flugfähigkeit und Flugkapazität von Insekten bzw. fliegenden Forstschädlingen gibt es verschiedene methodische Ansätze. Zum Einsatz kommen hierbei die im Freiland durchzuführenden Markierungs-Wiederfangversuche, die im Labor getätigten Flugversuche im Windkanal und Versuche an Flugmühlen.

Markierungs-Wiederfangversuche

Markierungs-Wiederfangversuche werden in der freien Natur durchgeführt. Dazu werden Fallen verwendet, die für den Lebendfang geeignet sind. Gefangene Insekten werden markiert und an unterschiedlichen Standorten freigelassen, damit durch einen Wiederfang auf das Ausbreitungsverhalten geschlossen werden kann.

Nach FRANZEN und NILSSON (2007) sind solche Versuche allerdings sehr beschränkt tauglich, da sie meist zu einer Unterschätzung der maximalen Flugkapazitäten führen. Diese Unterschätzung ergibt sich aufgrund der begrenzten Fallenzahl und Fallendistanz sowie durch vorkommende Ausfälle.

In einer Metastudie zeigte SCHNEIDER (2003), dass die gemessene mittlere Ausbreitungsdistanz mit der Größe des Untersuchungsgebietes ansteigt. Dies zeigt, dass die Markierungs-Wiederfangversuche die maximalen Ausbreitungskapazitäten von fliegenden Insekten klar unterschätzen.

Bei den Markierungs-Wiederfangversuchen ist es wichtig, am selben Tag markierte Wiederfänge nicht in der Flugkapazitätsanalyse zu berücksichtigen, da es ansonsten zu einer zusätzlichen Unterschätzung der Flugleistung kommen kann (GALL 1984).

Im Wildnisgebiet Dürrenstein wurden Markierungs-Wiederfangversuche mit *Monochamus* spp. durchgeführt. Die entfernteste Falle befand sich in einer Distanz von 390m. Auch hier kam es zum Wiederfang. Dieses Experiment liefert einen ersten Einblick in die Flugaktivität potenzieller Vektoren der Kiefernholznematoden in Österreich (HALBIG 2013).

Im Zuge von REPHRAME (siehe 2.1.5) wurden 2010 und 2013 in Spanien Markierungs-Wiederfangversuche mit *M. galloprovincialis* durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass der Prozentanteil von wiedergefangenen Käfern mit zunehmender Distanz abnimmt und maximale Flugdistanzen im Bereich zwischen 1,5 und 2km liegen (PROJEKTKONSORTIUM REPHRAME 2014). Im Durchschnitt legten die Käfer Distanzen von 523m zurück (SANCHEZ-HUSILLOS et al. 2015).

Flugversuche im Windkanal

Eine weitere Möglichkeit zur Testung des Flugverhaltens von Insekten sind Windkanalsysteme. Oftmals werden diese zugleich auch als Werkzeuge der Pheromonforschung eingesetzt. (MILLER und REOLOFS 1978). Windkanäle werden dazu verwendet, Fluggeschwindigkeiten von Insekten zu eruiieren und Daten zum Insektenflug zu erschließen (GILLIES und WILKES 1981). Werte aus Windkanaltests werden oftmals zum Vergleich mit Daten aus Markierungs-Wiederfangversuchen und Flugmühlversuchen herangezogen (YAMANAKA et al. 2001).

Flugmühlversuche

Flugmühlversuche stellen eine weitere Methode dar, die potenzielle Ausbreitungsdistanz und Fluggeschwindigkeit von Insekten abzuschätzen (KAWAMOTO et al. 1987, CATRO et al. 2014). Sie werden verwendet, um Flugfähigkeiten, -frequenz, -dauer, -geschwindigkeit und -distanz von Insekten zu überprüfen (CHAMBERS et al. 1976). Obwohl es sich hierbei um eine künstlich geschaffene Situation handelt, die nicht mit natürlichen Flugleistungen gleichgesetzt werden darf, kann eine hilfreiche Datenbasis in Bezug auf Flugkapazitäten und Ausbreitungsverhalten von flugfähigen Insekten geschaffen werden (JONES et al. o.J., MORIYA 1995, DAVID et al. 2013).

Ein durchaus praktikables Verfahren stellen Flugmühlversuche dar, wenn sie unter streng standardisierten Bedingungen zum Einsatz kommen (MORIYA 1995, DAVID et al. 2013). Auch kann mittels dieser Art von Flugversuch der Effekt von endogenen Faktoren, wie etwa

Geschlecht (SENGER et al. 2007), Größe (DAVID et al. 2013) und Entwicklungsstadium (HUGHES und DORN 2002), auf das Flugverhalten von Insekten ermittelt werden. Flugmühlen eignen sich für Flugstudien von nahezu jedem Fluginsekt, da es sich hierbei um ein anpassungsfähiges Versuchsinstrument handelt (CHAMBERS et al. 1976, TAYLOR et al. 2010).

Ein wesentlicher Vorteil, der sich durch den Einsatz von Flugmühlen ergibt, besteht in der Generierung von Vergleichswerten bezüglich Flugkapazitäten (HUGEHEES und DORN 2002). Der Flug im Labor wird sehr häufig auch als Vergleichsindex zum Flugverhalten bei endogenen und exogenen Variablen herangezogen.

Zusätzlich können Flugmühlen unabhängig voneinander eingesetzt werden. Neben ihrer Verwendung für Fluganalysen werden Flugmühlen so auch für akustische, optische und respirometrische Untersuchungen herangezogen (CHAMBERS et al. 1976). Daraus ergibt sich als weiterer Vorteil die Bereitstellung digitalisierten Datenmaterials (CHAMBERS et al. 1976, TAYLOR et al. 2010, DAVID et al. 2013).

Kritikpunkte setzen bei den Laborbedingungen an, unter denen Flugmühlversuche durchgeführt werden, und die wesentliche Umweltreize ausschließen. Daher sind sie für den Flug in der Natur nur bedingt repräsentativ (TAYLOR et al. 2010).

Die so gewonnenen Flugdaten können zudem oft zu einer Überschätzung des tatsächlichen Flugverhaltens führen, da die Insekten aufgrund des fehlenden Bodenkontaktes zum Fliegen gezwungen werden (YAMANAKA et al. 2001, EDWARDS 2006). Zusätzlich tragen die Insekten nicht ihr komplettes Körpergewicht, was erneut zu einer Überschätzung der Flugleistung führt (EDWARDS 2006, CASTRO et al. 2014).

TAYLOR et al. (2010) untersuchten mittels Flugmühlen das Flugpotential des asiatischen Eschenprachtkäfers (*Agrilus planipennis*) und gingen zunächst von einer Unterschätzung der Insektenflugleistung aus. Gemäß seiner Interpretation müssen die Insekten zunächst das Trägheitsmoment sowie den Torsionswiderstand und die Reibung des Kugellagers der Flugmühle überwinden. Er entwickelte eine Formel zur Bereinigung der Fluggeschwindigkeit an der Flugmühle von Nebeneffekten. Als Störfaktor wird hierbei die Handhabung der Insekten, d.h. deren Anbringung an der Flugmühle und die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Flugverhalten, verstanden.

Im Gegensatz dazu konnten RILEY et al. (1997) nachweisen, dass der durch die Flugmühlen vorhandene Auftrieb einen klaren Vorteil für die getesteten Insekten hatte. Die an Flugmühlen befestigten Insekten müssen das eigene Körpergewicht nicht tragen, wodurch mehr Energie für die Vorwärtsbewegung zur Verfügung steht. Es kommt in diesem Fall zu einer Überschätzung des Flugverhaltens.

Um das Flug- und Ausbreitungsverhalten von *M. sartor* und *M. sutor* im Rahmen dieser Arbeit zu analysieren wurde auf die Methode der Flugmühlversuche zurückgegriffen. Mittels dieses Laboransatzes kann eine solide Datenbasis relativ einfach als Einzelperson erarbeitet werden.

3 Material und Methoden

3.1 Insekten

Um die Flugleistung während der Dauer des adulten Lebens zu eruieren, wurde für die Flugmühlversuche auf Käfer zurückgegriffen, die im Labor geschlüpft waren. Zusätzlich wurden für die Versuchsarbeiten Käfer aus dem Freiland herangezogen, die in Lockstofffallen gefangen worden waren.

3.1.1 Käfer aus Laborzucht

Insgesamt wurden 23 Exemplare von *M. sartor* und 2 von *M. sutor* verwendet, die aus Fichtenbruthölzern im Freiland-Insektarium des BFW geschlüpft waren. Die Stammstücke wurden in den Sommern 2012 bzw. 2013 von Käfern mit Eiern belegt. Die entsprechenden Käfer wiederum stammten aus eingetragenen befallenen Holz sowie aus Fallenfängen in den Niederösterreichischen Alpen.

3.1.2 Käfer aus Lockstofffallen

Zusätzlich wurden mit Hilfe von Trichterfallen 20 Käfer im Freiland gefangen. Die Fallen waren dabei mit Lockstoffdispensern (Galloprotect-2D von SEDQ, Spanien) ausgestattet (HOCH et al. 2014) und wurden auf einem Holzlagerplatz in Bad Gastein (Salzburg) und in einem Fichtenwald auf dem Scheiblingstein (Gemeinde Gaming) in Niederösterreich aufgestellt.

Tabelle 3-1: Übersicht der für den Versuch zur Verfügung stehenden Käfer aus Laborzucht und Lockstofffallen. Die in Klammer stehenden Werte repräsentieren die Anzahl der tatsächlich an den Flugmühlen getesteten Käfer. (M=männlich F=weiblich)

Käfer aus Laborzucht	<i>M. sartor</i>	<i>M. sutor</i>	Σ
F	15 (10)	1 (1)	
M	8 (4)	1 (1)	
Σ	23	2	25
Käfer aus Lockstofffallen			
F	8 (8)	4 (4)	
M	5 (5)	3 (3)	
Σ	13	7	20

Sowohl bei Laborkäfern als auch bei Wildfängen kam es vor dem Start der Versuchsreihe zu Ausfällen, weshalb von den 45 vorhandenen Käfern nur 36 tatsächlich an den Mühlen getestet wurden. In Tabelle 3-2 sind alle Käfer angeführt und jene hervorgehoben, die tatsächlich an den Flugmühlen angebracht wurden.

Tabelle 3-2: Übersicht aller Laborkäfer und Wildfänge inklusive Schlüpf- und Fangdatum. Die durch Fettdruck hervorgehobenen Käfer wurden auch tatsächlich an den Flugmühlen getestet. Die anderen sind noch vor Beginn der Versuchsreihe gestorben. (M=männlich F=weiblich)

LABORZUCHT				FALLENFÄNGE				
Schlupfdatum	Art	Geschlecht	Nr.	Fangdatum	Art	Geschlecht	Nr.	
12.06.2014	<i>M.sutor</i>	F	1	25.07.2014	<i>M.sutor</i>	F	2	
		M	1			M	2	
	<i>M.sartor</i>	F	1	<i>M.sartor</i>	M	9		
		F	2		04.08.2014	<i>M.sutor</i>	F	3
		F	3	M			3	
		F	4	<i>M.sartor</i>		F	16	
		F	5			F	17	
		F	6			M	10	
		F	7			08.08.2014	<i>M.sutor</i>	F
		F	8	M	4			
		M	1	<i>M.sartor</i>	F		18	
		M	2		M		11	
		M	3	11.08.2014	<i>M.sutor</i>	F	5	
		M	4			F	19	
		M	5		F	20		
		16.06.2014	<i>M.sartor</i>		F	9	F	21
					M	6	F	22
		18.06.2014	<i>M.sartor</i>		F	10	F	23
F	11			M	12			
F	12			M	13			
F	13							
23.06.2014	<i>M.sartor</i>	F	14					
		F	15					
		M	7					
		M	8					

3.1.3 Zucht der Käfer

Die Testkäfer wurden entweder einzeln in Gläsern (500-800ml) mit Metallganz-Deckel oder als Käferpaar (ein männlicher und ein weiblicher Käfer) in einem Käfig (Länge: 42cm, Breite: 50cm



Abb. 3-1 freigelegtes Monochamus Ei, markierte Eiablagestellen

und Höhe: 70cm) bei Raumtemperatur im Entomologie-Labor gehalten. Sie wurden mehrmals pro Woche mit frischen Fichtenzweigen versorgt und zusätzlich mit Wasser besprüht. Um eine Unterscheidung der Testkäfer möglich zu machen, wurden diese individuell mit Lackstiften markiert. Eine derartige Kennzeichnung der Käfer wurde bereits von TOGASHI (1990) und HALBIG (2013) im Zuge von Markierungs-Wiederfangversuchen angewendet.

Zu den im Käfig gehaltenen Käferpaaren wurde zusätzlich ein Fichtenstammstück (Länge: 50cm, Durchmesser: 15-20cm) gelegt, der als Brutholz Verwendung finden sollte. Wie in Abb. 3-1 zu erkennen ist, wurden die Eischlitze mittels Permanentmarker markiert und abgezählt. So wurde die reproduktive Aktivität der Testkäfer festgehalten und notiert.

3.2 Flugmühlversuche

Von Juni bis August 2014 fanden die Versuchsarbeiten im Entomologie-Labor des BFW statt. Die Flugmühlversuche wurden an mindestens zwei bis drei Tagen pro Woche jeweils mit allen zur Verfügung stehenden Testkäfern durchgeführt. Es wurde darauf geachtet, die Käfer nach Möglichkeit nicht an zwei aufeinander folgenden Tagen zu prüfen, sondern mindestens einen Tag Flugpause einzuhalten. Der erste Versuchstag mit *Monochamus* war der 24. Juni 2014, der letzte der 28. August 2014.

3.2.1 Flugmühle

Zur Ermittlung der Flugleistung von *M. sartor* und *M. sutor* im Labor wurden zwei Flugmühlen verwendet, die dem BFW von INRA Bordeaux (Labor Dr. H. Jactel) zur Verfügung gestellt worden waren. Flugmühlen desselben Typs waren bereits in früheren Studien bei INRA zur Anwendung gekommen (David et al. 2013). Mit Hilfe dieser Geräte ist es möglich, Geschwindigkeit, Distanz und Zeit von Insektenflügen zu ermitteln.



**Abb. 3-2 Flugmühle
(HOCH 2014)**

Aufbau

Eine Flugmühle (Abb. 3-2) ist aus drei wesentlichen Komponenten aufgebaut:

- dem Gerät, aus einem rotierenden Arm, an den die Insekten befestigt werden und aus einem Lichtsensor, der die Umdrehungen misst, bestehend

- einem Rechner (Raspberry) auf dem sich ein C++ Programm befindet, um die an der Mühle zurückgelegten Umdrehungen aufzuzeichnen.
- einem USB-Speicher, zur Sicherung der Ergebnisse und Daten.

Der Aufbau einer Flugmühle ist einfach gehalten und besteht aus einem vertikalen Mast und einem horizontalen Arm. Mast und Arm sind mit einem leichtgängigen Kugellager verbunden. An der Spitze des horizontalen Arms wird der Testkäfer mit Hilfe eines kleinen Schaumstoffstücks befestigt. Ein optischer Sensor misst jede halbe Umdrehung die vom Testkäfer zurückgelegt wird. Ein Rechner (Raspberry) zeichnet die Halbumdrehungen auf. Während der Flugzeit des Käfers wird vom C++ Programm in zehnständlichem Abstand die Zahl der Halbumdrehungen aufgelistet.

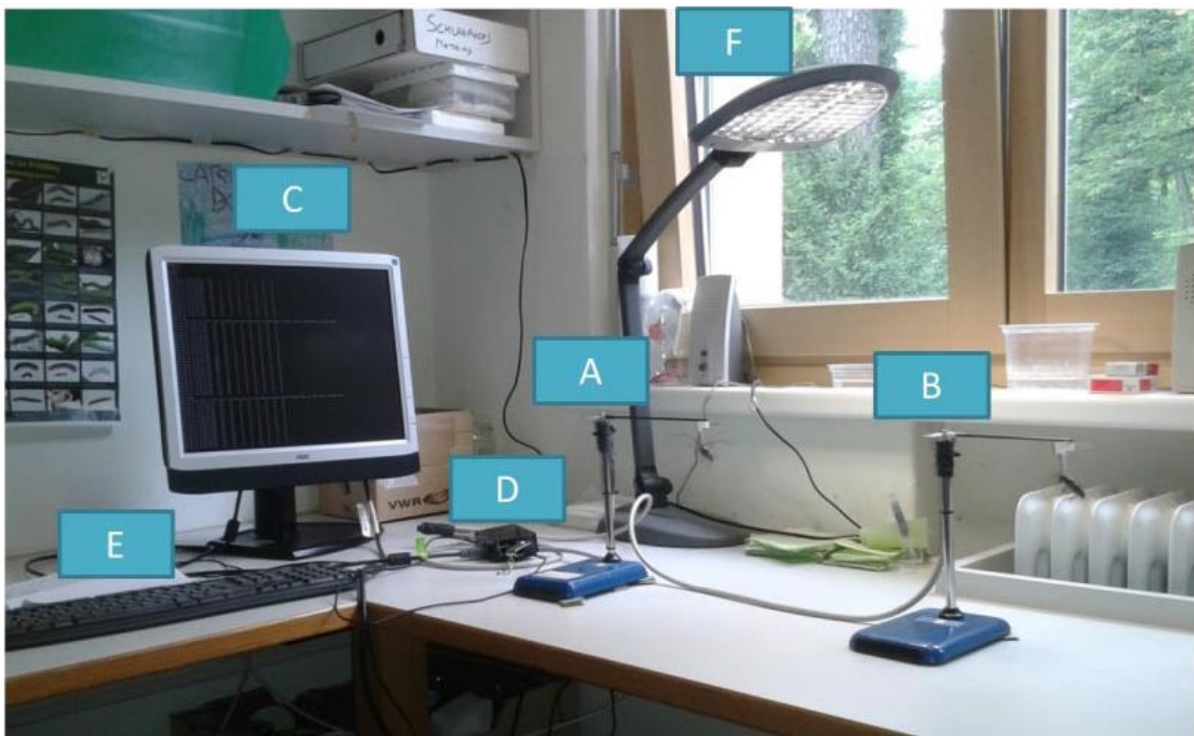


Abb. 3-3 Aufbau des Flugmühlenversuches mit zusätzlicher Lichtquelle (F). Zu sehen sind zwei verwendete Flugmühlen, an denen jeweils ein *M. sartor* montiert ist. An der ersten Flugmühle (A) ist der Testkäfer bereits im Flug, an der anderen Flugmühle (B) noch in Ruheposition. Flugmühlen, Tastatur (E) und Bildschirm (C) müssen mit dem Raspberry (D) verbunden sein.

Funktionsweise

Die Funktionsweise einer Flugmühle beruht auf einem sehr einfachen Prinzip. Der Testkäfer wird am Ende des horizontalen Arms montiert und fliegt im Kreis um die Achse des vertikalen Masten (Abb. 3-4). Bei diesem Mühlentyp wird nach jedem Impulsempfang des optischen Sensors eine Halbumdrehung dokumentiert. Da der Radius der Umdrehung bekannt ist, kann durch Einsatz der Kreisumfangsformel die zurückgelegte Flugdistanz ermittelt werden. Durch Berücksichtigung der Zeit kann die Fluggeschwindigkeit und auch die Dauer des Fluges berechnet werden. Die genaue Herangehensweise bei der Auswertung der Rohdaten folgt in 3.3 Datenanalyse.

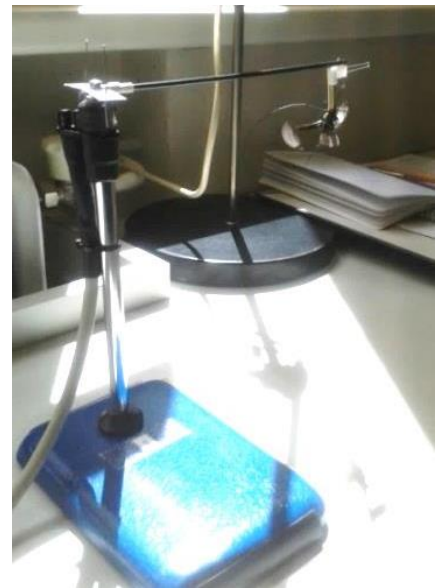


Abb. 3-4 *Monochamus* im Flug an Flugmühle

3.2.2 Versuchsablauf

Vor dem Flug wurde ein Testkäfer aus dem Zuchtbehältnis genommen und auf einer Laborwaage (Sartorius) abgewogen. Danach wurde eine speziell angefertigte Kartonhalterung am Pronotum fixiert (dazu wurde *Patex Kraft Kleber Classic* verwendet).

Nach kurzer Trockenzeit wurde der Käfer mittels Insektenstecknadeln an der Schaumstoffhalterung der Flugmühle fixiert (siehe Abb. 3-5). Der Kleber wurde sparsam und vorsichtig aufgetragen, um ein Verkleben der Elytren zu verhindern. Die Halterung durfte zudem nur am Pronotum platziert werden, da eine schiefe Positionierung die Öffnung der Elytren behindert hätte. Dadurch wäre dem Testkäfer das Fliegen erschwert bzw. unmöglich gemacht worden.

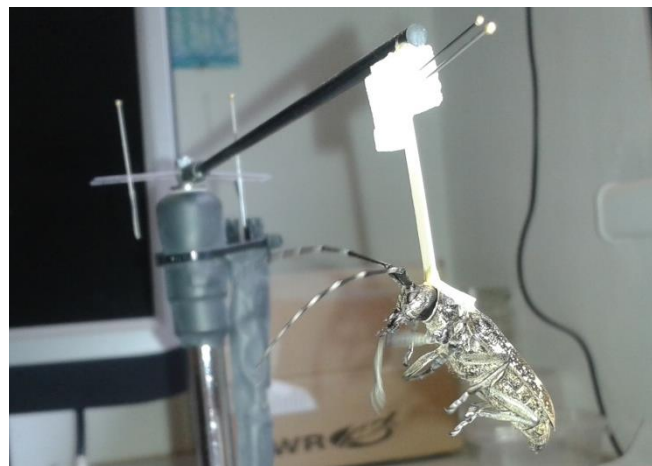


Abb. 3-5 Kartonhalterung zur Montage eines Testkäfers an der Flugmühle, Seitenansicht

Da der fehlende Bodenkontakt alleine nicht ausreicht, um eine Flugbewegung bei Insekten auszulösen, wurde der Käfer durch frontales Anblasen mit Hilfe eines kleinen Handventilators zum Fliegen bewegt.

Nach Eintreten des Käfers in die Flugphase verblieb er solange an der Mühle bis er stoppte. Zeitpunkt des Flugstarts und Flugstopps wurden gemäß der Zeitangabe des C++ Programmes notiert.

Nach einem Stopp folgte eine erneute Startmotivation unter Einsatz des Ventilators. War diese erfolglos, wurde der Käfer von der Flugmühle genommen. Die Kartonhalterung wurde durch leichtes Ziehen vom Pronotum entfernt, der Käfer neuerlich gewogen und versorgt.

Durch das Abwiegen der Testkäfer vor und nach dem Flug sollte eine mögliche Gewichtsreduktion durch die Flugaktivitäten aufgezeigt werden.

Die Versuche fanden parallel an zwei Flugmühlen statt. Volle Deckenbeleuchtung im Raum und zusätzliche Lichtquellen in Form von Schreibtischlampen waren während der gesamten Versuchsdurchführung im Einsatz.

Die Flugmühlversuche wurden mittels eines Flugjournals protokolliert. Festgehalten wurden darin wichtige Käferdaten und Angaben zu Flugmühlen und Versuchsdurchführung (z.B. Käferart, Käfernummer, Geschlecht, Start- und Endzeitpunkt des Fluges, Nummer der Flugmühle).

Während eines Versuchsablaufes wurden zusätzlich Flugversuche und Startversuche ohne Flugreaktionen notiert. Der Flugradius (konstanter Wert) wurde einmalig protokolliert, um im Zuge der Auswertungen auf Flugdistanz und -geschwindigkeit rückschließen zu können.

Auch die aktuellen Wetterverhältnisse des Versuchstages sowie die Temperatur im Versuchslabor wurden im Flugjournal dokumentiert. Dazu wurden die im Entomologie-Labor vorherrschenden Temperaturen mit einem EL-USB2 Datenlogger stündlich aufgezeichnet. Im Versuchszeitraum bewegte sich die Temperatur zwischen 23,0 °C und 27,5 °C.

Von allen zur Verfügung stehenden Testkäfern wurde nach Beendigung der Flugmühlversuche auch die Länge der Elytren erhoben. Dazu wurde ein Lineal in der Flügelmitte der Käfer angesetzt, wonach die gesamte Flügellänge inklusive Pronotum gemessen wurde. Die Angabe der Flügellänge erfolgt dabei in Zentimetern.

3.2.3 Grundlegende Klassifikationen

Flüge und Flugversuche wurden folgendermaßen klassifiziert:

- **Flugversuch:** heftiges Flügelschlagen ohne wirkliche Fortbewegung bzw. mehrmaliges Öffnen der Elytren
- **kurzer Flug:** Flugdauer von weniger als drei Minuten
- **Flug:** Käfer fliegt länger als drei Minuten und ohne jegliche Art der Unterbrechung.

Damit ein Testkäfer zum Anteil der fliegenden Käfer gerechnet wurde, musste er an mindestens drei Tagen des Versuchszeitraums einen Flug durchführen. Die Auswertung der Flugklassen erfolgte durch prozentuelle Berechnung und wurde mit Hilfe von Kreisdiagrammen visualisiert (siehe 4. Ergebnisse).

3.3 Datenanalyse

3.3.1 Berechnung der Flugleistung

Die Halbumdrehungen der Flugmühle mussten auf vollständige Umdrehungen umgerechnet werden, wozu im Minutenabstand eine Übersicht der Halbumdrehungen zusammengestellt und durch zwei dividiert wurde ($Ganzumkehrung = Halbumkehrung / 2$).

Zur Berechnung der Flugdistanz wurde der Flugradius (bei allen Flugmühlversuchen 15,3 cm) herangezogen. Aus der Berechnung des Kreisumfangs (0,961m) ergibt sich in Multiplikation mit der Zahl der Umdrehungen die zurückgelegte Flugdistanz ($Distanz [m] = Umdrehungen * 0,961$).

Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit resultiert aus der Flugdistanz dividiert durch die Flugdauer ($Geschwindigkeit \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{Distanz[m]}{Dauer [s]}$).

3.3.2 Statistische Berechnung

Für die statistische Berechnung wurden die Programme *Microsoft Excel 2010* und *IBM SPSS Statistics Version 21* verwendet. Die Berechnungen wurden getrennt nach Käferart, Geschlecht und Herkunft (Labor oder Freiland) durchgeführt.

Für jeden Käfer, der an der Flugmühle einen Flug tätigte, wurden Parameter aus jedem Flug errechnet. Daraus wurden Mittelwerte über die gesamte Lebenszeit dieses Käfers gebildet. Dieser Mittelwert pro Käfer stellte die Grundlage für weitere Berechnungen dar. Ebenfalls wurde der dazugehörige Standardfehler kalkuliert.

Zusätzlich wurden die maximale und minimale Flugkapazität sowie der Median berechnet und in Form von Boxplots dargestellt.

Zur Überprüfung eines signifikanten Unterschieds der Geschlechter hinsichtlich ihres Flugverhaltens wurde auf den Chi-Quadrat-Test zurückgegriffen. Mittels SPSS wurde dafür zunächst eine Kreuztabelle angelegt und analysiert. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs wurde der exakte Test nach Fisher als geeignetes statistisches Verfahren gewählt.

Um etwaige Zusammenhänge zwischen den morphologischen Käfermerkmalen (Käfergewicht, Flügellänge) und der erbrachten Flugleistung (Flugdistanz, Flugzeit, Fluggeschwindigkeit) aufzuzeigen wurden Korrelationsanalysen angestellt. Zusätzlich wurden Korrelationsberechnungen durchgeführt, um Gewichtsveränderungen in Abhängigkeit von der Flugdistanz, sowie den Einfluss der Temperatur auf die Flugleistung zu analysieren. Mittels SPSS wurde dazu jeweils der Korrelationskoeffizient (r) nach Pearson berechnet.

Zur komparativen Gegenüberstellung der Flugparameter von Männchen und Weibchen innerhalb einer Käferart wurde ein Mittelwertvergleich zweier unabhängiger Stichproben (t-Test nach Student) durchgeführt. Die dazugehörige Datenanalyse der Mittelwerte wurde mit Hilfe von SPSS ausgeführt. Zusätzlich wurden auch Labor- und Freilandkäfer von *M. sartor* mit Hilfe dieses Verfahrens verglichen.

4 Ergebnisse

4.1 Anteil fliegender und nicht fliegender Käfer

Zur Differenzierung von fliegenden und nicht fliegenden Käfern sind die grundlegenden Definitionen von Flug, kurzer Flug und Flugversuch notwendig (siehe 3.2.3). Zum Anteil der fliegenden Käfer zählen nur diejenigen, die länger als drei Minuten und ohne jegliche Art der Unterbrechung geflogen sind, und dies im Versuchszeitraum an mindestens 3 Tagen wiederholt haben. All jene Käfer, die kurze Flüge, Flugversuche, oder keine Reaktion zeigten, wurden zum Anteil der nicht fliegenden Käfer gezählt.

4.1.1 *Monochamus sartor*

59,3% (16 von 27) der getesteten *M. sartor* Individuen unternahmen zumindest einen Flug von mehr als 3 Minuten und gelten daher als Flieger. Unter den Männchen von *M. sartor* flogen zwei Drittel, unter den Weibchen knapp mehr als die Hälfte (siehe Abb. 4-1). Die Kreisdiagramme lassen somit vermuten, dass vor allem die Käfermännchen zum Anteil der fliegenden Käfer zählen. Gemäß den Ergebnissen des exakten Tests nach Fisher unterscheidet sich der Anteil von fliegenden Käfern bei Männchen und Weibchen jedoch nicht signifikant ($\chi^2=0,307$, $p=0,692$). Es besteht somit kein Unterschied im Flugverhalten zwischen den Geschlechtern.

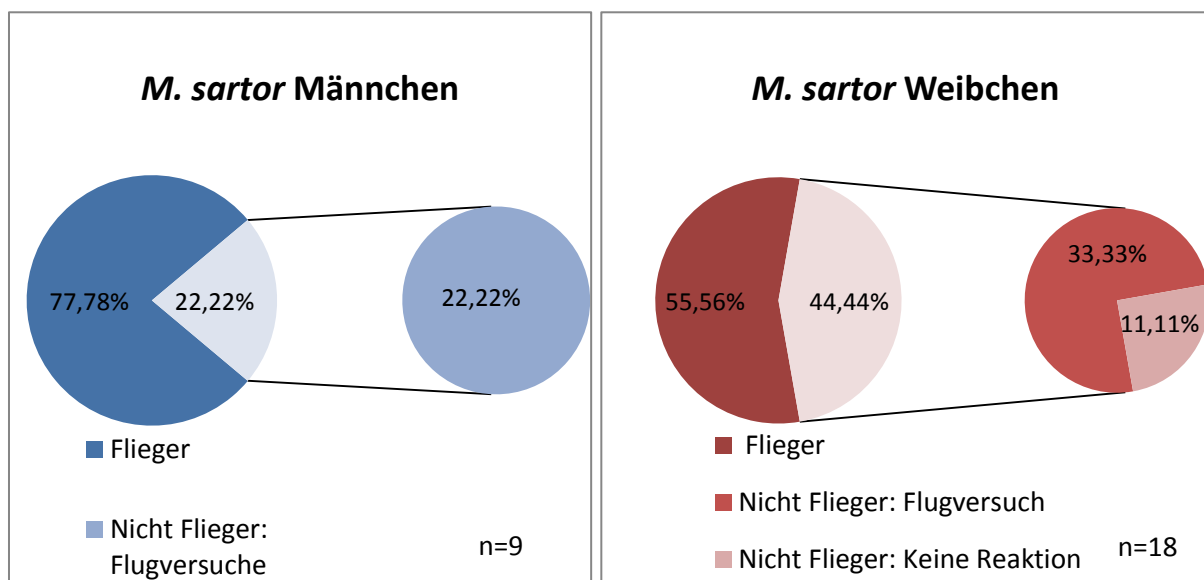


Abb. 4-1 Anteil fliegender und nicht fliegender *M. sartor* Käfer, getrennt nach Geschlecht (in blau: Männchen, rot: Weibchen)

Die Klassifikation gemäß der grundlegenden Definitionen aus 3.2.3 ergab für die weitere Unterteilung des nicht fliegenden Käferanteils bei *M. sartor* Folgendes: Von den männlichen Exemplaren unternahmen alle einen Flugversuch, von den weiblichen zeigten insgesamt 11,1% keinerlei Reaktion an den Flugmühlen.

Von den männlichen Käfern aus dem Freiland zählen 100% zu den Fliegern, von den weiblichen 50%. Unter den Käfern aus Laborzucht fliegen 40% der weiblichen und 50% der männlichen Exemplare (siehe Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Gesamtdarstellung der fliegenden und nicht fliegenden Käfer von *M. sartor*, differenziert nach Geschlecht (M=männlich F=weiblich) und Herkunft (Labor, Freiland)

<i>M. sartor</i>	Labor		Freiland	
	M (n=4)	F (n=10)	M (n=5)	F (n=8)
fliegender Anteil	50%	42,86%	100%	50%
nicht fliegender Anteil	50%	28,57%	-	50%

4.1.2 *Monochamus sutor*

44,4% (4 von 9) der getesteten *M. sutor* Individuen unternahmen zumindest einen Flug von mehr als 3 Minuten und gelten daher als Flieger. Der Großteil aller *M. sutor* Testkäfer zählt somit zum nicht fliegenden Anteil, wobei die Männchen einen höheren Anteil an fliegenden Käfern aufweisen (Abb. 4-2). Drei Viertel aller getesteten Männchen zählen zur Gruppe der fliegenden Individuen, bei den Weibchen befindet sich der Prozentsatz bei 20%. Der Anteil von fliegenden Käfern zwischen Männchen und Weibchen unterscheidet sich aber auch bei *M. sutor*, gemäß den Ergebnissen des exakten Tests nach Fisher, nicht signifikant ($\chi^2=2,723$, $p=0,206$). D. h. auch diese Käferart zeigt keinen Unterschied im Flugverhalten zwischen den Geschlechtern.

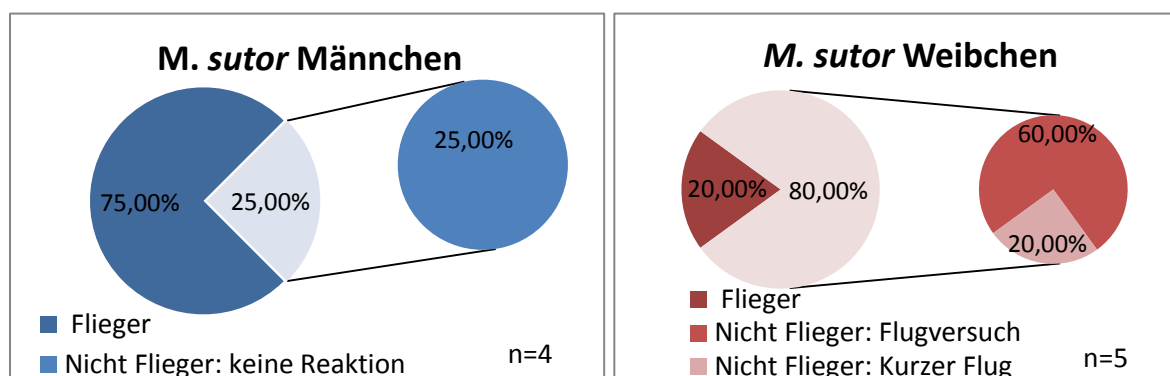


Abb. 4-2 Anteil fliegender und nicht fliegender *M. sutor* Käfer, getrennt nach Geschlecht (blau: Männchen, rot: Weibchen)

Unter den männlichen Nichtfliegern zeigten 100% keinerlei Flugreaktion. Von der Gesamtzahl der weiblichen Nichtflieger unternahmen 60% einen Flugversuch und 20% einen kurzen Flug.

100% der männlichen Laborkäfer von *M. sutor* zählen zu den Fliegern. Bei den Käfern aus dem Freiland sind 25% der weiblichen und 66,7% der männlichen Käfer Flieger. Allerdings ist bei *M. sutor* die geringere Anzahl an zur Verfügung stehenden Testkäfern zu berücksichtigen.

Tabelle 4-2: Gesamtdarstellung der fliegenden und nicht fliegenden Käfer von *M. sutor*, differenziert nach Geschlecht (M= männlich F=weiblich) und Herkunft (Labor, Freiland)

<i>M. sutor</i>	Labor		Freiland	
	M (n=1)	F (n=1)	M (n=3)	F (n=4)
fliegender Anteil	100%	-	66,67%	25%
nicht fliegender Anteil	-	100%	33,34%	75%

4.2 Flugparameter

Der Fokus der Ergebnisauswertung lag auf folgenden Flugparametern: Flugdistanz, Flugzeit und Fluggeschwindigkeit. Diese wurden nach Käferart und Geschlecht differenziert berechnet.

4.2.1 Beispiele individueller Flugleistung

Als Beispiele für individuelle Flugleistungen dienen zwei *M. sutor* Weibchen (MsaF1, MsaF13) und zwei *M. sutor* Männchen (MsaM5, MsaM10). Innerhalb der Versuchsreihe zählten diese zum Anteil der fliegenden Käfer.

Anhand der grafischen Darstellungen in Abb. 4-3 zeigt sich, dass bei zunehmender Flugdistanz eine tendenzielle Abnahme der Fluggeschwindigkeit gegeben ist.

Diese vier Käfer flogen zwischen 19 und 45 min mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,31 bis 1,39 m/s. Die dabei zurückgelegten Flugdistanzen lagen zwischen 839 und 1587 m.

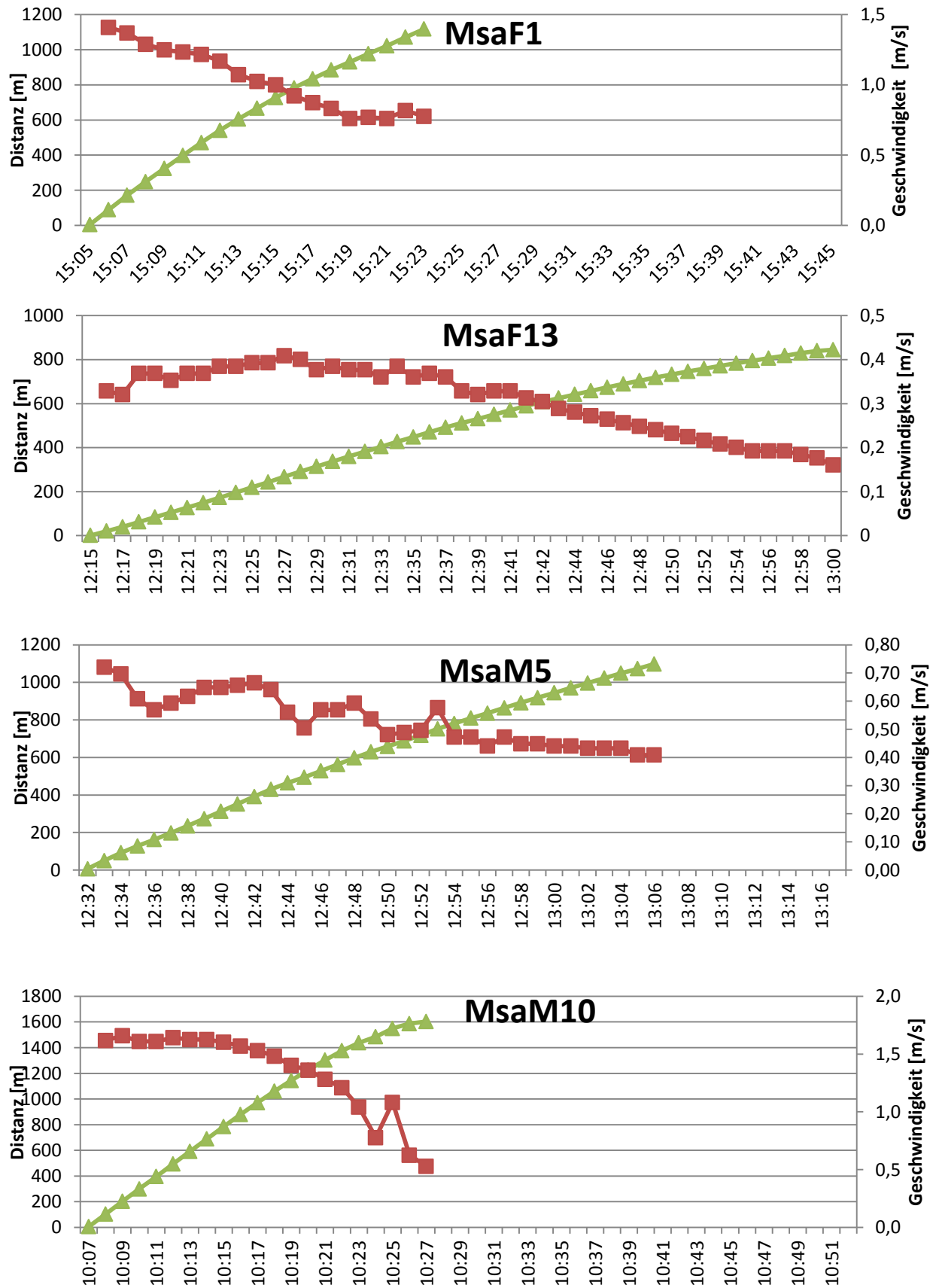


Abb. 4-3 beispielhafte Flugverläufe von MsaF1 am 29. Juli, MsaF13 am 17. Juli, MsaM5 am 10. Juli und MsaM10 am 6. August 2014. Die Geschwindigkeit ist in rot und die kumulierte Distanz in grün abgebildet.

4.2.2 *Monochamus sartor*

Von den 27 zur Verfügung stehenden Exemplaren von *M. sartor* sind 5 Käfer kein einziges Mal an einer der Flugmühlen geflogen.

Die Mittelwerte der Distanz pro Flug bei *M. sartor* liegen zwischen 700 und 810m (Tabelle 4-3 und Abb. 4-4). Die Flugzeit betrug bei beiden Geschlechtern im Mittel knapp 16 min bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,8 m/s.

Tabelle 4-3: Mittelwerte sowie Standardfehler der Flugdistanz, -zeit und-geschwindigkeit von allen geflogenen *M. sartor* Testkäfern

Geschlecht	Distanz [m]	Zeit [min]	Geschwindigkeit [m/s]
Männlich (n=8)	810,37 $\pm$ 97,26	16,15 $\pm$ 1,32	0,88 $\pm$ 0,12
Weiblich (n=14)	699,82 $\pm$ 82,60	15,86 $\pm$ 1,43	0,79 $\pm$ 0,07

Die mittlere Flugdistanz von Männchen und Weibchen unterscheidet sich, gemäß dem Ergebnis des Mittelwertvergleichs, nicht signifikant ($t=0,838$, $p=0,412$).

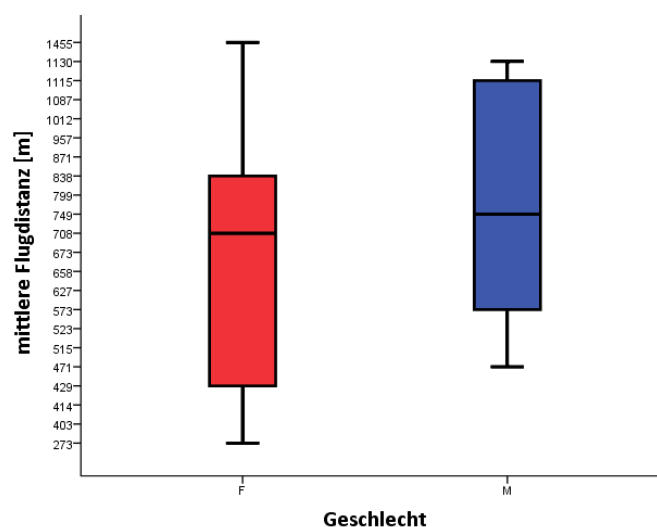


Abb. 4-4 Mittlere Flugdistanz aller geflogenen *M. sartor*. F=weiblich (n=14) in rot und M=männlich (n=8) in blau.

Die Mittelwerte der Flugzeit aller geflogenen *M. sartor* Individuen stellt Abb. 4-5 dar. Bei Betrachtung der Minimalwerte ist ein Leistungsunterschied der Geschlechter zu erkennen. Mehr Weibchen zeigten eine Tendenz zu kürzeren Flügen, wobei der Median sich jedoch dem der männlichen Exemplare annähert. Der Mittelwertvergleich zeigt keinen signifikanten Unterschied ($t= 0,241$, $p=0,812$)

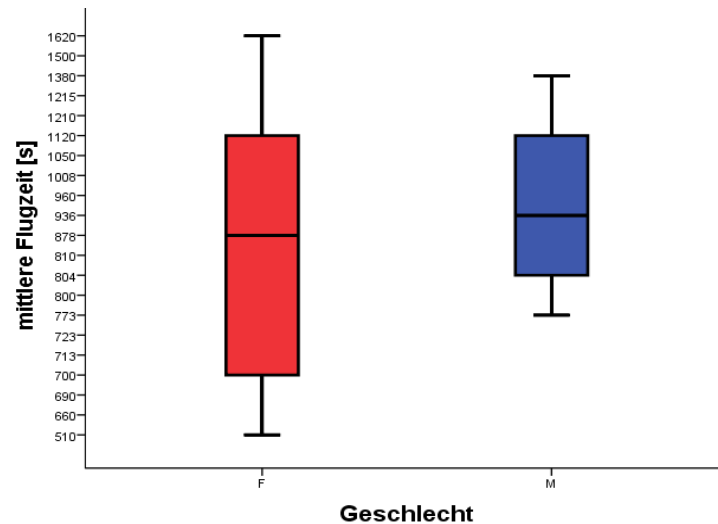


Abb. 4-5 Mittlere Flugzeit aller geflogenen *M. sartor*. F=weiblich (n=14) in rot und M=Männlich (n=8) in blau.

Für die Minimal- und Maximalwerte sowie Mediane ist bezüglich der mittleren Fluggeschwindigkeit nach Geschlechtern ein kleiner Unterschied zu erkennen (Abb. 4-6). Allerdings weisen die männlichen Exemplare keine signifikant höhere mittlere Fluggeschwindigkeit auf als die weiblichen ($t=0,718$, $p=0,481$).

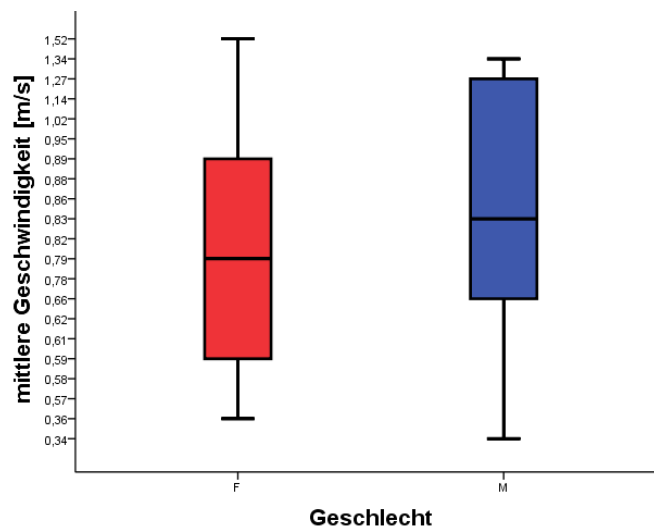


Abb. 4-6 Mittlere Geschwindigkeit aller geflogener *M. sartor*. F=weiblich (n=14) in rot und M=Männlich (n=8) in blau.

Trotz der numerisch unterschiedlichen Mittelwerte von Freiland- und Laborkäfern ergab die statistische Auswertung der Mittelwerte aller Flugparameter keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden (Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Mittelwerte und Standardfehler der Flugdistanz, -zeit und-geschwindigkeit von allen geflogenen *M. sartor* Käfern aus Laborzucht und aus Lockstofffallen (M=männlich F=weiblich) Ergebnisse des Mittelwertvergleichs (t-Test nach Student)

<i>M. sartor</i>	Labor			Freiland			Labor vs. Freiland	
	M (n=3)	F (n=7)	Σ (n=10)	M (n=5)	F (n=7)	Σ (n=12)	M	F
Distanz [m]	621,67 ±125,36	550,07 ±57,88	571,55 ±52,26	923,58 ±114,99	827,60 ±138,48	867,59 ±91,15	t=0,738 p=0,469	t=1,218 p=0,238
Zeit [min]	18,92 ±2,82	16,44 ±1,82	17,19 ±1,49	14,48 ±0,80	15,27 ±2,33	14,94 ±1,36	t=-1,216 p=0,238	t=-0,351 p=0,729
Geschwindigkeit [m/s]	0,54 ±0,10	0,59 ±0,05	0,57 ±0,04	1,09 ±0,11	0,98 ±0,09	1,03 ±0,07	t=1,824 p=0,083	t=1,814 p=0,085

4.2.3 *Monochamus sutor*

Die Anzahl der *M. sutor* Testkäfer war mit 9 Stück gering. Zwei dieser Käfer flogen kein einziges Mal an einer der Mühlen. Auf Datenbasis der fliegenden Käfer wurden folgende Flugparameter errechnet.

Hinsichtlich der mittleren Flugdistanz (siehe Tabelle 4-5) fallen die Ergebnisse der männlichen Käfer nahezu um das Dreifache besser aus als jene der weiblichen. Auch die Flugdauer war im Schnitt doppelt so lang wie die der Weibchen. Die Geschwindigkeitswerte unterscheiden sich hinsichtlich des Mittelwertes geringfügig.

Tabelle 4-5: Mittelwerte und Standardfehler der Flugdistanz, -zeit und-geschwindigkeit von allen geflogenen *M. sutor* Testkäfern

Geschlecht	Distanz [m]	Zeit [min]	Geschwindigkeit [m/s]
Männlich (n=3)	1.433,07 ±599,16	21,97 ±7,45	0,94 ±0,19
Weiblich (n=4)	482,07 ±176,21	10,39 ±3,58	0,79 ±0,07

Aus den Boxplots der *M. sutor* Testkäfer ist bei den männlichen Exemplaren ein höherer Mittelwert der Flugdistanz zu erkennen (Abb. 4-7). Zwischen den Minimal- und Maximalwerten sowie den Medianen der Geschlechter ist ein Unterschied zu sehen, der jedoch gemäß Mittelwertvergleich nicht signifikant ist (t= 1,752, p=0,140).

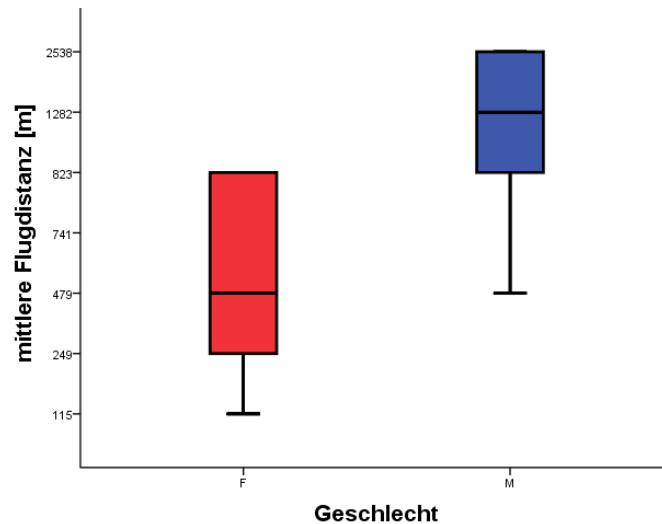


Abb. 4-7 Mittlere Flugdistanz aller geflogener *M. sutor*. F=weiblich (n=4) in rot und M=männlich (n=3) in blau

Obwohl zu erkennen ist, dass die männlichen *M. sutor* Testkäfer im Stande waren, länger zu fliegen, zeigen die Resultate des Mittelwertvergleichs diesbezüglich keinen signifikanten Geschlechterunterschied ($t=1,537$, $p=0,185$) (Abb. 4-8).

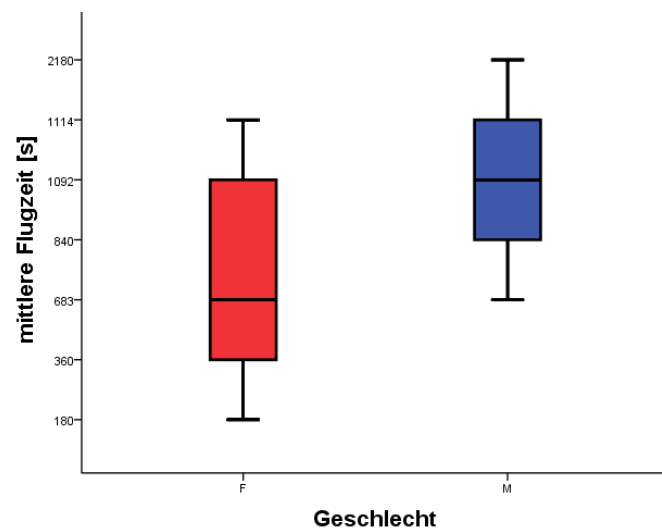


Abb. 4-8 Mittlere Flugzeit aller geflogener *M. sutor*. F=Weibchen (n=4) in rot und M=männlich (n=3) in blau.

Abb. 4-9 zeigt die höhere durchschnittliche Fluggeschwindigkeit der Männchen. Beim Mittelwertvergleich findet sich aber auch hier kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern ($t=0,862$, $p=0,428$).

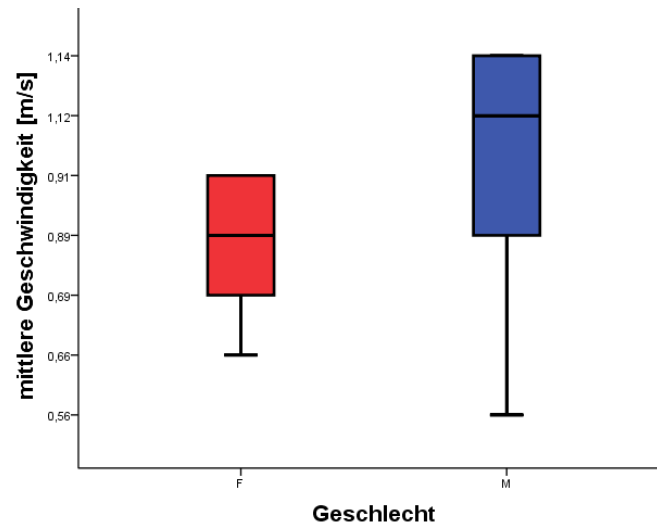


Abb. 4-9 Mittlere Geschwindigkeit aller geflogenen *M. sutor*. F=Weibchen (n=4) in rot und M=Männchen (n=3) in blau.

4.3 Flugleistung über Lebenszeit

Die Darstellung der Flugleistung über Lebenszeit erfolgt auf zwei verschiedenen Wegen. Zum einen wurde je Käfer über die gesamte Versuchsreihe die kumulierte Flugdistanz berechnet und in Form von Säulendiagrammen dargestellt.

Zum anderen wurden nur jene Käfer berücksichtigt, die als Laborkäfer geschlüpft waren. Denn nur für diese Käfer sind exakter Schlupf- und Todeszeitpunkt bekannt. Die Flugleistung wird im Fall der Lebenszeitdarstellungen für beide Darstellungswege als zurückgelegte Flugdistanz definiert.

4.3.1 *Monochamus sartor*

Abb. 4-10 zeigt Säulendiagramme der gesamten Flugdistanzen aller geflogenen *M. sartor* Käfer. Über die gesamte Versuchsreihe hinweg waren die Weibchen im Stande, eine Maximaldistanz von über 8 km innerhalb von 12 Flugtagen zu fliegen, wohingegen die Männchen eine Maximaldistanz von 7 km innerhalb von 8 Flugtagen erreichten.

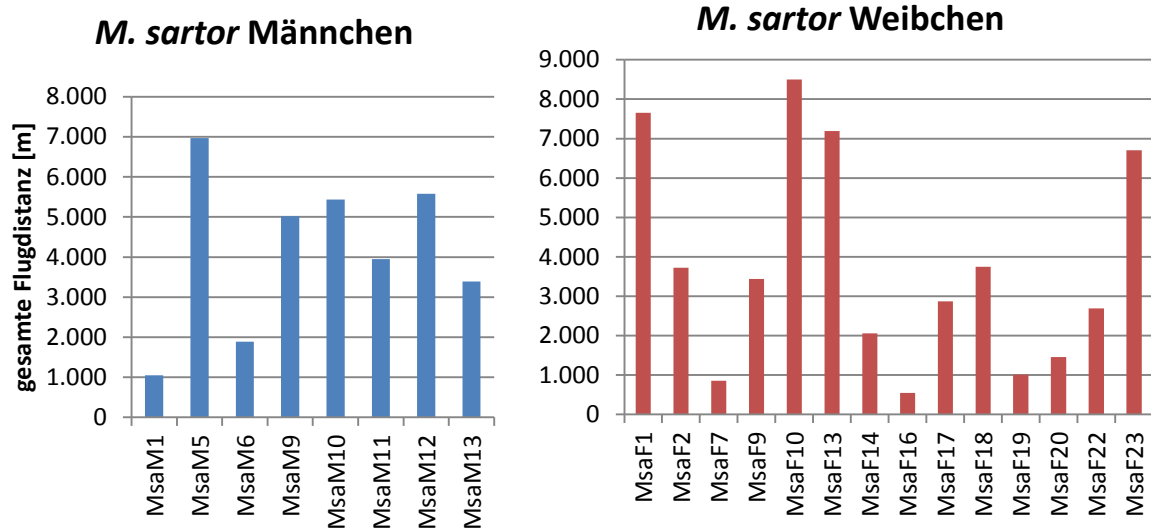


Abb. 4-10 summierte Flugdistanz über die gesamte Lebenszeit von allen geflogenen *M. sartor* Labor- und Freilandkäfern (in blau: Männchen in rot: Weibchen)

Nur für die 10 fliegenden Laborkäfer (3 männlich, 7 weiblich) unter den *M. sartor* Exemplaren kommt eine Darstellung der Lebenszeitberechnungen in Frage. Auf den unten gezeigten Säulendiagrammen repräsentiert die x-Achse das Datum der Flugtage und die y-Achse die jeweils am Flugtag erreichte Flugdistanz in Metern. Zusätzlich werden eine Trendlinie und das Bestimmtheitsmaß ($=R^2$) angegeben, um eine mögliche Änderung der Flugdistanz im Lauf des Käferlebens darzustellen.

Wie die Diagramme für die weiblichen *M. sartor* Laborkäfer (Abb. 4-11 bis Abb. 4-17) zeigen, ist mit Ausnahme eines Käfers die Flugleistungstendenz mit zunehmenden Käferalter rückläufig. Somit ist keine Steigerung der Flugleistung im Laufe eines weiblichen Laborkäferlebens gegeben.

MsaF1

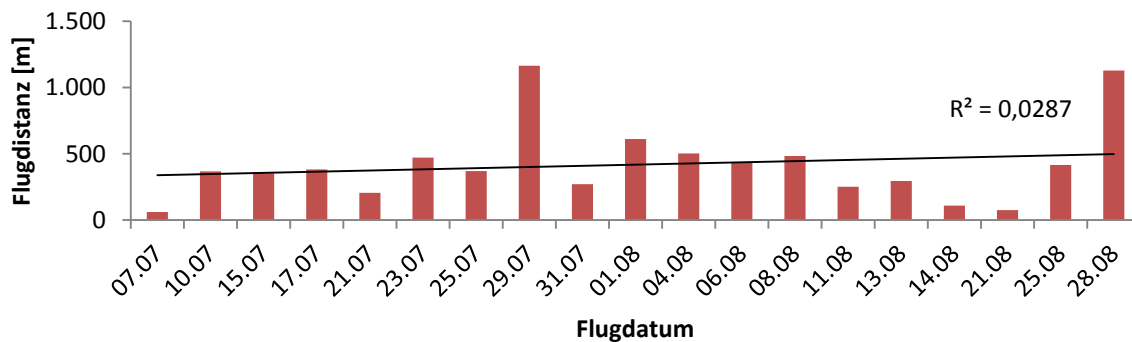


Abb. 4-11 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaF1

MsaF2

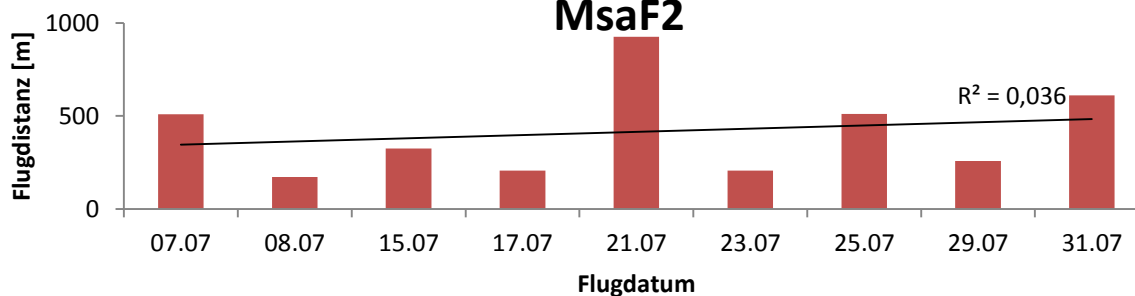


Abb. 4-12 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaF2

MsaF7

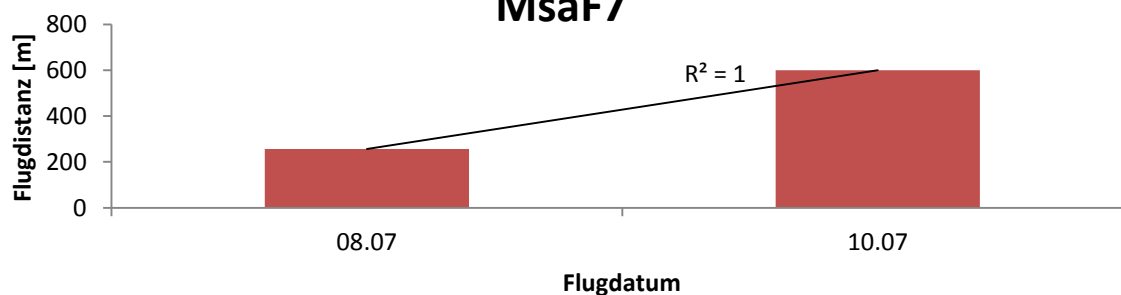


Abb. 4-13 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaF7

MsaF9

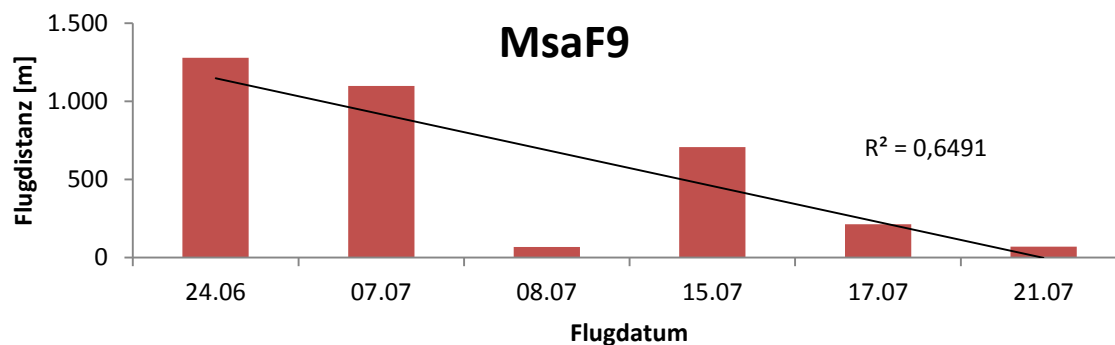


Abb. 4-14 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaF9

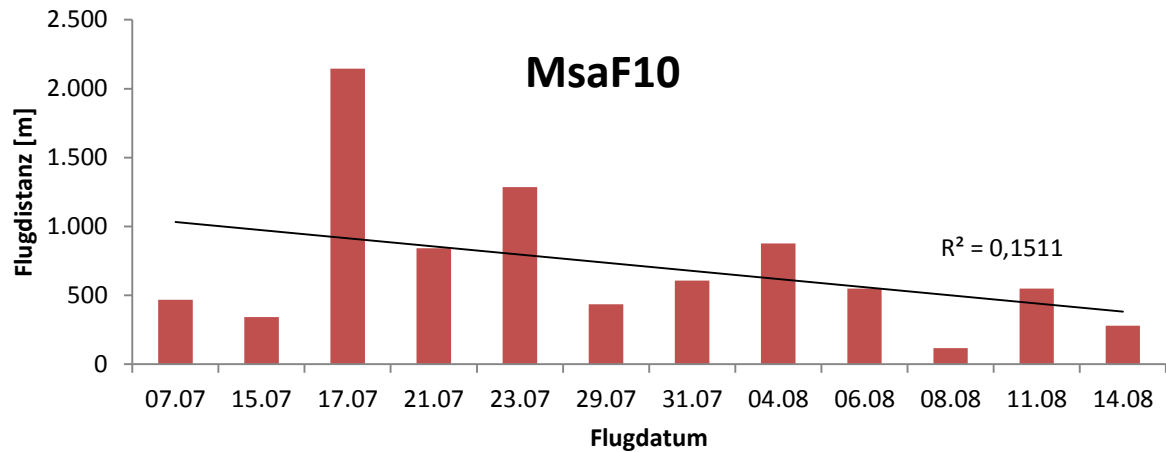


Abb. 4-15 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaF10

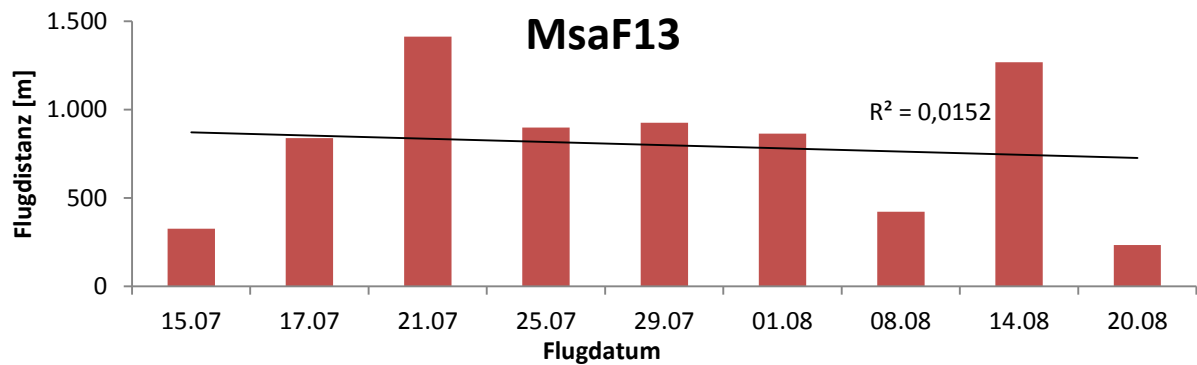


Abb. 4-16 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaF13

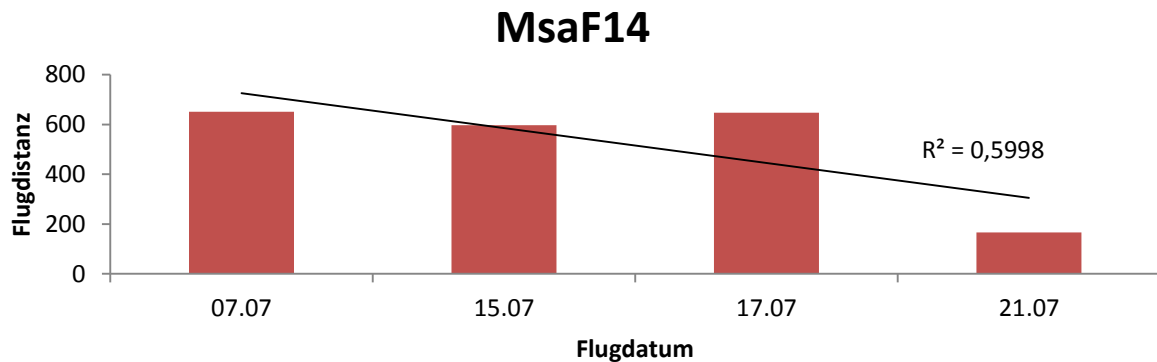


Abb. 4-17 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaF14

Auch bei den drei männlichen Laborkäfern (Abb. 4-18 bis Abb. 4-20) ist ein negativer Trend bemerkbar. Bei den Testkäfern ist überwiegend ein linearer Zusammenhang zwischen abnehmender Flugleistung und zunehmendem Käferalter ersichtlich.

MsaM1

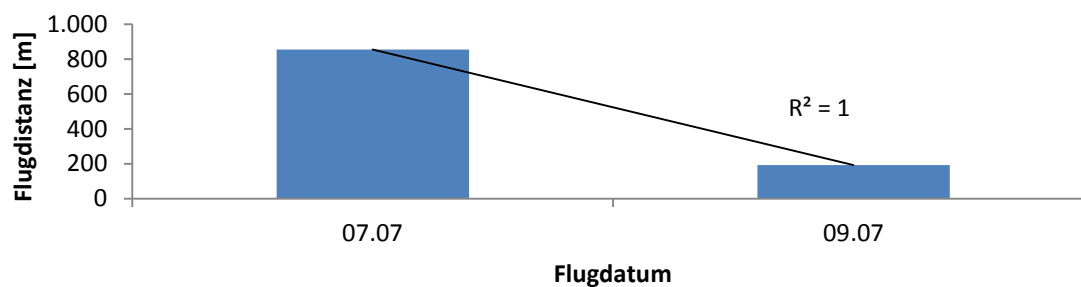


Abb. 4-18 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaM1

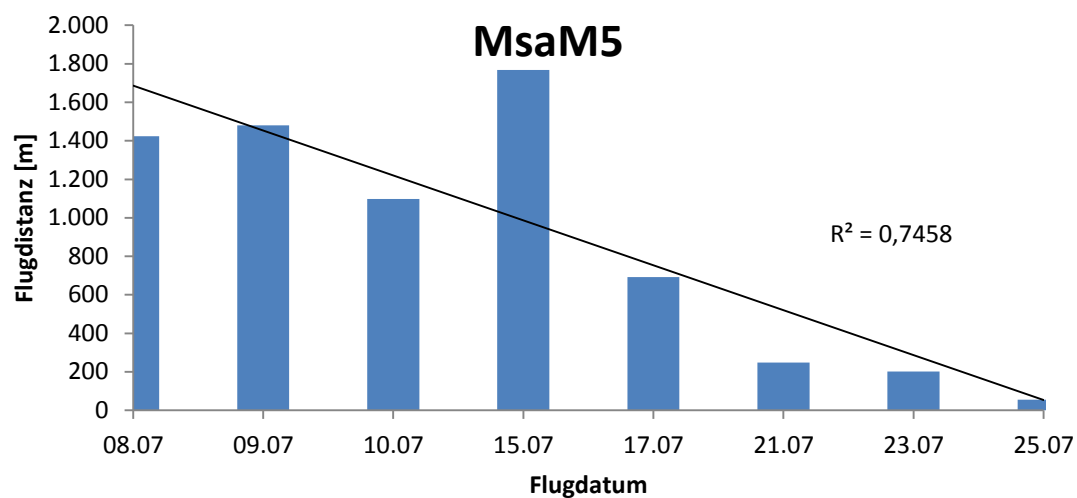


Abb. 4-19 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaM5

MsaM6

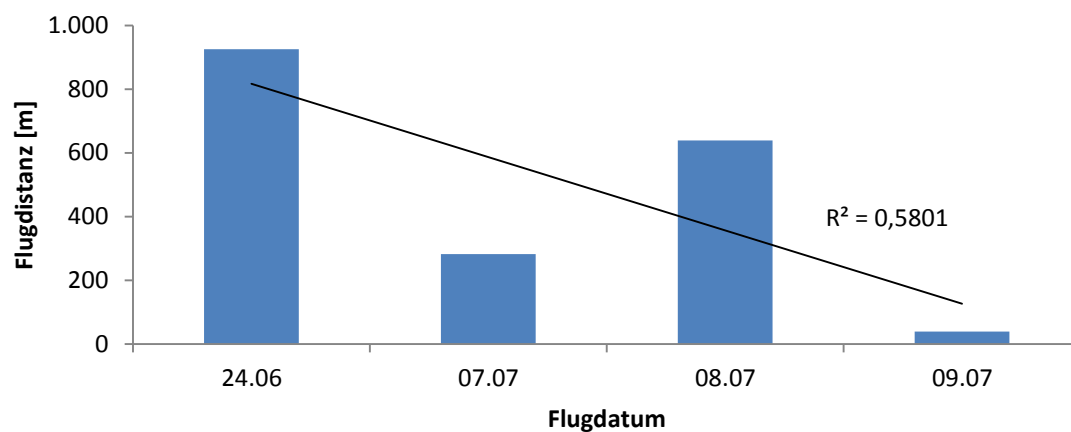


Abb. 4-20 Am jeweiligen Flugtag zurückgelegte Distanz von MsaM6

4.3.2 *Monochamus sutor*

Die Säulendiagramme von Abb. 4-21 lassen erkennen, dass die männlichen *M. sutor* Käfer im Zuge der Versuchsreihe mit rund 7 km in der Lage waren, weiter zu fliegen als die weiblichen (rund 6 km). Die Maximaldistanz der Männchen wurde innerhalb von 3 Flugtagen, jene der Weibchen innerhalb von 7 Flugtagen erreicht.

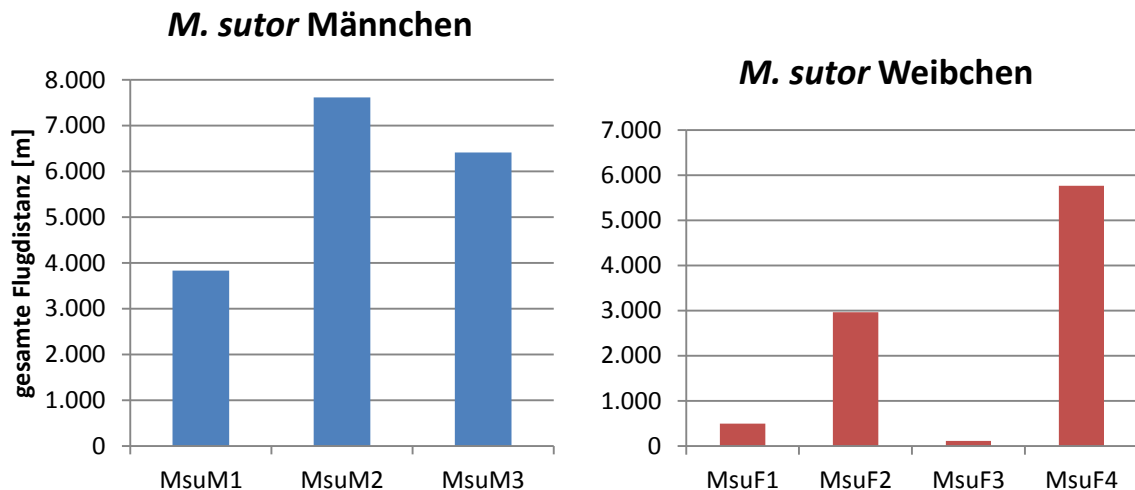


Abb. 4-21 summierte Flugdistanz über die gesamte Lebenszeit von allen geflogenen *M. sutor* Labor- und Freilandkäfern (in blau: Männchen in rot: Weibchen)

Da von *M. sutor* nur zwei Laborkäfer zur Verfügung standen und diese eine nur sehr geringe Flugbereitschaft zeigten, ist eine Lebenszeitdarstellung ihrer Flugleistung nicht aussagekräftig. Daher wurde hier auf den zweiten Weg der Lebenszeitdarstellung verzichtet.

4.4 Morphologische Käfermerkmale und ihre Auswirkung auf die Flugleistung

M. sartor Käfer hatten gegenüber den *M. sutor* Exemplaren ein höheres mittleres Gewicht (Tabelle 4-6). Mögliche Auswirkungen des mittleren Käfergewichts und der Elytrenlänge werden im Folgenden detailliert dargestellt.

Tabelle 4-6: Mittelwerte und Standardfehler des Frischgewichtes und der Elytrenlänge von allen geflogenen *M. sartor* und *M. sutor* Käfern. (M=Männchen, F=Weibchen)

	Frishgewicht [mg]	Elytrenlänge [cm]
<i>M.sartor</i>		
M (n=8)	844,15 ±102,28	2,08 ±0,122
F (n=14)	883,61 ±49,03	2,00 ±0,073
Σ (n=22)	869,26 ±47,25	2,00 ±0,063

	Frischgewicht [mg]	Elytrenlänge [cm]
<i>M.sutor</i>		
M (n=3)	299,03 ±37,43	1,36 ±0,088
F (n=4)	252,92 ±28,40	1,40 ±0,065
Σ (n=7)	272,68 ±22,75	1,40 ±0,048

4.4.1 Einfluss des mittleren Käfergewichtes auf die Flugleistung

a) Flugdistanz

Abb. 4-22 stellt den Einfluss des mittleren Käfergewichtes auf die Flugdistanz der *M. sartor* Testkäfer dar. Käfer mit einem mittleren Gewicht von 1000 bis 1200 mg erreichten die höchste Flugleistung. Die berechneten Korrelationskoeffizienten zeigen, dass es bei den Männchen keinen Zusammenhang zwischen Flugleistung und Gewicht gibt, während bei den Weibchen ein leichter Zusammenhang besteht.

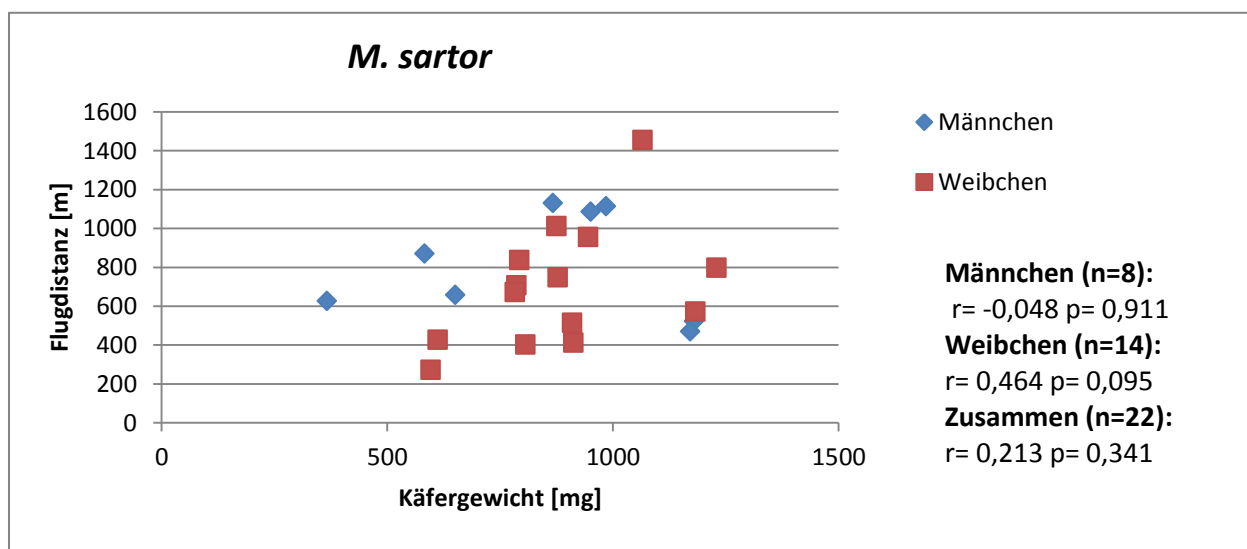


Abb. 4-22 Flugdistanz von *M. sartor* in Bezug auf das mittlere Käfergewicht, r=Korrelationskoeffizient nach Pearson

In Abb. 4-23 ist das Streudiagramm für *M. sutor* dargestellt. Bei alleiniger Betrachtung der Korrelationskoeffizienten kann ein Zusammenhang zwischen Flugdistanz und mittlerem Käfergewicht vermutet werden, die Signifikanzwerte zeigen allerdings das Gegenteil. Es kommt zu keiner größeren Flugleistung bei größerem Gewicht.

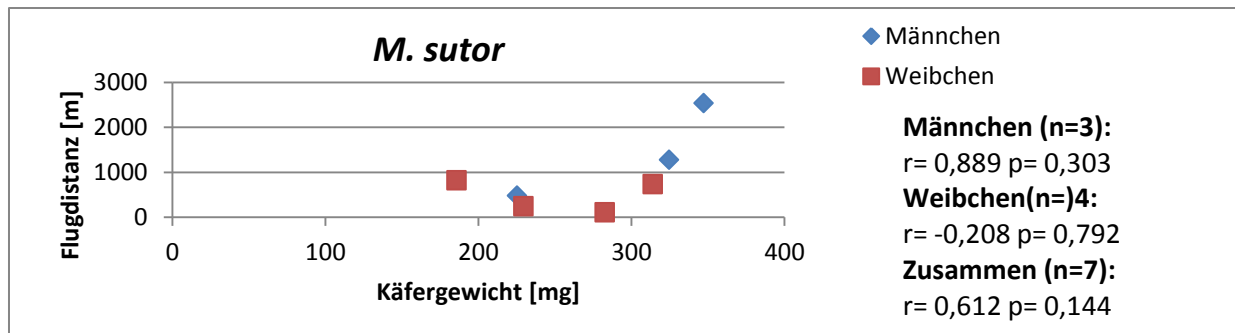


Abb. 4-23 Flugdistanz von *M. sutor* in Bezug auf das mittlere Käfergewicht, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

b) Flugzeit

In Abb. 4-24 wurde der Einfluss des mittleren Käfergewichts auf die Flugdauer festgehalten. Teilweise kommt es bei Männchen und Weibchen zu Überlappungen. Die längste Flugdauer weisen Käfer mit einem mittleren Gewicht von 1000 bis 1300 mg auf. Auch die berechneten Korrelationskoeffizienten sind nicht allzu niedrig, was auf einen signifikanten Zusammenhang rückschließen lässt.

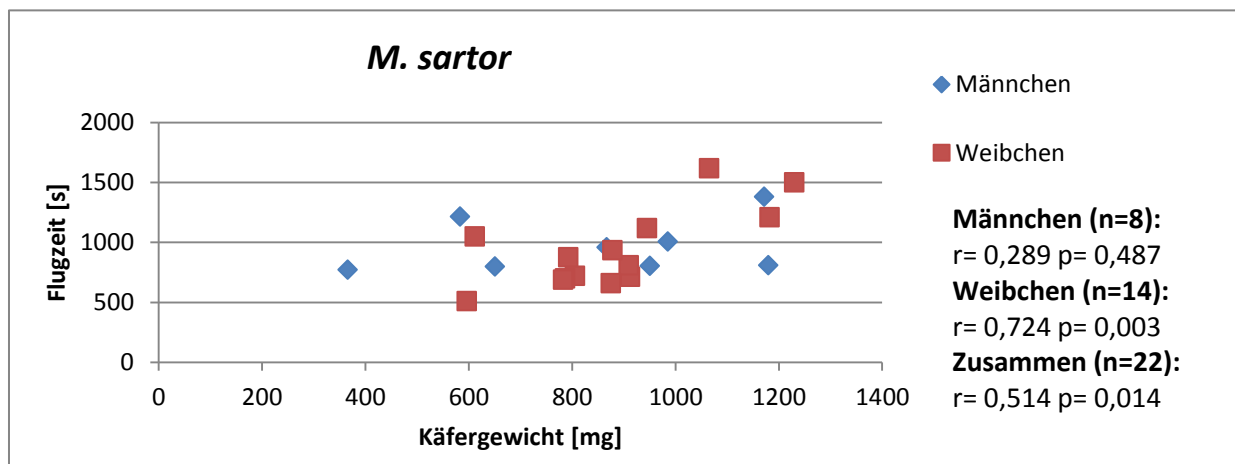


Abb. 4-24 Flugzeit von *M. sartor* in Bezug auf das mittlere Käfergewicht, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

Die Relation von Flugzeit und Käfergewicht verhält sich bei den *M. sutor* Testkäfern etwas anders (Abb. 4-25). Männliche, schwerere Käfer flogen länger als weibliche. Die berechneten Korrelationskoeffizienten bestätigen einen Zusammenhang von zunehmendem Käfergewicht und zunehmender Flugzeit bei Männchen. Allgemein ist bei den *M. sutor* Käfern ein mittlerer Zusammenhang zwischen mittlerem Käfergewicht und Flugdauer zu verzeichnen.

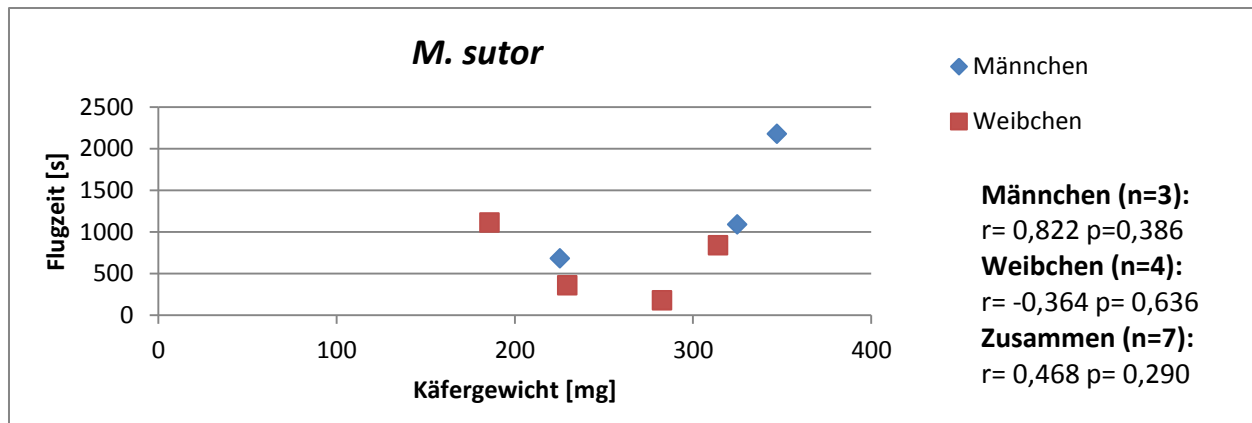


Abb. 4-25 Flugzeit von *M. sutor* in Bezug auf das mittlere Käfergewicht, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

c) Fluggeschwindigkeit

Abb. 4-26 zeigt das Streudiagramm für *M. sartor* Testkäfer zu mittlerem Käfergewicht und Fluggeschwindigkeit. Eine Überlappung der beiden Geschlechter ist selten zu erkennen. Maximale Fluggeschwindigkeiten wurden bei einem mittleren Käfergewicht im Bereich von 800 bis 1000 mg erzielt. Die berechneten Korrelationskoeffizienten zeigen keinen Zusammenhang zwischen dem mittleren Käfergewicht und der Fluggeschwindigkeit.

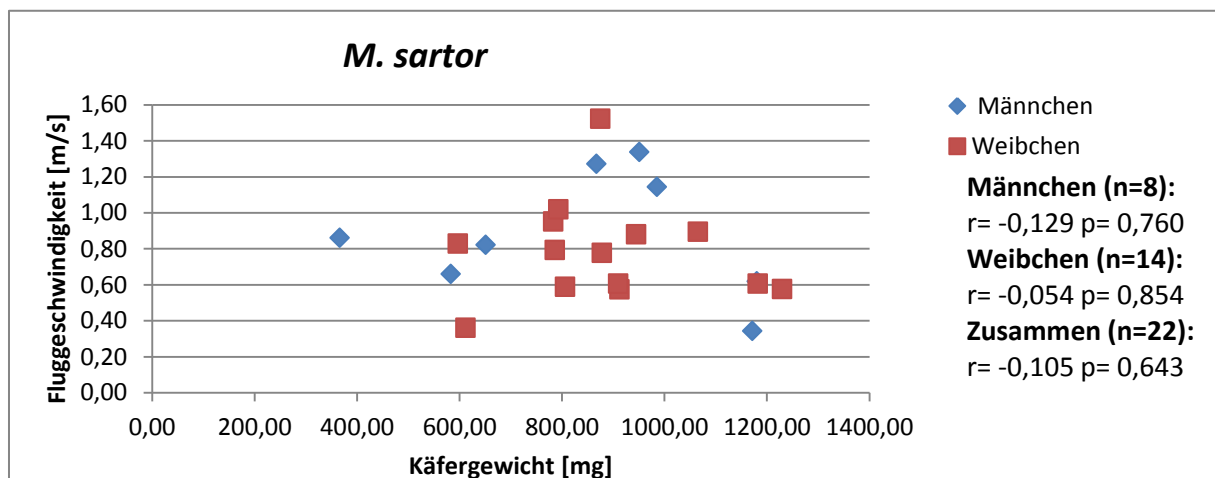


Abb. 4-26 Fluggeschwindigkeit von *M. sartor* in Bezug auf das mittlere Käfergewicht, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

In Abb. 4-27 ist eine höhere Fluggeschwindigkeit von *M. sutor* bei größerem Gewicht zu sehen, was scheinbar durch die berechneten statistischen Koeffizienten bestätigt wird. Allerdings ist die Anzahl und die Signifikanz zu gering, um eine klare Aussage treffen zu können.

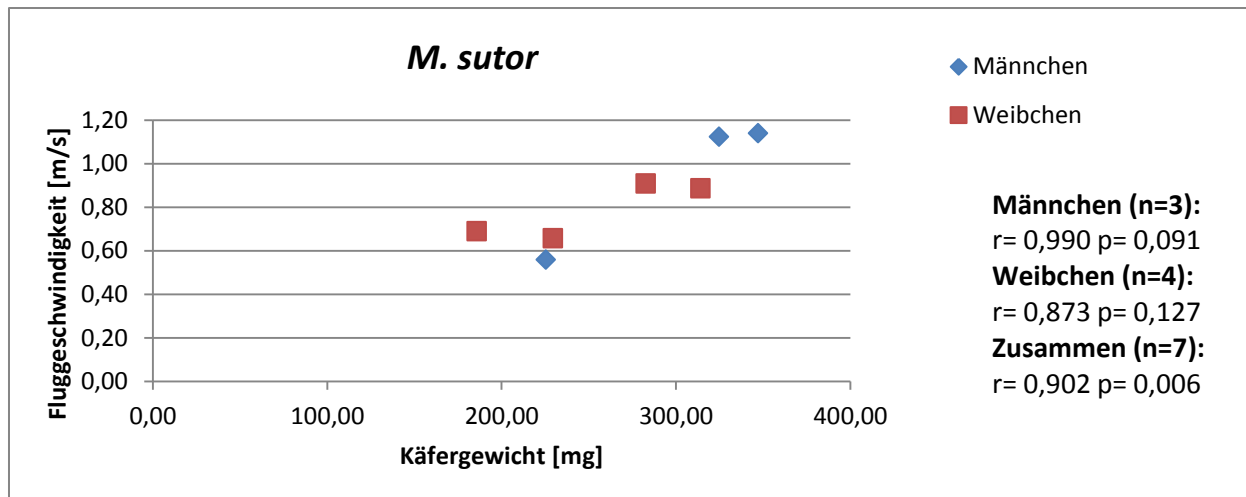


Abb. 4-27 Fluggeschwindigkeit von *M. sutor* in Bezug auf das mittlere Käfergewicht, r=Korrelationskoeffizient nach Pearson

4.4.2 Einfluss der Flügellänge auf die Flugleistung

a) Flugdistanz

Mithilfe des Streudiagramms (Abb. 4-28) wird der Einfluss der Flügellänge auf die Flugdistanzen bei *M. sutor* festgehalten. Maximale Distanzen wurden bei beiden Geschlechtern mit Flügeln von 2 bis 2,5 cm erreicht. Die errechneten Korrelationskoeffizienten zeigen einen nur geringen Zusammenhang zwischen der Länge der Elytren und der zurückgelegten Flugdistanz.

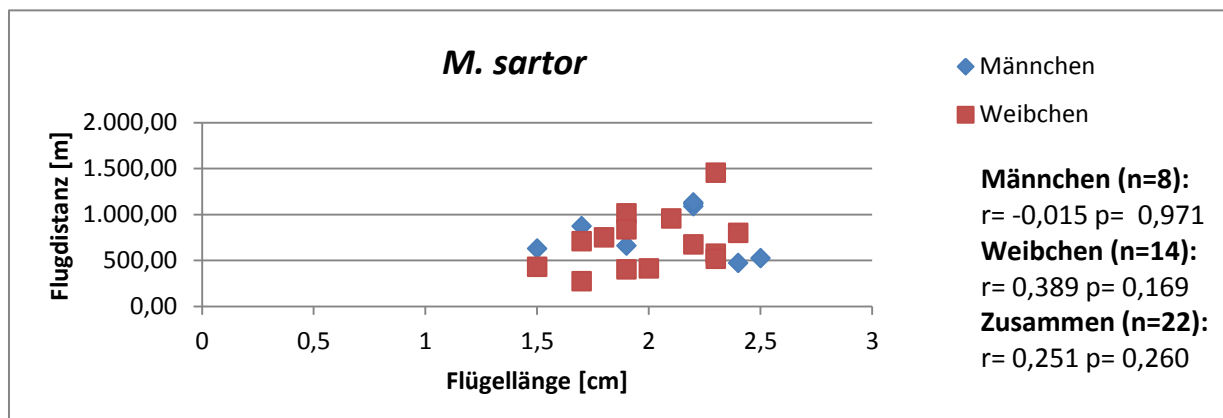


Abb. 4-28 Flugdistanz von *M. sutor* in Bezug auf die Flügellänge, r=Korrelationskoeffizient nach Pearson

Das Verhältnis von durchschnittlicher Flugdistanz zur Flügellänge wurde auch bei *M. sutor* festgehalten (Abb. 4-29). Eine Überlappung bei den Geschlechtern ist nie zu erkennen. Für alle *M. sutor* Käfer ergibt sich zwar ein mittlerer Zusammenhang zwischen Flügellänge und erreichter Flugdistanz, auf Grund der niedrigen Signifikanz ist allerdings keine Aussage in diesem Zusammenhang möglich.

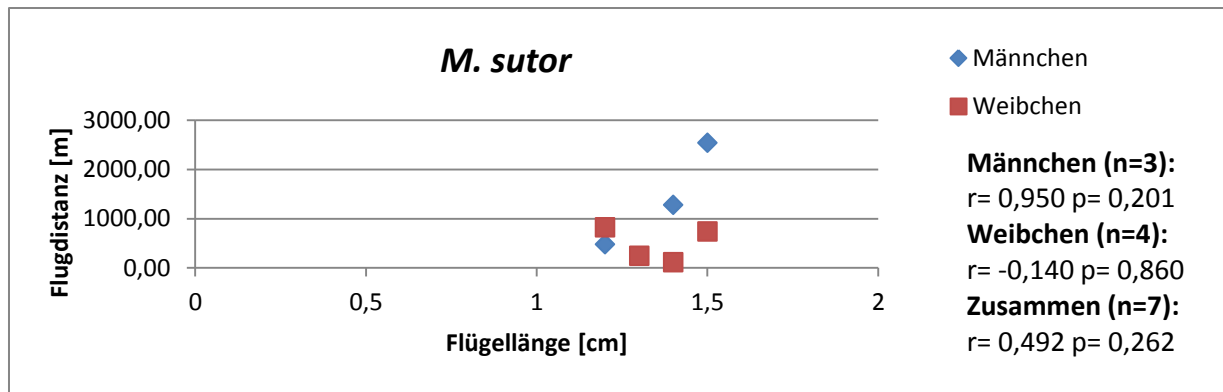


Abb. 4-29 Flugdistanz von *M. sutor* in Bezug auf die Flügelänge, r=Korrelationskoeffizient nach Pearson

b) Flugzeit

Abb. 4-30 liefert das Verhältnis von Flügelänge zur erreichten Flugzeit bei *M. sartor* Käfern. Die Korrelation von längeren Flügeln und längerer Flugzeit ist bei Weibchen stärker, bei Männchen weniger stark ausgeprägt, was durch die Korrelationskoeffizienten bestätigt wird.

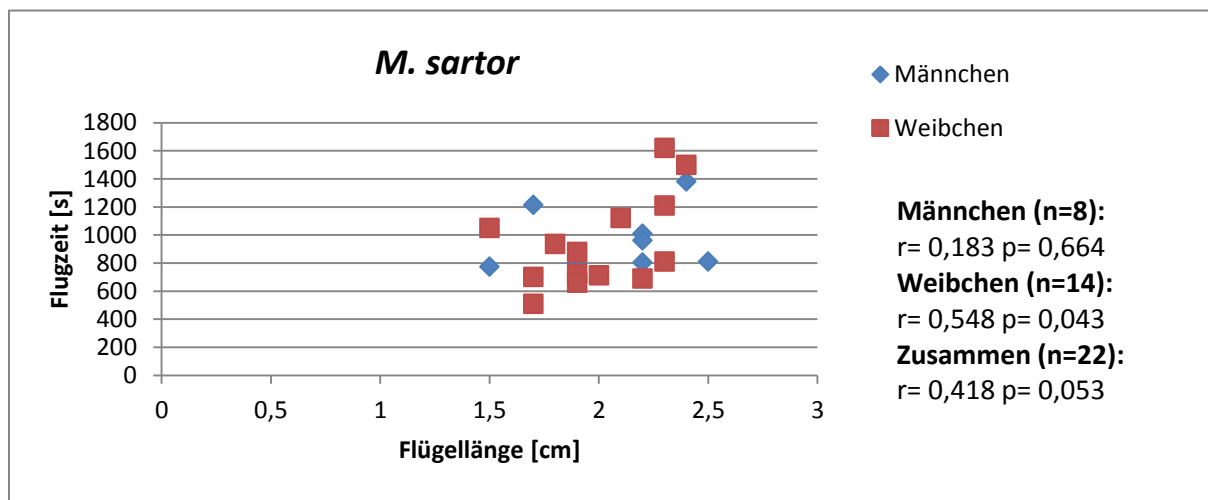


Abb. 4-30 Flugzeit von *M. sartor* in Bezug auf die Flügelänge, r=Korrelationskoeffizient nach Pearson

Die Untersuchung des Verhältnisses von Flügelänge und Flugzeit lässt bei *M. sutor* Männchen eine Korrelation erkennen, die auch durch den berechneten Koeffizienten bestätigt wird. Bei weiblichen *M. sutor* Käfern kann kein Zusammenhang erkannt werden (Abb. 4-31).

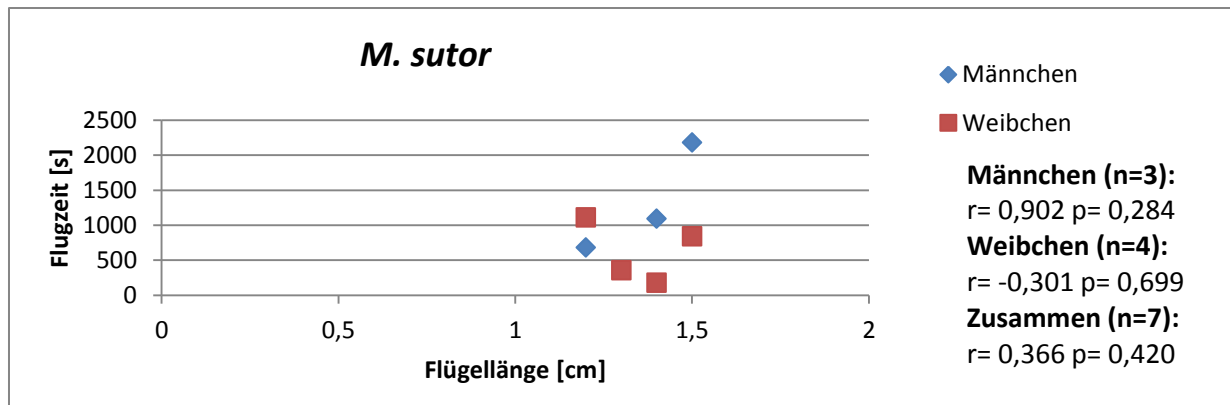


Abb. 4-31 Flugzeit von *M. sutor* in Bezug auf die Flügelänge, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

c) Fluggeschwindigkeit

Das Streudiagramm in Abb. 4-32 zeigt, dass bei *M. sutor* Käfern kein Zusammenhang von Flügelänge und erreichter Fluggeschwindigkeit besteht.

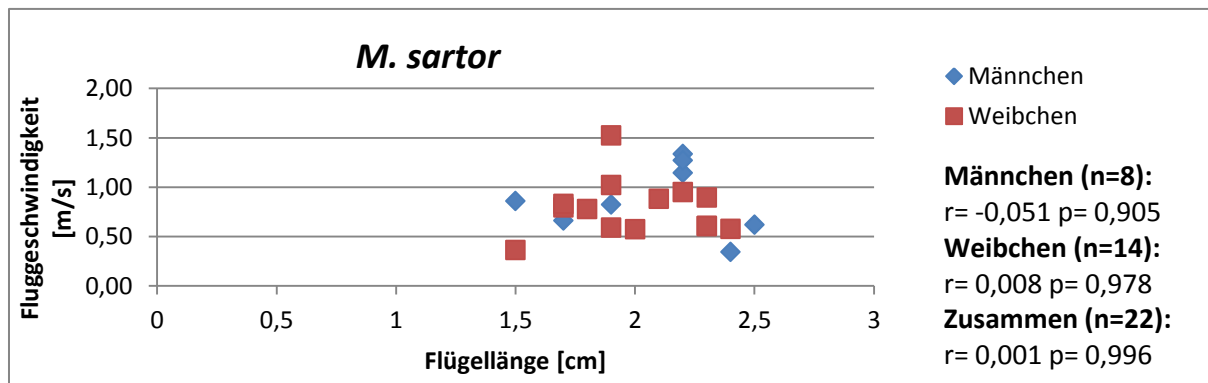


Abb. 4-32 Fluggeschwindigkeit von *M. sutor* in Bezug auf die Flügelänge, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

Bei *M. sutor* (Abb. 4-33) ist ein Zusammenhang zwischen Flügelänge und Fluggeschwindigkeit zu vermuten. Allerdings kann diese Vermutung durch die berechneten Koeffizienten nicht belegt werden.

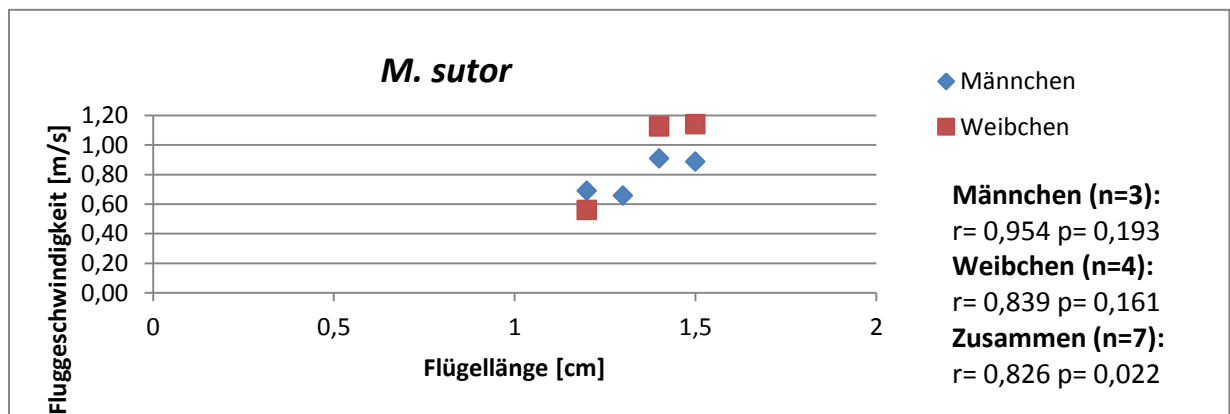


Abb. 4-33 Fluggeschwindigkeit von *M. sutor* in Bezug auf die Flügelänge, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

4.5 Gewichtsveränderung in Abhängigkeit von der Flugdistanz

4.5.1 *Monochamus sartor*

M. sartor Testkäfer verloren durch Flugaktivität im Durchschnitt 9,23 mg bzw. 1,01% ihres Körpergewichtes (siehe Tabelle 4-7). Die Korrelationskoeffizienten über alle Individuen von *M. sartor* sowie differenziert nach Geschlechtern bestätigen einen Zusammenhang von Flugdistanz und Gewichtsreduktion, jedoch nur für Männchen.

Tabelle 4-7: Mittelwerte sowie Standardfehler der Gewichtsveränderung von *M. sartor*

Geschlecht	Mittelwert [mg]	Mittelwert [%]
Männchen (n=8)	8,21 ±1,07	1,00 ±0,09
Weibchen (n=14)	9,71 ±1,46	1,02 ±0,14
Σ (n=22)	9,23 ±1,04	1,01 ±0,10

Das Streudiagramm in Abb. 4-34 zeigt eine geringere relative Gewichtsveränderung (Maximalwert 2,6%) bei Männchen. Das Diagramm lässt vermuten, dass weitere Flugdistanzen zu erhöhten Gewichtsreduktionen führen. Im Schnitt verloren die Männchen 1% ihres Körpergewichtes durch das Fliegen an den Flugmühlen.

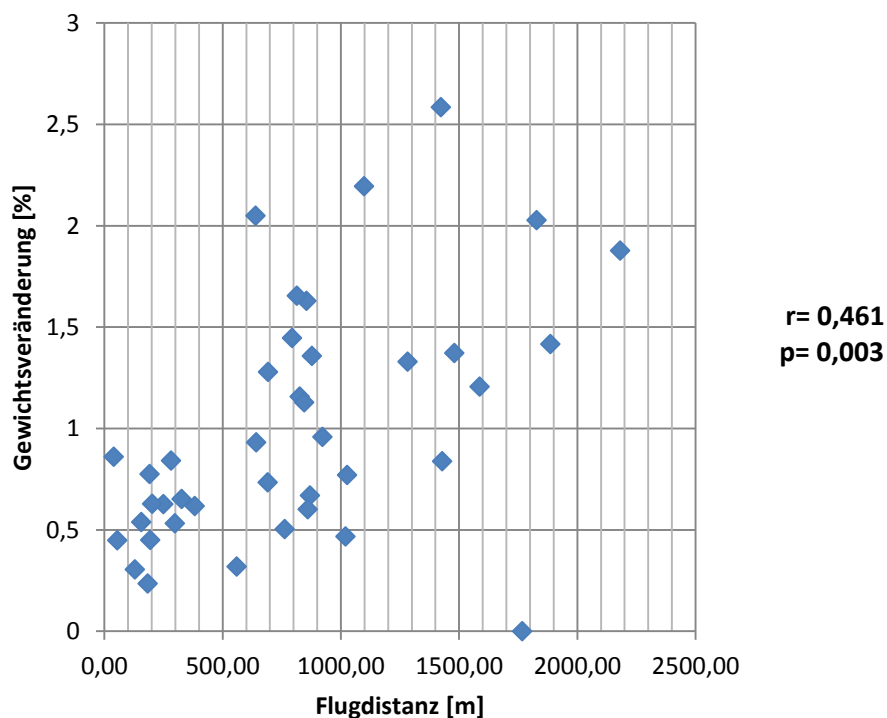


Abb. 4-34 relative Gewichtsveränderung der männlichen *M. sartor* Testkäfer, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

Das Streudiagramm der weiblichen *M. sartor* Testkäfer (Abb. 4-35) verhält sich etwas anders. Die relative Gewichtsreduktion liegt nahezu einheitlich, es zeigen sich allerdings einige Ausreißer (diese lassen sich durch etwaige Messfehler erklären und wurden im Streudiagramm nicht dargestellt). Die Weibchen verloren im Schnitt ebenso 1% ihres Körpergewichts durch Flugaktivitäten (Tabelle 4-7), wobei der Korrelationskoeffizient auf einen sehr geringen Zusammenhang schließen lässt.

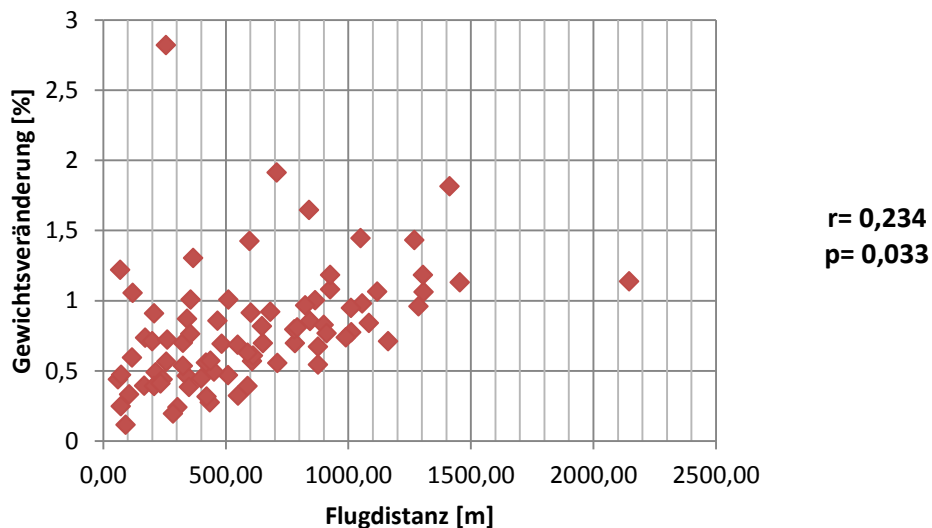


Abb. 4-35 relative Gewichtsveränderung der weiblichen *M.sartor* Testkäfer, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

4.5.2 *Monochamus sutor*

Eine Korrelation zwischen zurückgelegter Flugdistanz und Gewichtsveränderung ist weder bei den männlichen noch bei den weiblichen *M. sutor* Testkäfern gegeben. Auswirkung auf das Körpergewicht hat das Flugverhalten dennoch, so verloren alle Käfer im Durchschnitt 1,3% bzw. 3,46 mg ihres Körpergewichtes im Zuge der Flugbewegungen (Tabelle 4-8).

Tabelle 4-8: Mittelwerte sowie Standardfehler der Gewichtsveränderung von *M. sutor*

Geschlecht	Mittelwert [mg]	Mittelwert [%]
Männlich (n=3)	4,11 $\pm$ 1,09	1,48 $\pm$ 0,43
Weiblich (n=4)	2,71 $\pm$ 0,78	1,11 $\pm$ 0,30
Gesamt (n=7)	3,46 $\pm$ 0,69	1,31 $\pm$ 0,27

Männliche *M. sutor* Käfer verloren bis zu 7% ihres Körpergewichtes – und dies bereits bei geringen Flugdistanzen (Abb. 4-36). Die Ergebnisübersicht zeigt, dass im Durchschnitt die Gewichtsreduktion der Männchen bei knapp 1,5% liegt.

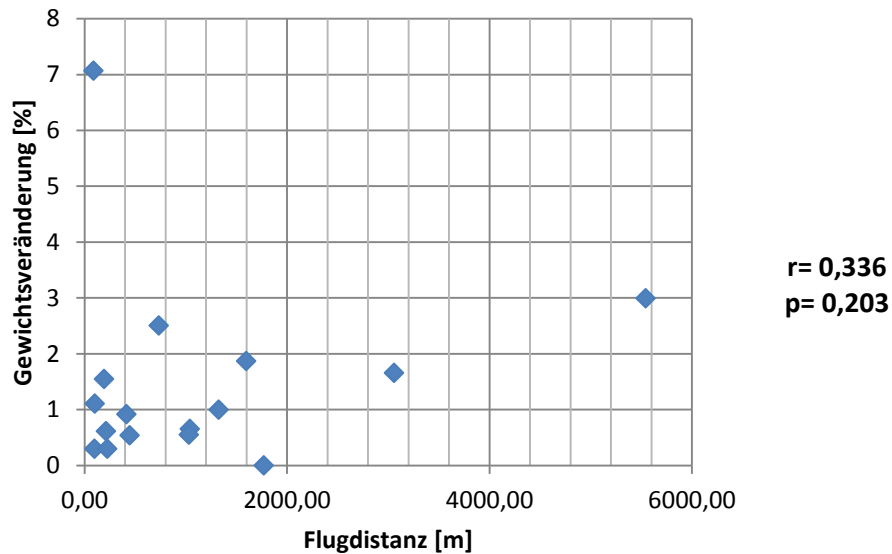


Abb. 4-36 relative Gewichtsveränderung der männlichen *M. sutor* Testkäfer, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

Die Gewichtsveränderung der weiblichen *M. sutor* Testkäfer ist nicht so stark ausgeprägt, wie Abb. 4-37 erkennen lässt. Maximal verloren die Weibchen knapp über 4% ihres Körpergewichtes. Der Korrelationskoeffizient ist sehr klein und eine Korrelation zwischen Flugaktivität und Gewichtsverlust wird nicht bestätigt.

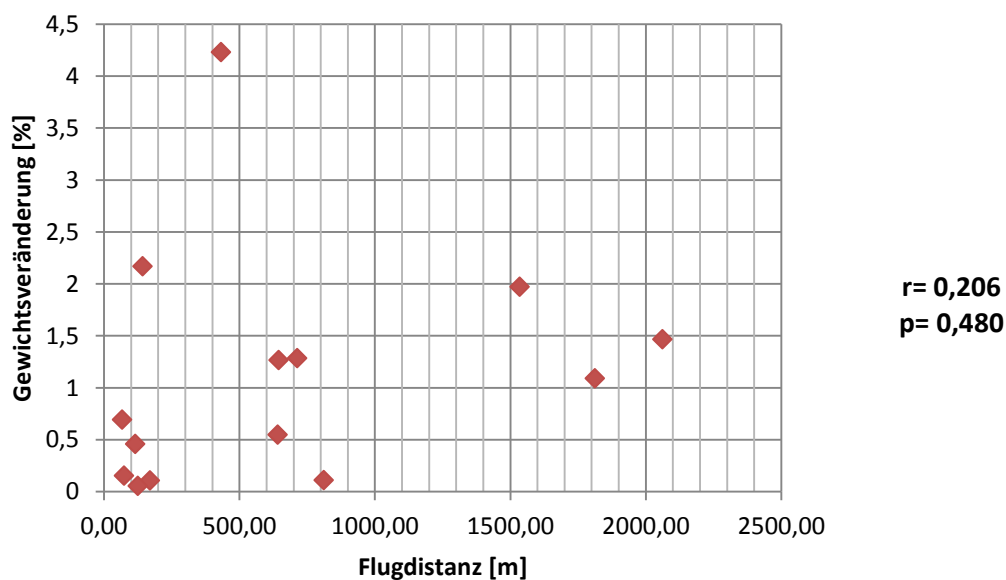


Abb. 4-37 relative Gewichtsveränderung der weiblichen *M. sutor* Testkäfer, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

4.6 Einfluss von Temperatur und Wetter auf die Flugleistung

4.6.1 Temperatureinfluss auf die Flugleistung

Zur Erhebung der Einwirkung der Lufttemperatur im Labor auf die Flugleistung der Käfer wurden die durchschnittliche Flugdistanz und die durchschnittliche Temperatur des Flugtages herangezogen. Männliche und weibliche Käfer sind hierbei in einem Streudiagramm zusammengefasst.

Monochamus sartor

Während des Versuchszeitraumes lagen die Raumtemperaturen im Bereich von 23 bis 26 °C (Abb. 4-38). Die weiteste Flugdistanz der weiblichen Käfer (über 2000 m) wurde bei einer Temperatur von 25,8°C erreicht. Die maximale Strecke der männlichen Individuen wurde bei einem Grad weniger zurückgelegt. Ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Flugverhalten kann anhand der berechneten Korrelationskoeffizienten nicht bestätigt werden.

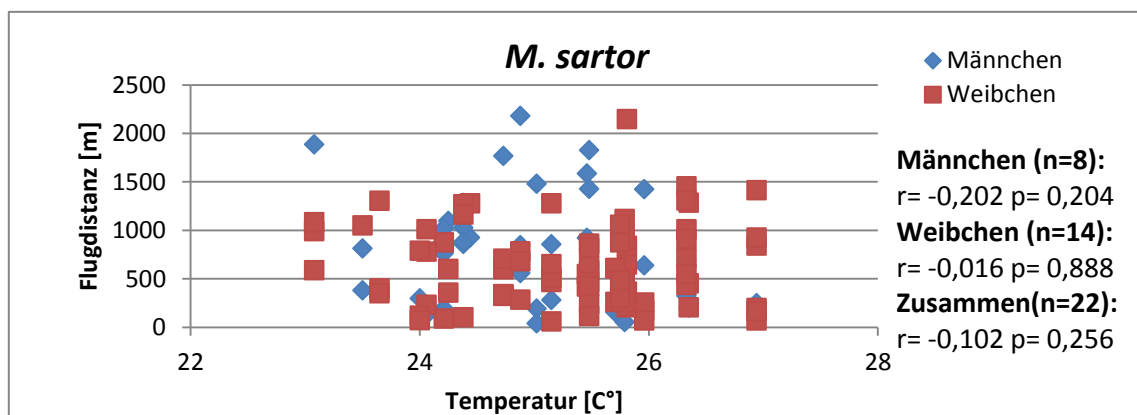


Abb. 4-38 Temperatureinfluss auf die Flugleistung bei *M. sartor*, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

Monochamus sutor

Für *M. sutor* ist in gleicher Weise ein Streudiagramm (Abb. 4-39) erstellt worden. Die Käfer flogen bei Temperaturen zwischen 23 und 27 °C. Die größte Flugleistung der Männchen wurde bei einer Temperatur von 26 °C beobachtet, die der Weibchen bereits bei 24,4 °C. Ab Temperaturen über 26 °C nahm die Flugleistung beider Geschlechter ab. Die Werte der berechneten Korrelationskoeffizienten sind zu niedrig, um eine Korrelation zwischen Flugdistanz und Temperatur bestätigen zu können.

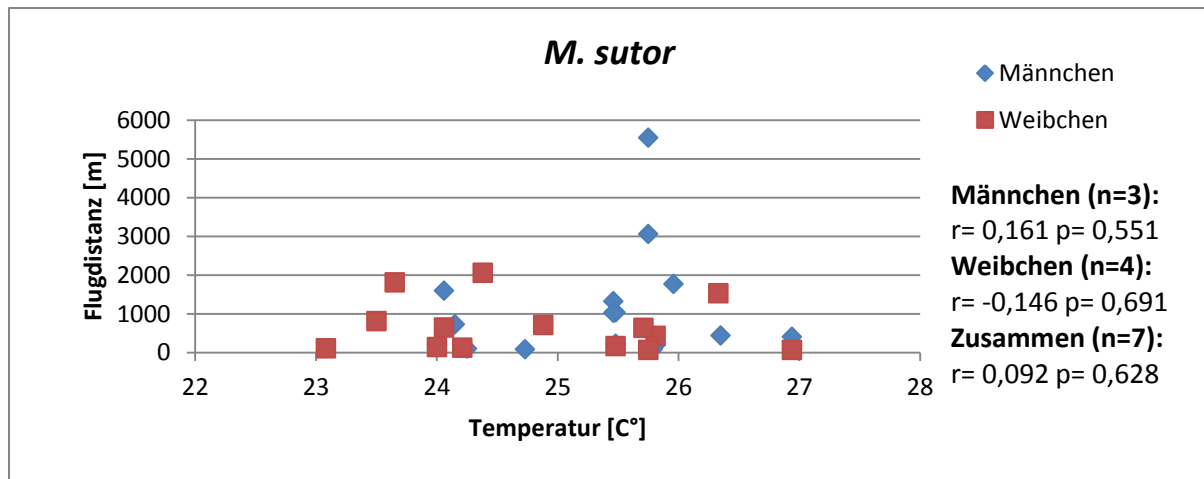


Abb. 4-39 Temperatureinfluss auf die Flugleistung bei *M. sutor*, r =Korrelationskoeffizient nach Pearson

4.6.2 Wettereinfluss auf die Flugleistung

Das im Flugjournal notierte Außenwetter wurde für eine weitere Analyse des Käfer-Flugverhaltens herangezogen. Die berechneten Mittelwerte (Tabelle 4-9) zeigen, dass das Wetter weder bei *M. sartor* noch bei *M. sutor* Käfern einen Einfluss auf das Flugverhalten hat. Die höchsten mittleren Distanzen wurden bei beiden Arten sogar an Regentagen erzielt.

Tabelle 4-9: Mittelwerte der zurückgelegten Flugdistanzen je nach Außen-Wettersituation und getrennt nach Käferart.

<i>M. sartor</i> (n=22)		<i>M. sutor</i> (n=7)	
Wetter	Flugdistanz [m]	Wetter	Flugdistanz [m]
regnerisch	777,78 ±95,94	regnerisch	1053,26 ±260,70
stark bewölkt/bewölkt	655,06 ±89,29	stark bewölkt/bewölkt	877,25 ±286,60
sonnig	670,50 ±55,30	sonnig	877,23 ±373,75

Mit Hilfe von Säulendiagrammen wurde der mögliche Einfluss der Wettersituation auf die mittlere Flugdistanz getrennt nach Käferart und Geschlecht dargestellt. Dazu ist auf der x-Achse die mittlere Flugdistanz je nach Wetterlage als Parameter für die Flugleistung aufgetragen, die y-Achse repräsentiert die unterschiedlichen Flugtage. Anhand von Abb. 4-40 bis Abb. 4-43 ist zu erkennen, dass mögliche Außenwettereinflüsse nicht gegeben sind, da es zeitweise an sonnigen Versuchstagen zu weniger guten, an Regentagen jedoch zu sehr guten Flugleistungen kam.

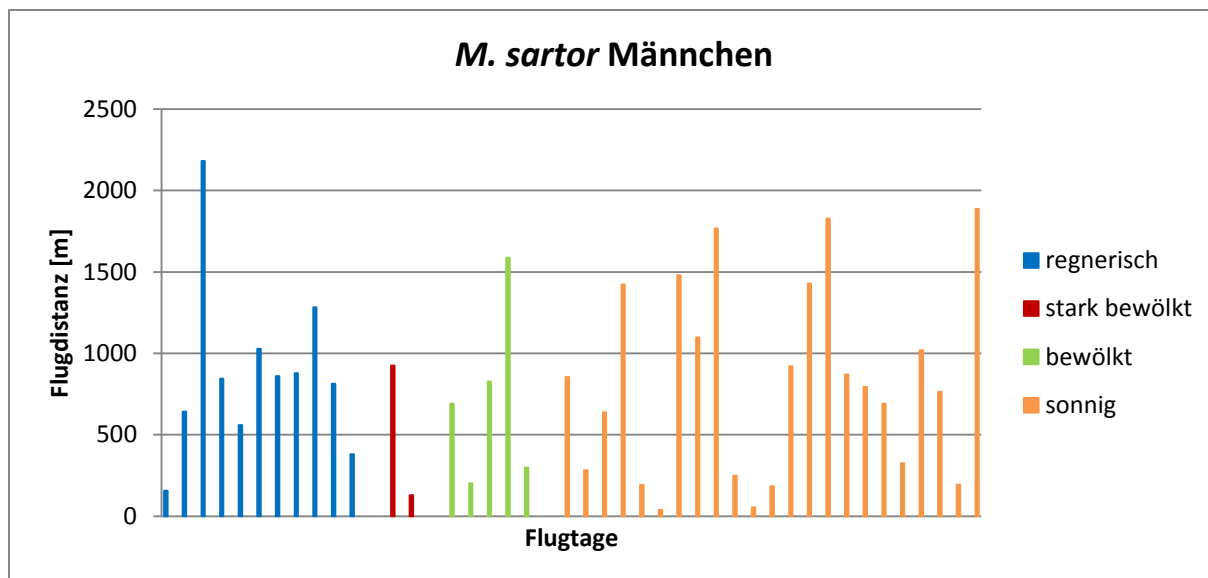


Abb. 4-40 mittlere Flugdistanz der 8 geflogenen männlichen *M. sartor* Testkäfer je nach Außen-Wettersituation

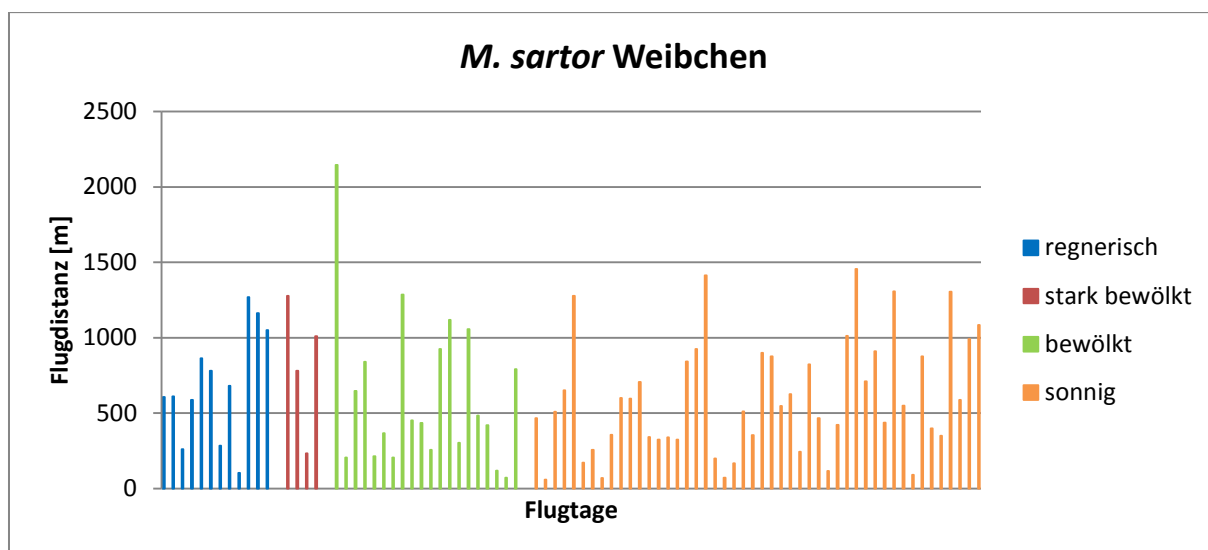


Abb. 4-41 mittlere Flugdistanz der 14 geflogenen weiblichen *M. sartor* Testkäfer je nach Außen-Wettersituation

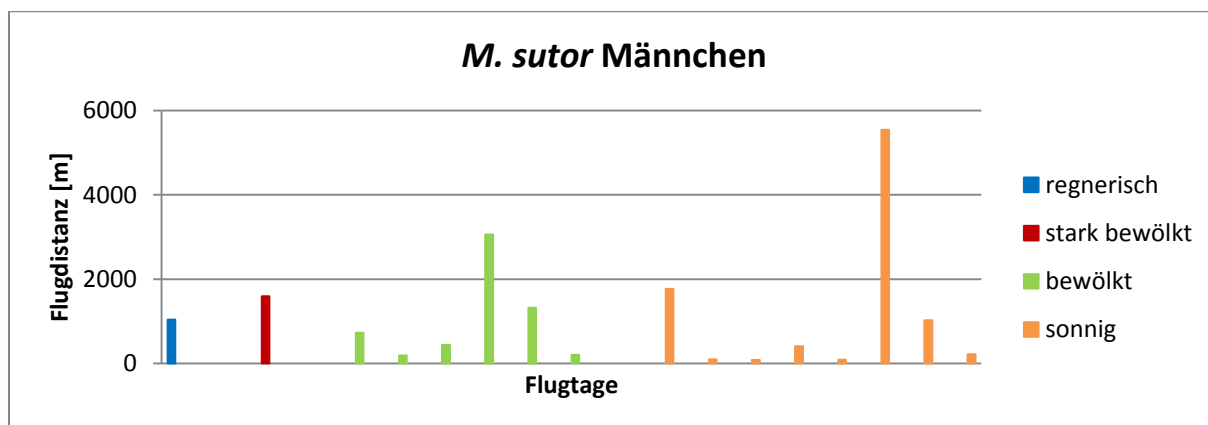


Abb. 4-42 mittlere Flugdistanz der 3 geflogenen männlichen *M. sutor* Testkäfer je nach Außen-Wettersituation

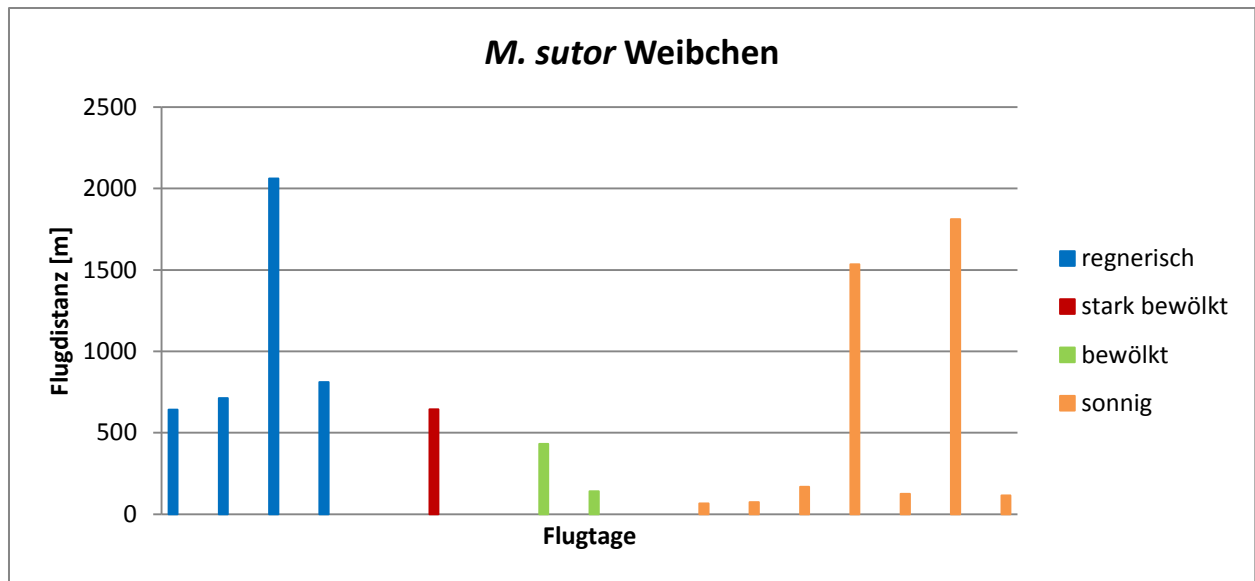


Abb. 4-43 mittlere Flugdistanz der 4 geflogenen weiblichen *M. sutor* Testkäfer je nach Außen-Wettersituation

5 Diskussion

Eine direkte Kontrolle von *B. xylophilus* erweist sich als schwierig, weshalb die Beobachtung von Bockkäfern der Gattung *Monochamus* eine zentrale Aufgabe im Rahmen des Bekämpfungsmanagements der Kiefernwelke darstellt (WEBSTER und MOTA 2008). Bisherige Studien zum Ausbreitungspotential der Welke fokussieren vorwiegend auf deren Hauptvektor *M. galloprovincialis*. Die vorliegende Arbeit analysiert dagegen erstmals eingehend das Flug- und Ausbreitungsverhalten der potentiellen Vektoren *M. sutor* und *M. sutor*.

Von den getesteten Käferarten wies *M. sutor* eine etwas größere Flugbereitschaft auf als *M. sutor*. Knapp 60% aller *M. sutor* Testkäfer wurden als Flieger identifiziert, wohingegen bei *M. sutor* nicht einmal die Hälfte der getesteten Insekten flog. Dies ist jedoch vorbehaltlich der Tatsache zu sehen, dass von *M. sutor* insgesamt weniger Käfer zur Verfügung standen. Bei den von DAVID et al. (2013) durchgeführten Flugmühlenexperimenten mit *M. galloprovincialis* wurden 77% der getesteten Käfer als Flieger klassifiziert. Die Bockkäfer der Gattung *Monochamus* können somit als flugwillige Insekten bezeichnet werden, trotz der Tatsache, dass es sich bei Flugmühlenversuchen um einen fixierten Flug handelt.

Die durchschnittliche Flugdistanz pro Flug von *M. sutor* lag in einem Bereich von 700 bis 810 m, die von *M. sutor* zwischen 480 und 1433 m. Bereits 2013 wurden Flugmühlenexperimente mit *M. sutor* durchgeführt. Die mittleren Ausbreitungsdistanzen lagen in diesem Fall zwischen 1272 und 2008 m (REPHRAME 2014). Im Vergleich dazu ermittelte HALBIG (2013) mittels Markierungs-Wiederfangversuchen eine mittlere Flugdistanz von 155 m für *M. sutor* bzw. 182 m für *M. sutor*. Die maximalen Flugdistanzen lagen bei HALBIG (2013) für beide Käferarten bei 390 m. Jedoch ist bei dieser Art des Flugversuches die maximale Flugweite durch die am weitesten entfernte Falle festgelegt, weshalb zu vermuten ist, dass die Käfer durchaus zu weiteren Flügen im Stande sind (FRANZEN und NILSSON 2007). HALBIG (2013) zeigt auch, dass sich die Käfer bergauf, bergab, über Freiflächen und durch Waldbestände ausbreiten können.

Im Zuge eines Flugmühlenexperimentes wurde bei *M. galloprovincialis* eine durchschnittliche Flugdistanz über die Lebenszeit der Käfer von 16 km und eine Maximaldistanz von bis zu 60 km festgestellt (DAVID et al. 2013). Markierungs-Wiederfangversuche mit dieser *Monochamus* Art ergaben eine mittlere Flugdistanz von 523 m (SANCHEZ-HUSILLOS et al 2015).

Die mittlere Flugdauer von männlichen und weiblichen *M. sartor* Testkäfer betrug 16 min. Die mittlere Flugdauer der weiblichen *M. sutor* Testkäfern belief sich auf 10 min, die der Männchen auf 22 min. Die Annahme von KLAUSNITZER und SANDER (1978), dass *M. sartor* und *M. sutor* kürzere Flüge im Vergleich zu anderen *Monochamus* spp durchführen wird damit widerlegt. Versuche mit *M. carolinensis* brachten mit durchschnittlich 18,6 min ähnliche Ergebnisse (HUMPHRY und LINIT 1989). Diese Flugdauer wurde im Flugmühlenexperiment 2013 von den *M. sutor* Käfern mit 22 bis 33 min klar übertroffen (REPHRAME 2014).

Etwaige Flugstopps der Bockkäfer im Freiland (DAVID et al. 2013) lassen auf eine längere Flugdauer der Käfer außerhalb des Labors schließen, wo sie nach einer Unterbrechung den Flug wieder aufnehmen, während sie im Labor nach Flugstopp von der Flugmühle genommen wurden. Die ermittelten Flugzeiten sind somit als Richtwerte anzusehen.

Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit der *M. sartor* Testkäfer betrug 0,8 m/s, die der *M. sutor* 0,8 bis 0,9 m/s. Im Vergleich dazu erreichte *M. sutor* beim Flugmühlenexperiment des Vorjahres mittlere Fluggeschwindigkeiten von 0,9 bis 1,2 m/s (REPHRAME 2014). *M. carolinensis* war bei Flugmühlversuchen von AKBULUT und LINIT (1999) mit einer mittleren Geschwindigkeit von 1,5 m/s unterwegs. Für *M. galloprovincialis* ist eine mittlere Fluggeschwindigkeit von 1,4 m/s bekannt (DAVID et al. 2013).

Die Fluggeschwindigkeit von Insekten wird von verschiedenen morphologischen Faktoren beeinflusst, wobei Körpergewicht, Körpergröße und Alter als entscheidend gelten (DEAN 2003). Diese Einflussfaktoren können demnach den Grund für den Unterschied zwischen den vorhandenen Literaturwerten und den in dieser Arbeit ermittelten Fluggeschwindigkeiten abgeben.

Die im Labor gewonnenen Flugparameter sind im Vergleich zu einem Insektenflug in der Natur nur bedingt repräsentativ (TAYLOR et al. 2010). Um dennoch Daten der Laborversuche mit solchen aus dem Freiland vergleichbar zu machen wurde im Zuge dieser Arbeit das Flugverhalten der *M. sartor* Käfer aus Laborzucht mit jenen aus Lockstofffallen verglichen.

Es ist davon auszugehen, dass die Käfer aus dem Freiland bereits vor dem Start der Versuchsreihe einen freien Flug durchgeführt hatten, wohingegen die Käfer aus der Laborzucht nur den fixierten Flug an der Flugmühle kannten. Die eruierten Mittelwerte der Flugdistanzen und Fluggeschwindigkeiten bestätigen die Annahme, die Käfer aus dem Freiland seien die besseren Flieger, wobei letztere in etwa doppelt so schnell flogen wie Käfer aus dem Labor. Allerdings waren die Unterschiede nicht signifikant.

Auffallend sind allerdings die Resultate der Flugzeit: denn entgegen der teilweise bestätigten Annahme, Freilandkäfer seien bessere Flieger, war die durchschnittliche Flugdauer der Käfer aus Laborzucht länger.

Im Zuge der Durchführung des Versuches konnte die Annahme von EDWARDS (2006), wonach Insekten an einer Flugmühle alleine durch den fehlenden Bodenkontakt zum Fliegen getrieben würden, nicht bestätigt werden. Nach Anbringung an der Flugmühle mussten die Käfer beinahe bei jeder Versuchsdurchführung mit einem Handventilator zum Fliegen animiert werden.

Die richtige Klebermenge war bei der Anbringung der Testkäfer an der Flugapparatur entscheidend. Zu viel Kleber sowie die falsche Position der Kartonhalterung haben auch nach MORIYA 1995 erheblichen Einfluss auf die Flugleistung der Insekten. Zusätzlich können die Käfer bei der Montage leichte Verletzungen davontragen, die sich auf ihre Flugleistungen auswirken (TAYLOR et al. 2010). Eine sorgsame Handhabung der Insekten bei der Versuchsdurchführung ist daher unbedingt einzuhalten.

Weitere Versuche im Freiland sollten dennoch durchgeführt werden. Zum einen dienen sie der Kalibrierung der Flugmühlen, zum anderen ermöglichen sie die Generierung weiterer Daten und bilden so die Vergleichsbasis für ein aussagekräftiges Resultat. So verfolgten z.B.: RILEY et al. (1997) die Flugenergie von Zwergzikaden (*Cicadulina storeyi*) sowohl an Flugmühlen als auch im freien Flug. Ebenso haben TAYLOR et al. (2010) das Flugverhalten von *Agilus planipennis* (Buprestidae) mit Flugmühlen und Highspeed Kameras eruiert. Letztere kommen dabei zu dem Schluss, dass die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit im freien Flug dreimal so groß ist wie jene an der Flugmühle.

Zu bedenken ist, dass bei Laborversuchen bestimmte Umweltreize ausgeschlossen werden. Neben klassischen Faktoren wie Wind, Wetter oder Temperatur wird auch die Wirtsbaumattraktivität, welche einen Einfluss auf das Insektenflugverhalten ausübt, ausgeklammert (YAMANAKA et al. 2001). YAMANAKA et al 2001 haben daher Flugeigenschaften und Ausbreitungsmuster von *Hyphantria cunea* (Lepidoptera, Arctiidae) auf drei verschiedenen Wegen überprüft. Sie führten Flugmühlenversuche zur besseren Abschätzung von Flugparametern durch, Windtunnelversuche zur Konstruktion eines täglichen Flugmusters und Feldversuche zur besseren Abschätzung des Verbreitungsmusters. Auch zur Analyse des Flugverhaltens potentieller Vektoren der Kiefernwelke wäre es demnach aufschlussreich, zusätzlich zu den Flugmühlenexperimenten weitere Versuche in Feld, Windtunnel, etc. durchzuführen.

In der Literatur wird von einer Überschätzung der Flugwerte im Flugmühlenversuch ausgegangen (YAMANAKA et al. 2001, EDWARDS 2006, DAVID et al. 2013). Diese

Annahme kann durch Vergleiche zwischen Laborversuchen und Feldversuchen weitergehend überprüft werden. Dazu werden die mittleren Flugdistanzen aus dem Markierungs-Wiederfangversuch von HALBIG (2013) und die Flugdistanzen dieser Arbeit für einen aussagekräftigen Vergleich herangezogen. Die Flugdistanzen im Labor überstiegen diejenigen im Freiland um 600 m (*M. sartor*) bzw. um 774,5 m (*M. sutor*) (siehe Tabelle 5-1). Allerdings kann man hierbei nicht zwangsläufig von einer Überschätzung der Flugmühlenwerte ausgehen. Denn bei Markierungs-Wiederfangversuchen kommt es, wie bereits erwähnt wurde, zu geringeren Ergebnissen im Zuge der Ausfälle, außerdem sind die Flugdistanzen durch die Entfernung der Fallen limitiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche Wert irgendwo zwischen den Ergebnissen der Flugmühlenexperimente und der Markierung-Wiederfangversuche liegt.

Tabelle 5-1: Vergleich der mittleren Flugdistanzen von HALBIG (2013) mit den aktuellen Ergebnissen.

	Markierungs-Wiederfangversuch 2013 HALBIG (2013)		Flugmühlenversuch 2014	
	<i>M. sartor</i>	<i>M. sutor</i>	<i>M. sartor</i>	<i>M. sutor</i>
mittlere Flugdistanz [m]	155	182	755	956,5

Die Annahme von AKBULUT und STAMPS (2011), *Monochamus* spp. seien zeitweilig schlechte Flieger, konnte nicht widerlegt werden, denn im Zuge dieser Arbeit gab es ebenso Käfer die nie flogen. Über den Zeitraum der Versuchsreihe erreichten die *M. sartor* Testkäfer dennoch Spitzenwerte von über 8 km, die *M. sutor* Käfer Werte von über 7 km. Der Einfluss des Käferalters auf die Flugleistung wurde mit Hilfe der vorhandenen Käfer aus Laborzucht analysiert, wobei sich ein negativer Trend zwischen Flugleistung und zunehmendem Käferalter vage abzeichnet. Schon bei *M. galloprovincialis* war ein negativer Zusammenhang zwischen Käferalter und Flugbereitschaft festgestellt worden (DAVID et al. 2013).

Für die Annahme von ZHANG und LINIT (1998), weibliche Bockkäfer steckten ihre Energie vorwiegend in die Reproduktion und nicht in den Flug, lieferte die vorliegende Arbeit keine Indizien. Unterschiede zwischen männlicher und weiblicher Flugleistung konnten nicht bestätigt werden. Ebenso wurde bei vorhergehenden Studien mit Arten von *Monochamus* keine Einwirkung des Käfergeschlechts auf die Flugleistung festgestellt (HUMPHRY und LINIT 1989, AKBULUT und LINIT 1999, DAVID et al. 2013). Hierbei könnten die nahezu identische durchschnittliche Größe sowie durchschnittliche Elytrenlänge der männlichen und weiblichen Testkäfer ein Grund für die ähnlichen Flugleistungen sein.

Auswirkung morphologischer Käfermerkmale auf das Flugverhalten

Morphologische Merkmale wie Käfergröße und Flügellänge wurden bereits hinsichtlich ihres Einflusses auf die Flugfähigkeit untersucht (DUDLEY und SRYGLEY 1994, SHIRAI 1995). Auch HUMPHRY und LINIT (1989) untersuchten an *M. carolinensis* den Einfluss der Käfergröße auf das Flugverhalten und stellten fest, dass größere Käfer im Stande sind, länger zu fliegen.

Auch hat das Körpergewicht von *Monochamus galloprovincialis* Einfluss auf die Flugleistung (DAVID et al. 2013). Zwar hat das mittlere Käfergewicht von *M. sartor* und *M. sutor* keinen Einfluss auf die Flugdistanz, jedoch sind Auswirkungen auf die Flugzeit zu erkennen, wobei schwerere Käfer länger fliegen als leichte. Diese Korrelation kann mit der unterschiedlichen Energiespeicherung der Käfer erklärt werden (DAVID et al. 2013). Auch ist ein sogenannter Größeneffekt bei der Flugenergetik der Insekten gegeben, demzufolge das Körpergewicht Einfluss auf Atmung, Stoffwechsel und Flug hat (NACHTIGALL 2003).

Hinsichtlich des Einflusses von Körpergewicht auf Fluggeschwindigkeit ist bei *M. sutor* eine Korrelation zu erkennen, nicht aber bei *M. sartor*. Die Unterschiede zwischen den beiden Käferarten sind vermutlich abermals in der unterschiedlichen Anzahl an Testkäfern begründet. Im Vergleich zu den Ergebnissen dieser Studie konnte bei den Flugmühlversuchen mit *M. galloprovincialis* ein signifikanter Anstieg der Fluggeschwindigkeit bei steigendem Körpergewicht ermittelt werden (DAVID et al 2013).

Der positive Einfluss der Flügellänge auf die Flugleistung von *M. galloprovincialis* wurde von DAVID et al. (2013) nachgewiesen. Bei *M. sutor* hat die durchschnittliche Flügellänge einen mittleren Einfluss auf die Flugdistanz, während bei *M. sartor* lediglich ein geringer Zusammenhang gegeben ist. Zwischen Flügellänge und Fluggeschwindigkeit findet sich bei *M. sartor* eine relevante Korrelation, während *M. sutor* diesbezüglich keinen Zusammenhang aufweist, was jedoch wiederum mit der höheren Anzahl an Testkäfern sowie der unterschiedlichen mittleren Größe zu begründen sein dürfte. Im Gegensatz zu diesem Ergebnis konnten LOPEZ et al. (2014) bei Flugmühlversuchen mit *Agrilus auroguttatus* (Buprestidae) einen signifikanten positiven Einfluss der Flügellänge auf die Flugdistanz, Flugzeit und Fluggeschwindigkeit beobachten.

Eine Studie von RENAULT et al. (2003) konnte nachweisen, dass größere Insekten weniger schnell Gewicht verlieren als kleine. Bei den Flugmühlversuchen von LOPEZ et al. (2014) mit *A. auroguttatus* verloren größere und schwerere Käfer im Zuge der Flugbewegungen mehr an absolutem Körpergewicht als kleine leichtere.

Die vorliegende Arbeit kommt zu folgendem Ergebnis: obwohl *M. sutor* Käfer kleiner waren als *M. sartor* Käfer verloren letztere im Durchschnitt 1%, erstere jedoch 1,3% ihres

Körpergewichtes pro Flug. Die Annahmen von RENAULT et al. (2003) werden durch die vorliegende Arbeit somit bestätigt, wohingegen jene von LOPEZ et al. (2014) nicht unterstützt werden.

Einfluss von Temperatur und Wetter

Die Bewegungsgeschwindigkeit von Tieren steigt typischerweise mit zunehmender Temperatur (PRECHT et al. 1955). Große Insekten fliegen erst bei relativ hohen Temperaturen (NACHTIGALL 2003). Demnach kann man zur Annahme kommen, dass die Testkäfer bei höheren Temperaturen bessere Flugleistungen zeigen. Da im Labor keine Möglichkeit bestand, die Versuche in klimatisierten, ausschließlich künstlich beleuchteten Räumen durchzuführen, wurde der Einfluss der Temperatur auf das Flugverhalten mituntersucht. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass kein Effekt der Raumtemperatur bzw. der natürlichen Lichtgegebenheiten vorhanden ist. Die berechneten Korrelationskoeffizienten unterstreichen ebenfalls, dass zwischen der Raumtemperatur und der Flugaktivität der Käfer kein Zusammenhang besteht. Vermutlich sind die Temperaturunterschiede im Labor (23,0 bis 27,5 C°) zu gering, um einen dementsprechenden Einfluss auf das Flugverhalten auszuüben.

Im Sinne des Temperatureinfluss ist durch den Klimawandel und die globale Erwärmung in den nächsten Jahren mit erhöhten Außentemperaturen zu rechnen. Die damit verbundene Störung des ökologischen Gleichgewichtes bietet Schädlingen und Krankheiten günstigere Entwicklungs- und Überlebensbedingungen (KREHAN und STEYRER, 2006). Damit ist das erhöhte Risiko einer möglichen Etablierung und Ausbreitung der Kiefernwelke gegeben, zumal die Vermehrungsrate von *B. xylophilus* stark temperaturabhängig ist. In Japan ist die Kiefernwelke beispielsweise nur in Gebieten mit einem Monatsmittelwert von > 20 C° im August anzutreffen (ZHAO et al. 2008). Daraus ist zu folgern, dass Wärme und Trockenheit im Falle eines Schädlingsimports nach Österreich das Risiko einer Kiefernwelke-Epidemie erhöhen (KREHAN o.J.). Abb. 5-1 zeigt eine Europakarte mit einem Modell der Klimaentwicklung von 2012 bis 2020. Die rot gefärbten Bereiche sind jene Gebiete, die in den Sommermonaten (Juni, Juli, August) eine mittlere Temperatur von über 20 C° aufweisen. In diesen Gebieten ist im Fall einer Einschleppung von *B. xylophilus* mit einem erhöhten Risiko für Kiefernwelke zu rechnen.

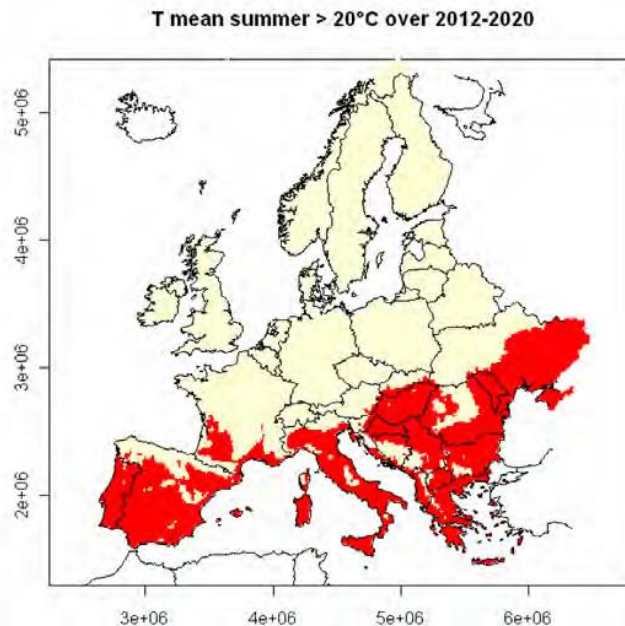


Abb. 5-1 Klimaerwärmungsszenario. Die rot gefärbten Gebiete sind jene Regionen, in denen es von 2012 bis 2020 zu mittleren Sommertemperaturen (Juni, Juli, August) von mehr als 20° C kommt (REPHRAME 2014)

Die Auswirkung der Außen-Wetterverhältnisse auf das Flugverhalten der Testkäfer konnte ebenso untersucht werden. Es bestand keine Möglichkeit die Laborfenster abzdunkeln, wodurch bei sonnigen Wetterverhältnissen direktes Sonnenlicht auf den Versuchsaufbau gegeben war. Es zeigte sich, dass die mittleren Flugleistungen der Testkäfer an Regentagen besser waren als an sonnigen Tagen. Jedoch sind diese Ergebnisse nicht statistisch signifikant. Anders verhält es sich jedoch bei Markierungs-Wiederfang Versuchen im Freiland: Wetter und Temperatur sind hier durchaus entscheidende Faktoren (HALBIG 2013), ebenso wie Windverhältnisse (RANIUS 2006), Lebensraumbedingungen, Wirtsbaumqualität und Wirtsbaumdichte (TOGASHI 1988). All diese Faktoren können bei Laborversuchen allerdings nicht mitberücksichtigt werden.

Ausbreitungsmodell der Kiefernwelke

REPHRAME (2014) entwickelte verschiedene Modelle zur Ausbreitung der Kiefernwelke (wie auch das in 2.1.2 erwähnte Toolkit), die sich wiederum aus verschiedenen Komponenten zusammensetzen. Eine dieser Komponenten bildet dabei immer die Ausbreitungskapazität der Insektenvektoren. Für *M. galloprovincialis* wurde mit Hilfe der Flugmühlendaten von DAVID et al. (2013) bereits ein solches Modell umgesetzt. Dabei kam es zur Klassifizierung von drei verschiedenen Ausbreitungsszenarien (tägliche, durchschnittliche und wöchentliche Ausbreitung). Mithilfe von Abb. 5-2 wurde der Verlauf der Ausbreitungsintervalle von *M. galloprovincialis* festgehalten. Dabei wurden Ausbreitungsdistanzen bis über 8 km festgestellt. Die festgelegten Eingabewerte der drei Ausbreitungsszenarien lagen in einem Bereich zwischen 324 und 2268 m. Unter Einbezug desselben Ausbreitungsmodells bei

Verwendung der vorliegenden Daten für *M. sartor* und *M. sutor* wäre der erwartete Ausbreitungsbereich wohl etwas kleiner, die Ausbreitungsintervalle blieben vermutlich jedoch identisch.

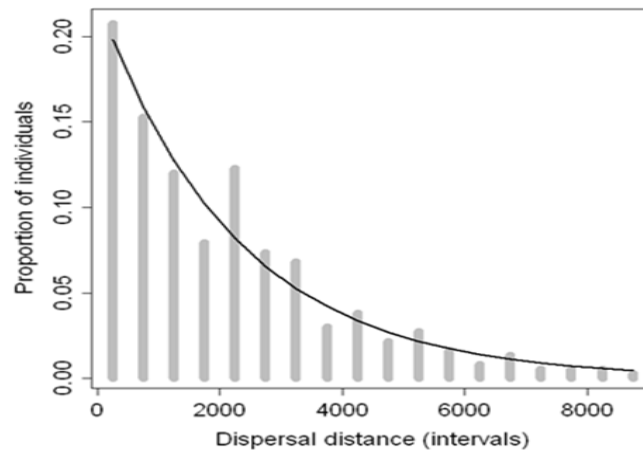


Abb. 5-2 simulierte Ausbreitungsdistanz von *M. galloprovincialis* (REPHRAME 2014)

In diesem Zusammenhang gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die Vektorenausbreitung nur einen Bestandteil des gesamten Ausbreitungsmodells darstellt. Andere Faktoren wie etwa die Nematodenübertragung, der Ausbruch der Kiefernwelke, die Kontrolle der Welke, etc. sind ebenfalls zu berücksichtigen (REPHRAME 2014).

Ausbreitungspotential der Käfer

Letztlich zeigt sich anhand der ermittelten Flugparameter, dass die Käfer innerhalb eines individuellen Fluges Distanzen von über 500 m erreichen können. Darüber hinaus sind die Totaldistanzen von über 7 bzw. 8 km während der gesamten Versuchsreihe ein Hinweis für ein enormes theoretisches Ausbreitungspotential der beiden Käferarten. Werden die Käfer in ihrer Rolle als Vektoren der Kiefernwelke verstanden, ist die potentielle Bedrohung offensichtlich. Allerdings gilt es in diesem Zusammenhang zu bedenken, dass die Käfer keine gezielte Wanderbewegung in eine Richtung durchführen werden.

Der Durchführungsbeschluss der EU im Falle eines Auftretens von *B. xylophilus* hält die Größen der Befalls- und Pufferzonen fest. In Österreich ist die Befallszone mit einem Mindestradius von 500 m um jeden befallenen Baum definiert, innerhalb derer es zu einem sanitären Kahlschlag kommt (TOMICZEK 2013). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der Flugdistanz von *M. sartor* und *M. sutor* legen jedoch nahe, dass mit diesem Radius die Ausbreitung der Vektoren nicht zu verhindern ist, da die Käfer im Stande sind innerhalb eines individuellen Fluges Distanzen von über 500 m zu erreichen und die

Maximaldistanzen und Totaldistanzen dabei noch viel größer sind. Zusätzlich demonstrieren ØKLAND et al. (2010) mittels Simulationsmodellen, dass für eine erfolgreiche Ausrottung von *B. xylophilus* alle Wirtsbäume im Radius von 8 km zu entfernen sind. Durch die bereits erwähnte Möglichkeit mehrmaliger Flugstopps von Bockkäfern im Freiland wird die Ausbreitungskapazität der Insekten abermals erhöht (DAVID et al. 2013). Der Radius des präventiven Kahlschlages sollte demnach überdacht und an das Ausbreitungspotential der Käfervektoren angepasst werden. Jedoch ist mit der aktuellen Kahlschlagfläche von gut 78,5 ha eine Vergrößerung des Radius unrealistisch. Alternativen wären zusätzliche Maßnahmen wie Lockstofffallen zum Fang der Käfer einzusetzen oder einige Wirtsbäume als Fangbäume für ein genaues Monitoring stehen zu lassen.

6 Schlussfolgerung

Mit Hilfe der vorliegenden Arbeit wurde versucht, einen Beitrag zu einer verbesserten Risikobewertung für *B. xylophilus* als EU-Quarantäneschädling zu erbringen. *M. sartor* und *M. sutor* sind im Falle eines Auftretens von *B. xylophilus* wichtige Vektoren für eine Ausbreitung der Kiefernwelke in Österreich. Genaue Kenntnisse über ihr Flug- und Ausbreitungsverhalten sind somit zentraler Bestandteil zur Unterstützung eines effizienten Monitorings und einer effizienten Schädlingsbekämpfung.

Zur gezielten Ermittlung des Flug- und Ausbreitungsverhaltens von *M. sartor* und *M. sutor* haben sich Flugmühlen als eine durchaus praktikable Methode herausgestellt, da die Durchführung dieser Flugversuche einen guten Einblick in die Flugaktivität zweier potenzieller Überträger des Kiefernholznmatothen in Österreich liefert. Die mittleren Flugdistanzen der beiden Arten liegen hierbei in einem Bereich von 480 bis 1433 m, die mittleren Flugzeiten in einem Bereich zwischen 10 und 22 min, und die mittleren Geschwindigkeiten zwischen 0,8 und 0,9 m/s. Das Ausbreitungspotential dieser beiden Käferarten ist somit durchaus groß. Zwischen den beiden Käferarten sowie zwischen den männlichen und weiblichen Testkäfern kam es zu keinen signifikanten Unterschieden. Morphologische Merkmale wie Käfergewicht und Flügellänge hatten nur bedingt Einfluss auf die Flugleistung der Käfer. Lokale Außen-Wetterverhältnisse und Raumtemperatur hatten ebenfalls keine bedeutende Auswirkung auf das Flugverhalten der Käfer.

Die ermittelten Flugparameter sollen dabei helfen, maximale Ausbreitungsdistanzen der Kiefernwelke besser zu erfassen, um dementsprechend zielgerechte Gegenmaßnahmen zu treffen. Der im Falle der Einschleppung von *B. xylophilus* laut aktuellem Notfallplan gültige Kahlschlagradius von 500 m wird mit der individuellen Flugleistung der Käfer klar überschritten. Eine Anpassung des Bekämpfungsmanagements an die aktuellen Flugparameter wäre für eine erfolgreiche Bekämpfung des Kiefernspiltholznmatothen wünschenswert. Zusätzlich sind weitere Studien in diesem Zusammenhang anzustreben, um die Ergebnisse zu validieren bzw. die Methoden zu verbessern.

Literaturverzeichnis

- AKBULUT, S.; LINIT, M. J. (1999): Flight performance of *Monochamus carolinensis* (Coleoptera: Cerambycidae) with respect to nematode phoresis and beetle characteristics. Population Ecology 28: 1014 - 1020.
- AKBULUT, S.; STAMPS, W. T. (2011): Insect vectors of the pine wood nematode: a review of the biology and ecology of *Monochamus* species. Forest Pathology 42: 89 -99.
- BAFU (2001): Kiefernholznematode – *Bursaphelenchus xylophilus*. Schweizer Eidgenossenschaft: Bundesamt für Umwelt.
<http://www.bafu.admin.ch/wald/11015/11851/12980/index.html?lang=de> (03.03.2015)
- BEDKER, P. L.; BLANCHETTE, R. A. (1988): Mortality of Scots pine following inoculation with the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Canadian Journal of Forest Research 18: 574 - 580.
- BENSE, U. (1995): Bockkäfer. Illustrierter Schlüssel zu den Cerambyciden und Vesperiden Europas. Weikersheim: Margraf.
- BIOLOGISCHE BUNDESANSTALT FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (2003): Invasive gebietsfremde Arten. In: Jahresbericht 2003 der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. <http://www.bba.de/veroeff/jahrber/jb2003pdf/invasivearten.pdf> (05.03.2015)
- BRAASCH, H. (1996): Pathogenitätstests mit *Bursaphelenchus mucronatus* an Kiefern- und Fichtensämlingen in Deutschland, European Journal of Plant Pathology 26: 205 - 216.
- CASTRO, L. A.; PETERSON, J. K.; SALDANA A.; PEREA, M. Y.; CALZADA, J. E.; PINEDA, V.; DOBSON, A. P.; GOTTDENKER, N. L. (2014): Flight behaviour and performance of *Rhodinus pallescens* (Hemiptera: Reduviidae) on a tethered flight mill. Journal of Medical Entomology 51: 1010 - 1018.
- CHAMBERS, D. L.; SHARP, J. L.; ASHLEY, T. R. (1976): Tethered insect flight: A system for automated data processing of behavioural events. Behaviour Research Methods & Instrumentation 8: 352 - 356.
- DAVID, G.; GIFFARD, B.; PIOU, D.; JACTEL, H. (2013): Dispersal capacity of *Monochamus galloprovincialis*, the European vector of the pine wood nematode, on flight mills. Journal Of Applied Entomology 138: 566 - 576.

- DAYI, M.; AKBULUT, S. (2012): Pathogenicity testing of four *Bursaphelenchus* species on conifer seedlings under greenhouse conditions. *Forest Pathology* 42: 213 - 219.
- DEAN, J. T. (2003): Book of Insect Records. Chapter 1: Fastest Flyer. University of Florida. http://entnemdept.ifas.ufl.edu/walker/ufbir/chapters/chapter_01.shtml (24.03.2015)
- DUDLEY, R.; SRYGLEY, R. B. (1994): Flight physiology of neotropical butterflies: allometry of airspeeds during natural free flight. *Journal of Experimental Biology* 191: 125 - 139.
- EDWARDS, J. S. (2006): The central nervous control of insect flight. *Journal of Experimental Biology* 209: 441 - 4413.
- EUROPEAN COMMISSION (2012): Commission implementing decision of 26 september 2012 on emergency measures to prevent the spread within the Union of *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer) Nickle et al. (the pine wood nematode). Official Journal of the European Union L 266: 42 - 52.
- EVANS, H. F.; McNAMARA, D. G.; BRAASCH, H.; CHADDOEUF, J.; MAGNUSSON, C. (1996): Pest risk analysis (PRA) for the territories of the European Union (as PRA area) on *Bursaphelenchus xylophilus* and its vectors in the genus *Monochamus*. EPPO Bulletin 26: 199 - 249.
- FRANZEN, M.; NILSSON, S. G. (2007): What is the required minimum landscape size for dispersal studies? *Journal of Animal Ecology* 76: 1224 - 1230.
- FUTAI, K. (2008): Pine wilt in Japan: From first incidence to the present, S. 5 - 12. In ZHAO, B. G.; FUTAI, K.; SUTHERLAND, J.R.; TAKEUCHI, Y. (2008): Pine Wilt Disease. Japan: Springer.
- FUTAI, K.; SHUTERLAND, J. R. (1989): Pathogenicity and attraction to host extracts of Canadian pinewood nematodes: studies with Scots pine, western larch, and black spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1256 - 1261.
- GALL, L. F. (1984): The effects of the capturing and marking on subsequent activity in *Boloria acrocnema* (Lepidoptera: Nymphalidae), with a comparison of different numerical models that estimate population size, *Biological Conservation* 28: 139 -154.
- GILLIES, M. T.; WILKES, T. J. (1981): Field experiments with a wind tunnel on the flight speed of some West African mosquitoes (Diptera: Culicidae). *Bulletin of Entomological Research* 71: 65 - 70.
- HALBIG, P. (2013): Flight activity of longhorn beetles *Monochamus sartor* and *M. sutor*: Attractiveness of insect and tree produced volatiles. Masterarbeit, Univ. f. Bodenkultur, Wien.

- HELLRIGL, K. (1971): Die Bionomie der europäischen *Monochamus* Arten (Coleoptera, Cerambycid) und ihre Bedeutung für die Forst und Holzwirtschaft. REDIA - Giornale di Zoologia 52.
- HELLRIGL, K. (1974): Cerambycidae, Bockkäfer, *Monochamini*, S. 192-196. In SCHWENKE, W. (ed.). Die Forstschädlinge Europas. Band 2. Hamburg und Berlin: Parey.
- HOCH, G.; MITTERMAYR, D.; KREHAN, H. (2014): *Monochamus*-Arten als potenzielle Vektoren des Kiefernspiltholznematoden in Österreich: Lockstofffallen zum Monitoring des Fluges. Forstschutz Aktuell 60: 5 - 11.
- HOYER-TOMICZEK, U.; TOMICZEK, C. (2005): PHRAME- eine EU-Forschungskooperation: Wie gefährlich ist der Kiefernspiltholznematode für Europa? Forstschutz Aktuell 34: 21- 24.
- HUGHES, J.; DORN, S. (2002): Sexual differences in the flight performance of the oriental fruit moth, *Cydia molesta*. Entomologia Experimental et Applicata 103: 171 - 182.
- HUMPHRY, S. J.; LINIT, M. J. (1989): Effect of pinewood nematode density on tethered flight of *Monochamus carolinensis* (Coleoptera: Cerambycidae). Environmental Entomology 18: 670 - 673.
- ISPM Nr. 15 (2009): Internationale Standards für phytosanitäre Maßnahmen. Regelung für Holzverpackungsmaterial im internationalen Handel. Arbeitsübersetzung des Julius Kühn-Institutes Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen.
- JONES, V. P.; NARANJO, S. E.; SMITH, T. J. (o.J.): The Flight Mill.
http://entomology.tfrec.wsu.edu/VPJ_Lab/Flight-Mill.html#section5 (24.03.2015)
- JULIUS-KÜHN-INSTITUT-BUNDESFORSCHUNGSINSTITUT FÜR KULTURPFLANZEN (o.J): *Monochamus galloprovincialis* und die Kiefernwelke. <https://www.uni-goettingen.de/de/monochamus-galloprovincialis-und-die-kiefernwelke/108992.html> (03.03.2015)
- KAWAMOTO, K.; SHIRAI, Y.; OKADA, T. (1987): Preliminary studies on the flight ability of the cabbage worm, *Hellula undalis* Fabricius (Lepidoptera: Pyralidae), using a flight mill system. Bulletin of the National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea Series A1: 147 - 156.
- KISHI, Y. (1995): The pine wood nematode and the Japanese pine sawyer. Tokyo, Japan.
- KIYOHARA, T.; TOKUSHIGE, Y. (1971): Inoculation experiments of a nematode, *Bursaphelenchus* sp. onto pine trees (in Japanese with English abstract). Journal of the Physical Society of Japan 53: 2010 - 218.

- KLAUSNITZER, B.; SANDER, F. (1978): Die Bockkäfer Mitteleuropas. Wittenberg Lutherstadt: A. Ziemsen
- KREHAN, H. (o.J.): Kiefernneematode. Vortrag Bundesamt für Wald – Amtlicher Pflanzenschutzdienst. file:///D:/Downloads/Kiefernneematode%20-%20Vortrag%20von%20DI%20Krehan%20(BFW)%20(2).pdf (24.03.2015)
- KREHAN, H.; STEYRER, G. (2006): Klimaänderung – Schadorganismen bedrohen unsere Wälder. BFW-Praxisinformation 10: 15 - 17.
- LINIT, M. J. (1988): Nematode-Vector Relationships in the Pine Wilt Disease System. Journal of Nematology 20: 227 - 235.
- LOPEZ, V. M.; McCLANAHAN, M. N.; GRAHAM, L.; HODDLE, M. S. (2014): Assessing the flight capabilities of the goldspotted oak borer (Coleoptera: Buprestidae) with computerized flight mills. Journal of Economic Entomology 107: 1127 - 1135.
- MAMIYA, Y.; ENDA, N. (1979): *Bursaphelenchus mucronatus* n. sp. (Nematoda: Aphelenchoididae) from pine wood and its biology and pathogenicity to pine trees. Nematologica 25: 353 - 361.
- MEYER, M. (2002): Untersuchung zur Verbreitung der Langhornböcke (*Monochamus* spp.) in Deutschland und zu deren Bedeutung als Vektoren für holzbewohnende Nematoden als Beitrag zu einer Risikoanalyse für *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner und Buhrer, 1943), Nickle, 1970. Dipl.-Arb., Technische Universität, Dresden.
- MEYER, M.; SCHRÖDER, T.; MÜLLER, M. (2004): Nematodengefahr fordert erhöhte Aufmerksamkeit. Holz-Zentralblatt 62: 815 + 821.
- MILLER, J. R.; REOLOFS, W. L. (1978): Sustained-flight tunnel for measuring insect responses to wind-borne sex pheromones. Journal of Chemical Ecology 4: 187 - 198.
- MORIYA, S. (1995): A preliminary study on the flight ability of the sweetpotato weevil, *Cylas formicarius* (FABRICIUS) (Coleoptera: Apionidae) using a flight mill. Journal of Applied Entomology and Zoology 30: 244 - 246.
- NACHTIGALL, W. (2003): Insektenflug: Konstruktionsmorphologie, Biomechanik, Flugverhalten. Deutschland: Springer.
- ØKLAND, B.; SKARPASS, O.; SCHROEDER, M.; MAGNUSSON, C.; LINELÖW, Å.; THUNES, K. (2010): Is Eradication of the Pinewood Nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) Likely? An Evaluation of Current Contingency Plans. Risk Analysis 30: 1424 - 1439.

- PEREIRA, F.; MOREIRA, C.; FONESCA, L.; VAN ASCH, B.; MOTA, M.; ABRANTES, I.; AMORIM, A. (2013): New insights into the phylogeny and worldwide dispersion of two closely related nematode species, *Bursaphelenchus xylophilus* and *Bursaphelenchus mucorantus*. PLOS ONE. 8: DOI: 10.1371/journal.pone.0056288.
- POLOMSKI, J. (2008): Kiefernholz-nematode. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
http://www.wsl.ch/fe/walddynamik/waldschutz/eingeschleppt/nematode_DE (05.03.2015)
- PRECHT, H.; CHRISTOPHERSEN, J.; HENSEL, H. (1955): Temperatur und Leben. Springer, Berlin
- PROJEKT KONSORTIUM REPHRAME (2014): 3rd Periodic Report. REPHRAME- Development of improved methods for detection, control and eradication of pine wood nematode in support of EU Plant Health policy.
- PROJEKTKONSORTIUM REPHRAME (2015): Just how safe are your forests?
<http://www.rephrame.eu/ptk-toolkit.php> (29.04.2015)
- RANIUS, T. (2006): Measuring the dispersal of saproxylic insects: a key characteristic for their conservation. Population Ecology 48: 117 - 188.
- RASKE, A. G. (1972): Biology and control of *Monochamus* and *Tetropium*, the economic wood borers of Alberta (Coleoptera: Cerambycidae), S. 51. Northern Forest Research Centre, Internal Report. Canadian Forestry Service, Department of the Environment, Alberta, Canada.
- RENAULT, D.; HANCE, T.; VANNIER, G.; VERNON, P. (2003): Is body size an influential parameter in determining the duration of survival at low temperatures in *Alphitobius diaperinus* Panzer (Coleopter: Tenebrionidae)? Journal of Zoology 259: 381 - 388.
- REPHRAME (2012): Kiefern-splintholz-nematode im Visier: Methoden zur Erkennung, Kontrolle und Ausrottung. <http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=9625> (05.03.2015)
- REPHRAME (2014): 2nd Periodic Report. REPHRAME- Development of improved methods for detection, control and eradication of pine wood nematode in support of EU Plant Health policy.
- REPHRAME (2015): Final Report. REPHRAME - Development of improved methods for detection, control and eradication of pine wood nematode in support of EU Plant Health policy.
- REPHRAME (o.J.a): Development methods for detection, control and eradication of pine wood nematode on support of EU plant Health Policy (REPHRAME). Informationsfolder.

- REPHRAME (o.J.b): Pests, forests and climate change - latest research develops new ways of protecting Europe's woodlands. <http://www.rephrame.eu/index.php> (09.03.2015)
- REPHRAME (o.J.c): Development of a pine wood nematode (PWN) Tool Kit. <http://www.rephrame.eu/pwn.php> (09.03.2015)
- RILEY, J. R.; DOWNHAM, M. C. A.; COOTER, R. J. (1997): Comparison of the performance of *Cicadulina* leafhoppers on flight mills with that to be expected in free flight. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 83: 317 - 322.
- SANCHEZ-HUSILLOS, E.; ETXEBESTE, I.; PAJARES, J. (2015): Effectiveness of mass trapping in the reduction of *Monochamus galloprovincialis* Olivier (Coleoptera: Cerambycidae) populations, *Journal of Applied Entomology*: DOI: 10.1111/jen.12219.
- SCHMIDT, D.; SCHMIDT, D. (2014): Faszination Insektenwelt: Grundlage der Insektenkunde für GROSS und klein. Norderstedt: Books on Demand.
- SCHNEIDER, C. (2003): The influence of spatial scale on quantifying insect dispersal: an analysis of butterfly data, *Ecological Entomology* 28: 252 - 256.
- SCHNEIDER, P. (1975): Die Flugtypen der Käfer. *Entomologica Germanica* 1: 222 - 231. In: NACHTIGALL, W. (2003): *Insektenflug: Konstruktionsmorphologie, Biomechanik, Flugverhalten*. Deutschland: Springer.
- SCHNEIDER, P.; MEURER, I. (1975): Die mittelbar-indirekte Bewegung der Elytren beim Nashornkäfer *Oryctes boas* Fabr. (Coleoptera). *Zoologische Jahrbücher* 79: 297 - 310. In: NACHTIGALL, W. (2003): *Insektenflug: Konstruktionsmorphologie, Biomechanik, Flugverhalten*. Deutschland: Springer.
- SCHRÖDER, T. (2004): Der Kiefernholznematode. *LWF aktuell* 45: 23 - 24.
- SCHRÖDER, T. (2014): Kiefernholznematode. Informationsblatt des Julius Kühn-Institut. http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_veroeff/faltblaetter/kiefernholznematode_.pdf (05.03.2015)
- SCHWENKE, W. (1974): *Die Forstschädlinge Europas*. Band 2. Hamburg und Berlin: Parey.
- SENGER, S. E.; ROITBERG, B. D.; THISTLEWOOD, H. M. A. (2007): Relative flight responses of *Rhagoletis indifferens* as influenced by crowding, sex, and resources. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 123: 91-100.
- SHIN, S. C. (2008): Pine wilt disease in Korea, 26-32. In ZHAO, B. G.; FUTAI, K.; SUTHERLAND, J. R.; TAKEUCHI, Y. (2008): *Pine Wilt Disease*. Japan: Springer.

- SHIRAI, Y. (1995): Longevity, flight ability and reproductive performance of the diamondback moth, *Putella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae), related to adult body size. *Research on Population Ecology* 37: 269 - 277.
- STEINER, G.; BUHRER, E. M. (1934): *Aphelenchoides xylophilus* N. Sp.: A nematode associated with bluestain and other fungi in timber. *Journal of Agricultural Research* 48: 949 - 951.
- TAYLOR, R. A. J.; BAUER, L. S.; POLAND, T. M.; WINDELL, K. N. (2010): Flight performance of *Agilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) on a flight mill and in free flight. *Journal of Insect Behaviour* 23: 128 - 148.
- TOGASHI, K. (1988): Population density of *Monochamus alternatus* adults (Coleoptera: Cerambycidae) and incidence of pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematode: Aphelenchoididae). *Research on Population Ecology* 30: 17 - 192.
- TOGASHI, K. (1990): A field experiment on dispersal of newly emerged adults of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), *Research on Population Ecology* 32: 1 - 13.
- TOMICZEK, C. (2013): Der Kiefernholznematode – ein Notfallplan für Österreich. *Forstschutz Aktuell* 59: 8 - 11.
- TOMICZEK, C.; CECH, T.; KREHAN, H.; PERNY, B. (2005): Krankheiten und Schädlinge an Bäumen im Stadtbereich. Wien: Eigenverlag von Christian Tomiczek.
- TRÄGÅRDH, I. (1929): Om Tallbäckens Skadegörelse och Bekämpande - On the injury of the pine-sawyer (*Monochamus sutor* L.) and its prevention. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt*. 25: 171 - 228.
- WÄCHTER, O.; AMLACHER, N. (2014): Kiefernfasenwurm – eine Gefahr für heimische Nadelwälder? *Forstzeitung* 9: 42 - 43.
- WALLIN, H.; SCHRÖDER, M.; KVAMME, T. (2013): A review of the European species of *Monochamus* Dejean, 1821 (Coleoptera: Cerambycidae) – with a description of the genitalia characters. *Norwegian Journal of Entomology* 60: 11 - 38.
- WEBSTER, J.; MOTA, M. (2008): Pine wilt disease: Global issues, trade and economic impact. Portugal: Springer.
- WINGFIELD, M. J. (1987): Pathogenicity of the pine wood nematode. St. Paul, Minn.: APS-Press

YAMANAKA, T.; TATSUKI, S.; SHIMADA, M. (2001): Flight characteristics and dispersal patterns of fall webworm (Lepidoptera: Arctiidae) males. *Environmental Entomology* 30: 1150 - 1157.

ZHANG, X.; LINIT, M. J. (1998): Comparison of oviposition and longevity of *Monochamus alternatus* and *M. carolinensis* (Coleoptera: Cerambycidae) under laboratory conditions. *Environmental Entomology* 27: 885 – 891.

ZHAO, B. G.; FUTAI, K.; SUTHERLAND, J. R.; TAKEUCHI, Y. (2008): Pine wilt disease. Japan: Springer.

Eidesstattliche Versicherung

Name: Vorwagner

Vorname: Eva Maria

Matrikelnummer: 0840682

Studienkennzahl: 425

Hiermit versichere ich, Eva Maria Vorwagner, an Eides statt, dass ich die vorliegende Mastarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden. Ebenfalls versichere ich, dass diese Arbeit mit der von dem Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift