

Bioakustik zum Aufspüren von holzbrütenden Schadinsekten

Martin Brandstetter und Sebastian Hübner

Kurzfassung | Untersucht wurden die Schallemissionen von Larven des Roten Palmenrüsslers (*Rhynchophorus ferrugineus*), des Asiatischen Laubholzbockkäfers (*Anoplophora glabripennis*) und von Bockkäfern der Gattung *Monochamus*. Ziel unserer Studien war es, bessere Grundlagen zur Bioakustik dieser Holzschädlinge zu schaffen und einen neuen praxisorientierten Ansatz zu ihrer Früherkennung zu entwickeln. Es wurde eine Sammlung mit repräsentativen Aufnahmen der Schallemissionen der drei Arten erstellt. Charakteristische Geräusche wurden inventarisiert, vermessen und ihre grundlegenden bioakustischen Parameter erfasst. Clustering-Experimente zeigten, dass sich bestimmte Beißgeräusche und Stridulationslaute potenziell zur Arterkennung eignen.

Schlüsselworte | Bioakustik, Früherkennung, Detektion, *Rhynchophorus ferrugineus*, *Anoplophora glabripennis*, *Monochamus* spp.

Verfahren zur bioakustischen Erkennung von Schädlingen beruhen auf der Tatsache, dass im Holz verborgene aktive Käferlarven gut messbare Schallemissionen produzieren. Jüngere Forschungen zeigen, dass einige dieser Geräusche artspezifisch sind (Chesmore 2008). Die Idee, Schallemissionen zur Diagnose von Schädlingsbefall zu verwenden, ist nicht neu. Bereits in den 1920er Jahren wurden erste elektronische Geräte zum Abhören von Holz angeboten. Diese Apparate und ihre Nachfolgemodelle fanden aber keine Verbreitung, da das menschliche Gehör die Geräusche der Larven nur unter optimalen Bedingungen erkennen kann (Mankin et al. 2011). In realen Begutachtungssituationen werden die Geräusche der Larven von zahlreichen Störgeräuschen überlagert. Heute können die charakteristischen Geräusche automatisiert mit speziellen Mustererkennungsalgorithmen auch dann identifiziert werden, wenn sie durch Störgeräusche überlagert sind. Der

Computer kann dabei im Prinzip den gesamten Abhör- und Auswertungsprozess automatisch ausführen.

Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „Q-Detect: Development of detection methods for quarantine plant pests for use by Plant Health Inspection Services“ untersuchten wir die Bioakustik von drei Modellorganismen, die derzeit in Europa von großer phytosanitärer Bedeutung sind:

- Der Rote Palmenrüssler (*Rhynchophorus ferrugineus*) stammt aus Südost-Asien und verursacht im Mittelmeerraum ein Palmen-Massensterben. *R. ferrugineus* befällt vor allem Dattelpalmen (*Phoenix* sp.).
- Der Asiatische Laubholzbockkäfer (*Anoplophora glabripennis*) ist ein außergewöhnlich gefährlicher Schädling, der eine Vielzahl von Laubbäumen befällt.
- Bockkäfer der Gattung *Monochamus* haben als Vektoren des Kiefernholznematoden *Bursaphelenchus xylophi-*

Abstract

Bioacoustics for Detection of Wood-boring Insect Pests

Sound emissions of larvae of the red palm weevil (*Rhynchophorus ferrugineus*), the Asian long-horned beetle (*Anoplophora glabripennis*) and sawyers of the genus *Monochamus* were analyzed. The aim was to provide a better basic understanding of the bioacoustics of these wood-boring insects in order to develop a practical method for early detection. Characteristic sounds were inventoried, measured and basic bioacoustic parameters recorded. Clustering experiments showed that biting and stridulation sounds are promising candidates for species recognition.

Keywords | bioacoustics, early detection method, *Rhynchophorus ferrugineus*, *Anoplophora glabripennis*, *Monochamus* spp.

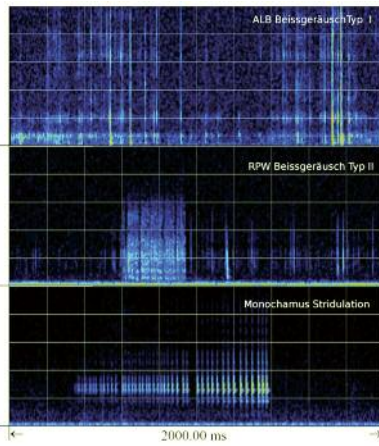


Abbildung 1: Spektrogramme von Beißgeräuschen von *A. glabripennis* (oben) und *R. ferrugineus* (Mitte) sowie eines Stridulationslautes von *M. sutor* (unten). Der Stridulationslaut ist eine Sequenz von akustischen Einzelereignissen, die in rascher Abfolge nacheinander angeordnet sind. Jedes der Spektrogramme zeigt einen Frequenzbereich von 0-11,25 kHz.

Figure 1: Spectrograms of biting sounds of *A. glabripennis* (top) and *R. ferrugineus* (middle) as well as stridulation sound of *M. sutor* (bottom). The stridulation sound is a sequence of distinct acoustic events following in fast progression. Each histogram shows a range of frequency from 0 to 11.25 kHz.

lus große Bedeutung. Der Nematode hat sich bereits auf Kiefern in ganz Portugal und in Teilen Spaniens verbreitet. Bei uns sind vier *Monochamus*-Arten heimisch, die als Überträger fungieren könnten. Von diesen wurden *M. sutor* und *M. sartor* untersucht.

Das Hauptziel unserer Arbeit bestand darin, bessere Grundlagen zur bioakustischen Früherkennung dieser holzbrütenden Schadinsekten zu schaffen, bestehende Technologien zu evaluieren und einen neuen praxisorientierten Ansatz zu entwickeln. Wesentliche Arbeitsschritte waren die Erstellung von repräsentativen Referenz-Tonaufnahmen aller relevanten Geräusche des jeweiligen Larvalstadiums, Erstellung eines Geräusch-Inventars, Messung und quantitative Beschreibung grundlegender bioakustischer Parameter, Ermittlung akustischer Parameter für eine automatisierte Artbestimmung und schließlich Ausarbeitung praxistauglicher Tests an lebenden Bäumen.

Referenz-Tonaufnahmen

Repräsentative Tonaufnahmen aller relevanten Geräusche, die von den Larven der drei beobachteten Arten im Holz erzeugt werden, wurden erstellt. Diese Sammlung bildete die Grundlage für alle weiterführenden empirischen Analysen. Es ist geplant, sie in Zukunft weiter auszubauen.

Aufnahmen wurden sowohl im Labor als auch im Freiland hergestellt. Im BFW-Labor wurde eine schallisolierte Aufnahmebox verwendet, in der die akustische Aktivität von *Monochamus sator*-, *M. sutor*- und *Anoplophora glabripennis*-Larven in Holzstücken gemessen wurde. Erstere stammten aus Brutansätzen unter kontrollierten Bedingungen, letztere wurden in Befallsgebieten in Norditalien (Cornuda, Masere) und Oberösterreich (Braunau/Inn) gesammelt. Aufnahmen von *R. ferrugineus* in Zuckerrohr wurden in Quarantänräumen des Volcani-Centers in Israel sowie an lebenden Palmen auf

Mallorca, Spanien, hergestellt.

Für die Aufnahmen wurden Elektret-Mikrofonkapseln von Panasonic verwendet. Sie zeichnen sich durch einen gleichmäßigen Frequenzgang im Bereich von 50 Hz -16 kHz aus. Die Kapseln wurden an der Holzoberfläche angebracht. Hierzu musste rund 1 cm² Borke abgezogen werden. Bei Palmen war dies nicht nötig, da die verholzten Stiele der Palmblätter eine ebene Oberfläche besitzen. Vor der Aufnahme wurden die Mikrofone mit Installationskitt fixiert. Dieser verhindert ein Verrutschen und dämpft den Umgebungsschall. Die Mikrofone wurden über einen rauscharmen, doppelt abgeschirmten Mikrofon-Vorverstärker (Sejona R&D) und eine USB-Soundkarte (Behringer UCA222) mit dem PC verbunden. Zur Aufnahme wurde die Recording-Software Amon (Sejona R&D) verwendet. Diese besitzt ein automatisches File-Splitting und gestattet, Aufnahmen mehrere Wochen lang laufen zu lassen. Im Feld wurde zur Aufnahme ein portabler Recorder (Marantz PMD 661) verwendet. Alle Aufnahmen wurden mit 44.1 KHz, 16 Bit im PCM-Format ausgeführt.

Die Sammlung umfasst derzeit für jede Art rund 150 Referenzaufnahmen in Laborqualität. Weiters liegen 9,7 Stunden Freilandaufnahmen an Palmen mit Palmenrüssler-Befall vor. Diese enthalten nicht nur die Geräusche der Larven selbst, sondern auch typische Störgeräusche, mit denen in der Praxis zu rechnen ist.

Geräusch-Inventare

In einem nächsten Schritt wurden aus den Referenz-Tonaufnahmen *Geräusch-Inventare* erstellt. In diesen werden alle charakteristischen Geräusche der untersuchten Arten verzeichnet, sie haben qualitativen Charakter und dienen der Systematisierung weiterführender Analysen. Die Inventare wurden manuell durch Abhören, Visualisieren, Vergleichen und Zählen der Aufnahmen angefertigt. Die Inventarisierung erfolgte mit

Hilfe der Software Sound Recognition Lab (Sejona R&D).

In das Inventar wurden sechs verschiedene Geräushtypen aufgenommen (Tabelle 1). *Typ-I-Beißgeräusche* sind kurze laute Schallimpulse, die in relativ langsamer Abfolge auftreten. Sie erinnern an das Geräusch beim Zerschlagen von dünnen Ästen. *Typ-II-Beißgeräusche* sind Serien von ungleichmäßigen, lauten Impulsen in schneller Abfolge. Sie ähneln dem Geräusch, das beim Beißen in einen Apfel entsteht. Beide Arten von Beißgeräuschen werden durch die Mandibeln der Larven erzeugt. *Stridulationslaute* werden durch das Aneinanderreiben zweier Körperteile verursacht (vgl. Zirpen einer Zikade). Meist dienen sie der Kommunikation. *Atemgeräusche* sind vergleichbar mit den Ein- und Ausatem-

geräuschen von Säugetieren. Bei *Bewegungsgeräuschen* handelt es sich um ein Rascheln mit relativ geringer Lautstärke. *Klopfgeräusche* sind Kommunikationslaute, die zur Vertreibung anderer Larven der gleichen Spezies dienen (Victorsson und Wikars 1996). Abbildung 1 zeigt Spektrogramme von beiden Beißgeräusch-Typen und von einem Stridulationslaut. Die Tonaufnahmen aus dem Freiland beinhalteten darüber hinaus eine Reihe wichtiger Störgeräusche (Tabelle 2).

Bioakustische Parameter

Um beurteilen zu können, welche der inventarisierten Geräusch-Typen sich zur Befallserkennung und Artidentifikation eignen, sind genaue Kenntnisse ihrer grundlegenden bioakustischen Parameter nötig.

	Typ-I-Beißgeräusche	Typ-II-Beißgeräusche	Stridulationslaute	Atemgeräusche	Bewegungsgeräusche	Klopfgeräusche
<i>Monochamus</i> spp.	sehr häufig	nicht vorhanden	häufig	selten	selten	selten
<i>Anoplophora glabripennis</i>	sehr häufig	nicht vorhanden	nicht vorhanden	selten	selten	selten
<i>Rhynchophorus ferrugineus</i>	sehr häufig	häufig	häufig	selten	selten	selten

Tabelle 1: Geräusch-Inventar für die drei untersuchten Arten.

Table 1: Sound inventory for all three investigated species.

Störgeräusch	Beeinträchtigung der Analyse	Häufigkeit	Pegel	Orte
Straßenverkehr, Kehrmaschinen	mittel	häufig	≤ 90 dB	überall
Rasenmäher, Motorsägen	stark	mittel	≤ 102 dB	Grünanlagen
Fluglärm	gering	selten	≤ 70 dB	Umfeld von Flughäfen
Hundegebell, Vogellaute	mittel	häufig	≤ 63 dB	überall
Sprechen, Rufe	gering	häufig	≤ 65 dB	überall
Kirchenglocken	gering	selten	≤ 65 dB	Stadtzentren
EMI-Störgeräusche	mittel	häufig	≤ 72 dB	überall
Geräusche durch Wind	stark	häufig	≤ 96 dB	überall

Tabelle 2: Störgeräusch-Inventar für den urbanen Raum, ermittelt bei den Messungen an Palmen auf Mallorca.

Table 2: Background noise inventory for urban areas, identified in the measurements of palm trees on Mallorca.

Dazu wurden für jedes klassifizierte Geräusch der Referenz-Tonaufnahmen folgende Parameter bestimmt: (1) das zentrale Frequenzband im -3dB-Bereich (*center-frequency*), (2) das Frequenzband des Messpunkts mit maximaler Energie (*peak-frequency*), (3) das Frequenzband mit maximaler mittlerer Energie (*pitch-frequency*), (4) die -3dB-Bandbreite (*bandwith*), (5) die Zeitdauer (*length*) und (6) das Energie-Maximum (*peak-energy*). Geräusche, wie die Stridulationslaute von *Monochamus* spp., sind als Sequenzen von akustischen Einzelereignissen zu verstehen. Hier wurden die obigen Messungen an den Einzelereignissen sowie

leise und diffuse Geräuschtypen sind eher ungeeignet. Häufige und laute Geräuschtypen, die wenig variable akustische Eigenschaften besitzen (z.B. die Stridulationslaute von *Monochamus*), sind potenziell geeignet.

Bei allen drei untersuchten Arten erwiesen sich Typ-I-Beißgeräusche als am besten für die Diagnose geeignet. Bei *R. ferrugineus* kommen außerdem sehr oft Typ-II-Beißgeräusche vor. Atem-, Bewegungs- und Klopfgeräusche traten in dem akustischen Material selten auf. Bei diesen Typen wurden für die oben genannten Parameter nur Mittelwerte bestimmt. Für alle anderen Geräuschtypen wurden Histogramme der Parameter berechnet (Abbildung 2).

Im Falle von *R. ferrugineus* und *Monochamus* spp. eignen sich auch Stridulationslaute. Da es sich bei diesen vermutlich um Kommunikationslaute handelt, sind sie für eine Artidentifikation besonders interessant.

Experimentelle bioakustische Artbestimmung

In gewissem Umfang gestattete das Audiomaterial, Experimente zur automatischen Unterscheidung verschiedener Arten durchzuführen. Ziel war, Kombinationen akustischer Parameter innerhalb gleicher Geräuschtypen zu finden, anhand derer die Artdifferenzierung am besten durchführbar ist.

Es wurden zwei Experimente durchgeführt, in denen (1) Typ-I-Beißgeräusche von *R. ferrugineus* vs. *A. glabripennis* und (2) Stridulationslaute von *R. ferrugineus* vs. *M. sutor* verglichen wurden.

Dabei wurden für die jeweiligen Arten Geräusche der zu untersuchenden Geräuschklasse manuell selektiert und in den beiden Mengen maschinell vermessen. Die Größen *Center-Frequency*, *Length*, *-3dB-Bandwidth* und *Peak-Energy* wurden bestimmt und in Streudiagrammen dargestellt. Cluster (Ballungen) wurden markiert.

Da alle Punkte in den Clustern einer

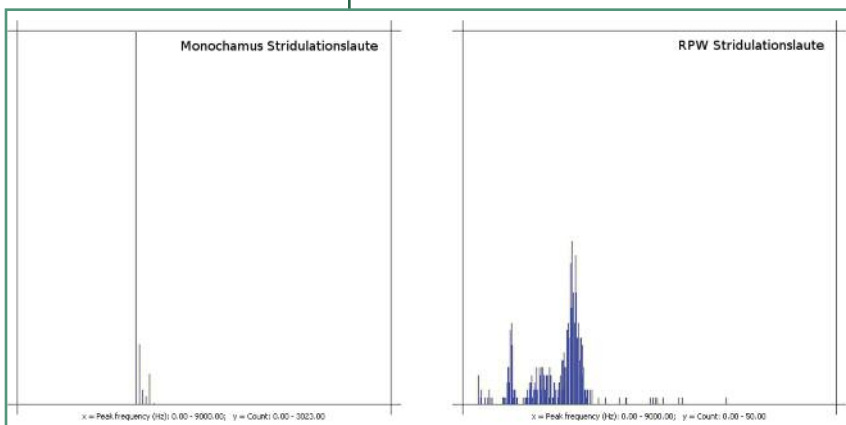


Abbildung 2: Histogramme „Peak-Frequency“ von Stridulationslauten von *M. sutor* und *R. ferrugineus*.

Figure 2: Histograms "peak frequency" of stridulation sounds of *M. sutor* and *R. ferrugineus*.

an den ganzen Sequenzen ausgeführt. Dabei wurden zusätzlich folgende Parameter bestimmt: (A) die Ereignis-Wiederholrate (*item repetition rate*) pro Sekunde, (B) die Anzahl von Einzelereignissen pro Sequenz (C), die Länge der Sequenzen, (D) das Vorliegen von Rhythmicität (als regelmäßige zeitliche Abfolge von Ereignissen).

Die Bestimmung der akustischen Parameter erfolgte mit der Software Sound Recognition Lab. Alle Dateien der Aufnahmensammlung werden dazu mit speziell trainierten Klassifikatoren durchsucht, gefundene Geräusche wurden automatisch markiert und vermessen.

Mit Hilfe der so bestimmten Größen war es möglich, aus den Inventar-Geräuschtypen Kandidaten für bioakustische Befallstests auszuwählen. Seltene,

der beiden getesteten Spezies zugeordnet werden konnten, war es möglich, die Artsspezifität der Cluster zu beurteilen. Disjunkte Cluster sind artsspezifisch, identische und stark überlappende sind es nicht. Die erforderlichen maschinellen Klassifikationen und das Erstellen der Streudiagramme erfolgten mit der Software Sound Recognition Lab. Die Clusterexperimente haben gezeigt, dass für alle drei Arten artsspezifische Cluster zu berechnen sind (beispielhaft dargestellt in Abbildung 3).

Feldtest an Palmen auf Mallorca

Der bioakustische Ansatz wurde in einer Studie an Palmen auf Mallorca unter Praxisbedingungen getestet. Hierbei wurden lebende Palmen im urbanen Raum bioakustisch auf Palmenrüssler-Befall überprüft, um zu klären, wie gut sich die Geräusche der Larven im urbanen Bereich aufzeichnen lassen und ob die im Freilandaufzeichnungen mit denen aus dem Labor übereinstimmen. Auch sollte getestet werden, welche Arten von Störgeräuschen wie in Erscheinung treten. Schließlich sollten erste Erkenntnisse gewonnen werden, ob eine bioakustische Diagnose von Palmenrüssler-Befall mit vertretbarem Aufwand realisiert werden kann.

Im Juli 2013 wurde an acht Tagen die akustische Aktivität in verschiedenen Palmen-Arten aufgezeichnet (Tabelle 3). Die Messungen fanden zwischen 6 und 20 Uhr an Straßen und in öffentlichen Parks im Süden der Insel statt. Die Palmen wurden zufällig ausgewählt und auf

sichtbare Befallssymptome untersucht. Alle Tonaufnahmen und Auswertungen erfolgten mit den oben dargestellten Verfahren und Softwareinstrumenten. Das Hauptaugenmerk lag auf Typ-I- und Typ-II-Beißgeräuschen sowie auf Stridulationslauten.

Geräusche der Palmenrüssler-Larven ließen sich an lebenden Palmen sehr gut aufzeichnen. Förderlich hierbei waren der kompakte Stamm und die hervorragende Schalleitfähigkeit des Palmholzes. Auch konnten Kontaktmikrofone am Stamm oder an den Blattstielen verletzungsfrei angebracht werden.

In den Freilandaufnahmen ließen sich alle Geräuschtypen des Geräusch-Inventars finden. Allerdings enthielt nur eine einzige Aufnahme Stridulationslaute. Diese müssen daher aufgrund ihrer Seltenheit als zweitrangig für bioakustische Tests angesehen werden. In der Mehrzahl der Palmen fanden sich beide Typen von Beißgeräuschen. Insgesamt wurden bei 37 von 56 (66 %) der untersuchten Palmen eindeutig Geräusche des Palmenrüsslers festgestellt. Darunter waren auch Palmen, die keine sichtbaren Symptome zeigten oder bereits mit Insektiziden behandelt worden waren.

Zusätzlich konnte ein Störgeräusch-Inventar erstellt werden, in dem die häufigsten Arten von Umgebungsgeräuschen enthalten sind (Tabelle 2). Diese beeinträchtigen akustische Analysen mehr oder weniger stark. Hervorzuheben sind Geräusche durch Bewegungen der Palmwedel im Wind. Diese können Typ-II-Beißgeräusche und Stridulationslaute so

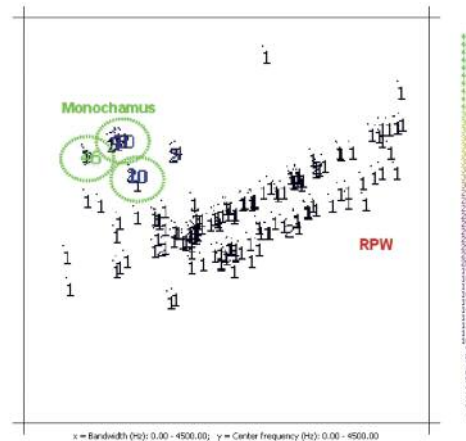
Palmenart	Anzahl untersuchter Palmen	Anzahl Messungen	Zeitdauer insgesamt (h)	Palmen mit <i>Rhychnophorus</i> Geräuschen	
<i>Phoenix canariensis</i>	42	46	8,1	30	71,4 %
<i>Phoenix dactylifera</i>	10	10	1,0	3	30,0 %
<i>Washingtonia</i>	4	4	0,6	4	100,0 %
Insgesamt	56	60	9,7	37	66,0 %

Tabelle 3: Übersicht über die Freilandaufnahmen an Palmen.

Table 3: General view about field studies on palm trees.

Abbildung 3: Streudiagramm für Stridulationslaute von *R. ferrugineus* und *M. sutor*. Die Laute von *M. sutor* gruppieren sich in drei eng beieinander liegenden Clustern, während die Laute des *R. ferrugineus* weit streuen.

Figure 3: Scatterplot of stridulation sounds of *R. ferrugineus* and *M. sutor*. The sounds of *M. sutor* form three adjacent clusters while sounds of *R. ferrugineus* are widely scattered.



stark überlagern, so dass keine Diagnose mehr möglich ist. Das Problem kann in der Praxis umgegangen werden, indem nur störgeräuscharme Abschnitte in den Messungen analysiert werden. Auch können die bioakustischen Geräusche und Störgeräusche mit bestimmten Clustering(Ähnlichkeits-)Verfahren voneinander separiert werden.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass eine bioakustische Diagnose von Palmenrüssler-Befall im urbanen Raum mit vertretbarem Aufwand realisierbar ist. Insgesamt wurden pro Baum etwa 20 Minuten benötigt, die sich zu gleichen Teilen auf die Tonaufnahmen und die bioakustische Analyse aufteilten. Letztere lässt sich derzeit semiautomatisch (*supported*) ausführen. Für ein zuverlässiges Ergebnis müssen alle drei Geräuschtypen in einem mehrstufigen Verfahren berücksichtigt werden.

Schlussfolgerungen

Bioakustische Untersuchungsmethoden eignen sich zur nicht-invasiven Überprüfung von Holz und lebenden Pflanzen hinsichtlich Insektenbefalls. Allerdings müssen die Insekten aktiv sein. Eier, diapausierende Stadien und Puppen können akustisch nicht erkannt werden.

Für den Roten Palmenrüssler, den Asiatischen Laubholzbockkäfer und für Bockkäfer der Gattung *Monochamus* ist es gelungen, spezifische Beißgeräusche bzw. Stridulationslaute aufzuzeichnen, die sich für eine Artbestimmung eignen könnten. Da insbesondere bei *Anoplophora glabripennis* und *Monochamus* spp. eine Reihe anderer Arten gemeinsam mit den untersuchten in derselben Pflanze vorkommen können, sind weitere Untersuchungen nötig, um die Tauglichkeit für eine Differenzialdiagnose abzusichern. Die bisherigen Ergebnisse haben gezeigt, dass die Bioakustik neue Möglichkeiten bei der Überprüfung von Hölzern und lebenden Pflanzen beim Import, aber auch bei der Detektion befallener Pflanzen im Freiland eröffnet. Softwareinstrumente können den Diagnoseprozess wesentlich beschleunigen und verbessern. Bioakustische Geräusche können durch geeignete Algorithmen auch dann identifiziert werden, wenn sie von Störgeräuschen überlagert sind. 🐛

Ing. Martin Brandstetter,
Bundforschungszentrum für
Wald, Institut für Waldschutz,
Seckendorff-Gudent-Weg 8,
1131 Wien, Österreich,
Tel.: +43-1-87838 1148,
E-Mail:
martin.brandstetter@bfw.gv.at

Dr. Sebastian Hübner, Sejona
R&D, Grüner Markt 31,
96047 Bamberg, Deutschland,
Tel. +49-151-25843730,
E-Mail: info@sejona.de

Literatur

Chesmore, D. 2008: Automated bioacoustic identification of insects for phytosanitary and ecological applications. In Frommolt K.H., Bardeli R. und Clausen M. (Eds.) Computational bioacoustics for assessing biodiversity. BfN-Skripten Nr. 234: 59-72.

Mankin, R. W., Hagstrum, D. W., Smith, M. T., Roda, A. L., Kairo, M. T. K. 2011: Perspective and promise: a century of insect acoustic detection and monitoring. American Entomologist 57: 30-44.

Victorsson, J., Wikars, L. O. 1996: Sound production and cannibalism in larvae of the pine-sawyer beetle *Monochamus sutor* L. (Coleoptera: Cerambycidae). Entomol. Tidsskr. 117: 29-33.