

Einsatzmöglichkeiten der Schallemissionsanalyse zur Feststellung des Befalls von Bauhölzern mit Trockenholzinsekten

Burkhard ZIEGLER ¹

¹ Technische Hochschule Mittelhessen, FB ME,
Wiesenstr. 14, 35390 Gießen

Kontakt E-Mail: Burkhard.Ziegler@me.thm.de

Kurzfassung Die Natur besetzt alle ökologischen Nischen, zum Beispiel auch Bauhölzer, die als Sparren oder Fetten in Dachkonstruktionen eingesetzt werden. Dieser Bericht befasst sich mit den Möglichkeiten der Schallemissionsanalyse zur Detektion und Lokalisation des Schadinsektes *Hylotrupes bajulus*, das als Hausbock oder fälschlicherweise als großer Holzwurm bezeichnet wird. Die Fraßgeräusche eines Hausbockes im Larvenstadium dienen hierbei als Schallemissionsquelle. Die in unterschiedlichen Entfernungen und Sensorpositionen von der SE-Quelle detektierten Signale werden mit den jeweiligen Aktivitäten der Larve korreliert. Ein Vergleich zwischen den Schallemissionssignalen und dem abgegebenen Hörschall (Lautstärkepegel und Sounddateien) schließt die Untersuchung ab.

1. Einleitung

Holz ist ein natürlicher Baustoff, der schon seit je her mannigfaltig eingesetzt wird. Wie alle organischen Materialien unterliegt auch das Holz dem Stoffkreislauf der Natur. Lebende Organismen (Pflanzen, Tiere) greifen es an und zerstören es. Zur Erhaltung der Nutzbarkeit, z.B. von Bauhölzern, ist es wichtig, diese vor den holzschädigenden Organismen zu schützen (Imprägnierung, Konservierung) oder falls sie befallen sind, dies frühzeitig zu erkennen [1]. Zu den tierische Holzschädlingen zählen vorrangig die Insektenarten, die verbautes Holz schädigen. Jede Insektenart befällt nur Holz, auf das sie sich spezialisiert hat, wichtige Parameter sind dabei z.B. Holzart, -feuchte und -temperatur. Auch die Position innerhalb des Stammquerschnittes, also im Kernholz oder im Splintholz, spielt eine Rolle [2]. Diese Untersuchung beschäftigt sich mit dem Hausbock. Er gilt mit Abstand als größter tierischer Zerstörer von verbautes Holz. Holzerstörend ist dabei nicht das ausgewachsene Insekt (Imago), sondern ausschließlich die Larve, der das Holz bis zu 8 Jahre lang als Nahrung und Lebensraum dient. Zerfressen werden vorwiegend die weichen Frühholzschichten, während die härteren Spätholzschichten lamellenartig stehen bleiben [3]. Die Larve zerstört das Splintholz bis kurz vor der Oberfläche und verlässt es erst nach ihrer Verpuppung als Käfer. Dazu nagt dieser sich ein typisches ovales Ausflugsloch. Die Erkennung eines Larvenbefalls wird auch dadurch erschwert, dass außerhalb des befallenen Holzes kein Holzmehl zu erkennen ist. Die genaue Kenntnis der spezifischen Holzparameter (s.o.) und der ehemaligen und aktuellen Raumnutzung lässt den Rückschluss auf eine bestimmte Larvenart zu [4]. Im Verdachtsfall kann man die oberflächennahen Holzschichten aufreißen



oder wie in [5] beschrieben mit der Bohrwiderstandsmethode einen evtl. Larvenfraß erkennen. Auch wird das Auftreten von charakteristischen Nagegeräuschen als Befallsindikator genannt [6]. Ein Sensorsystem auf Basis der Körperschalldetektion ($50\text{Hz} \leq f \leq 30\text{kHz}$), das auch zum Erkennen des Hausbockes geeignet sein soll, wird in [7] vorgestellt. Nachdem ein Larvenbefall, wie auch immer, entdeckt worden ist, sollte dieser beseitigt werden. Als mögliche Bekämpfungsmethoden kommen dabei Kontaktbiozide [8], Heißluftverfahren, Mikrowellenverfahren [9] oder Unterdruckverfahren [10] zum Einsatz.

Diese Untersuchung soll einen Beitrag leisten, die Schallemissionsanalyse (SEA) zur Detektion und Lokalisation der Larve des Hausbockes nutzbar zu machen. Die Fraßgeräusche einer Larve dienen dabei als Schallemissionsquelle. Der natürliche Lebensraum der Larve war ein ca. 2m langes altes Holzbrett, welches als Stütze in einem Obstbaum diente. Der Verfasser wurde durch kurzzeitige Knackgeräusche aus dem Brett auf dieses aufmerksam. Am gekürzten Brett wurde testweise eine SE-Messung durchgeführt, die Sonde war dazu an der Stirnseite des Brettes mittels Ultraschallgel angekoppelt. Dabei konnten starke SE-Signale an der Stirnseite des Brettes und schwächere Signale an dessen Mantelflächen

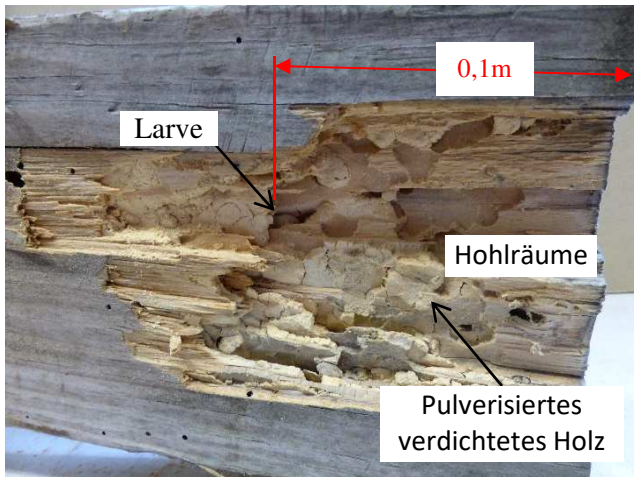


Bild 1. Ursprünglicher Lebensraum der Hausbocklarve

detektiert werden. Danach erfolgte vorsichtiges Separieren der, bis dahin unbekannt, Schallquelle aus dem Brett. Innerhalb des Brettes befanden sich sehr viele röhrenartige Hohlräume, die teilweise mit holzfarbenem, verdichtetem Pulver gefüllt waren, siehe Bild 1. Die SE-Quelle konnte als *Hylotrupes Balujus* im Larvenstadium (Länge ca. 20mm, Durchmesser ca. 6mm, Gewicht ca. 0,3gr) identifiziert werden. Anschließend Umsetzung der Larve in den Versuchsaufbau, siehe Kap. 3. Mehrere ovale bzw. runde Löcher in der Brettoberfläche zeigten an, dass dieses Brett auch schon von andern Hausböcken bzw. Holzwürmern frequentiert worden war.

detektiert werden. Danach erfolgte vorsichtiges Separieren der, bis dahin unbekannt, Schallquelle aus dem Brett. Innerhalb des Brettes befanden sich sehr viele röhrenartige Hohlräume, die teilweise mit holzfarbenem, verdichtetem Pulver gefüllt waren, siehe Bild 1. Die SE-Quelle konnte als *Hylotrupes Balujus* im Larvenstadium (Länge ca. 20mm, Durchmesser ca. 6mm, Gewicht ca. 0,3gr) identifiziert werden. Anschließend Umsetzung der Larve in den Versuchsaufbau, siehe Kap. 3. Mehrere ovale bzw. runde Löcher in der Brettoberfläche zeigten an, dass dieses Brett auch schon von andern Hausböcken bzw. Holzwürmern frequentiert worden war.

2. Biologie der Larve

Die für diese Untersuchung wichtigsten „Teile“ der Larve sind deren Mandiblen, mit denen sie kleine Holzspäne abnagt oder abschält, siehe Bild 2 nächste Seite. „Die einzelne Mandibel besteht aus Chitin, das in der Seitenansicht eine Dreiecksform aufweist.....Die Hausbocklarve bewegt beim Nagern den Kopf fast stets von links nach rechts und höhlt eine Rinne oder Furche von geringer Tiefe aus; die abgeschälten Holzteilchen werden mit dem Mundhöhlenboden und den Tastern bei Seite geschoben. Etwa ein Millimeter über oder unter der Fraßfurche nagt die Larve weiter. Es entsteht ein charakteristisches Wellen- oder Riefenmuster auf der Holzoberfläche. Die celluläre Oberflächenstruktur deutet auf eine nur geringe Schärfe der Mandiblen-schneide hin, zugleich auch auf einen erheblichen Kraftaufwand der Larve beim Ablösen der Nagespäne“ [11]. Die Larve drückt die von ihr produzierten Nagespäne und Kotwalzen, nachfolgend unter „Genagsel“ zusammengefasst, mit ihrem Kopf fest zusammen. Es zeigen sich auch dort Rippelstrukturen. Zum Säubern und Schärfen ihrer Fresswerkzeuge bewegt die Larve von Zeit zu Zeit nur eine Mandibel und führt sie an der Schneidekante der anderen Mandibel mehrmals vorbei: man hört dann deutlich „knipsende“ Geräusche (vergleichbar dem Fingerschnipsen) [12].

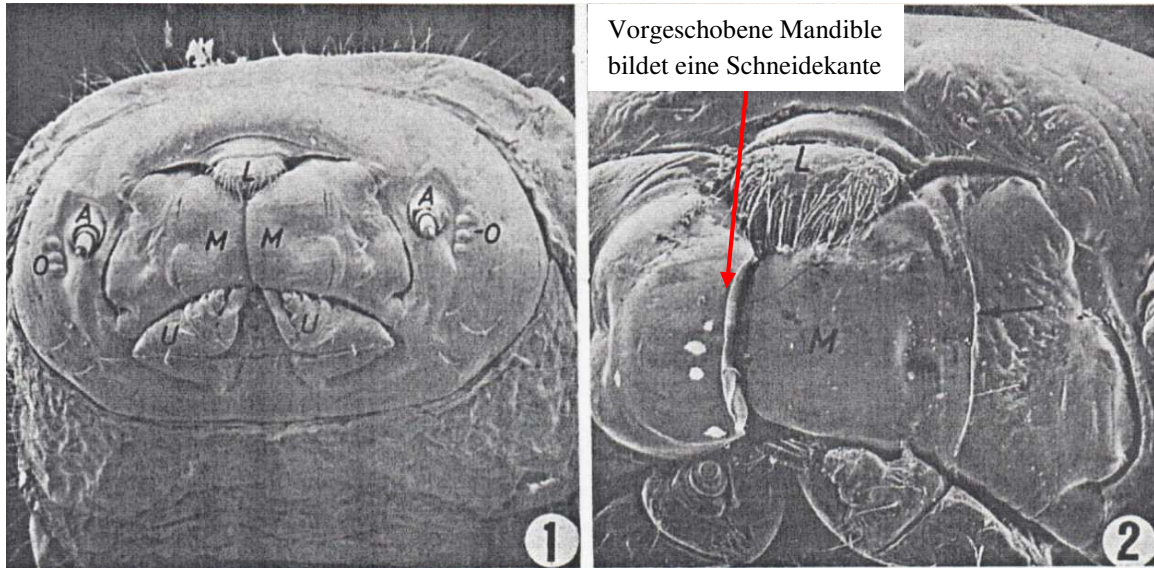


Bild 2. REM Aufnahme eines Larvenkopfes. Antennen, Mandiblen (Oberkiefer), Unterkiefertaster, Ocelen (Lichtsinneseorgane), Labrum („Oberlippe“). Nr. (1) ca. 22 fache, Nr. (2) ca. 42 fache Vergrößerung [11].

3. Versuchsaufbau

Der Beobachtungsraum des Versuchsaufbaus bestand aus einem Glasrohr ($d_i = 9,8\text{mm}$, Länge = 200mm), in dem ein handelsüblicher Rundstab aus Kiefernholz ($d_a = 9\text{mm}$) eingebracht war, siehe Bild 3. Die der Raupe zugewandte Stirnseite des Rundstabes wurde hälftig ca. 45°



Bild 3. Die Larve sondiert den Versuchsaufbau mit abgeschrägtem Rundholz. Die schwarz gefärbten Mandiblen am Kopf sind deutlich zu erkennen.



Bild 4. Die Larve hat sich etwa zur Hälfte in das Holz genagt. Die dabei entstanden Nagespäne und Kotwalzen legt sie dabei hinter sich ab.

abgeschrägt um der Larve das Einbohren zu erleichtern. –In vivo legt das adulte Holzbockweibchen seine Eier in schmale Risse, von dort fressen sich die geschlüpften Larven in das Material.– Nachdem die Larve in den Beobachtungsraum verbracht worden war, begann sie unverzüglich damit, diesen zu erkunden und drückte dabei den zuerst verwendeten lose eingelegten Kunststoffstopfen aus dem Glasrohr. Daraufhin wurde fortan eine passende Schraube (M10×20) als Verschluss verwendet. Der Larve verblieb eine freie Raumlänge von ca. 30mm, die nach ca. 24 Stunden fast vollständig mit Nagespänen und Kotwalzen gefüllt war. Die Larve hatte sich in diesem Zeitraum etwa zur Hälfte ihrer Körperlänge in das Rundholz genagt, siehe Bild 4. Das aus dem Versuchsaufbau herausragende Ende des Rundstabes wurde mit SE-Sensoren instrumentiert, siehe Kap. 4.1.1.

4. Verwendetes Messequipment

4.1 Schallemissionsanalyse

4.1.1 Messtechnik

Die von der Larve generierten Schallemissionen wurden mit zwei identischen Messketten der Fa. Mistras detektiert. Jede Messkette bestand aus einem WD-Breitbandsensor, einem Vorverstärker (26dB) und einem 1283-USB-AE Node™ Modul. Die Software AEwin™ for USB diente der Steuerung der USB-AE Node Module sowie der Datenspeicherung,

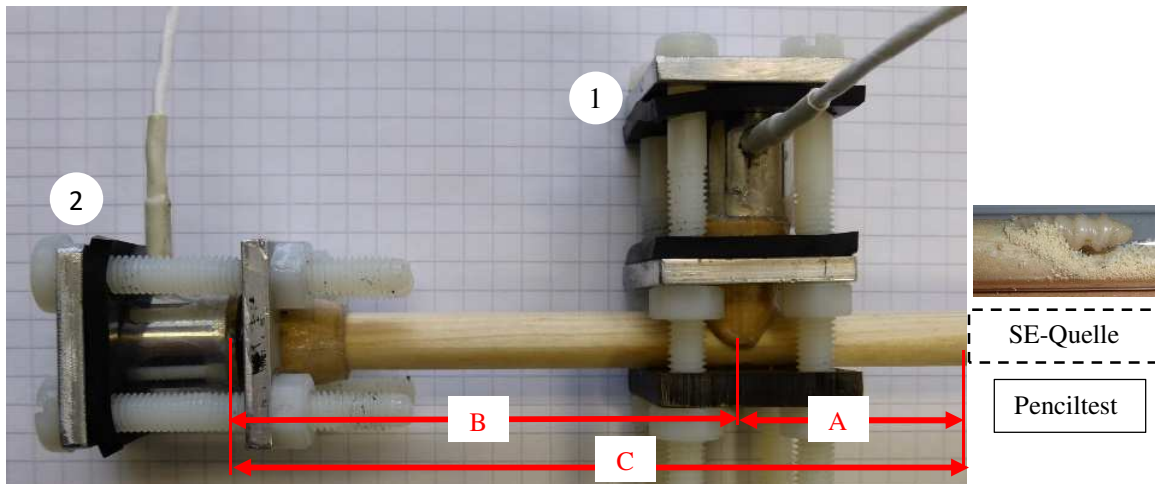


Bild 5. Ankoppelung der SE-Sensoren an den Kiefernrundstab mittels Koni. Definition der Abstände zwischen den Sensoren und der SE-Quelle. Verwendete Schallemissionsquellen.

-verarbeitung und -darstellung. Folgender Hardware-Setup wurde bei beiden Kanälen verwendet: Auflösung 16Bit, feste Triggerschwelle 35dB, Bandpass 20kHz - 500kHz, Abtastrate 5MSPS, Pre-Trigger 50.000, Speichertiefe 7k. Die Timing Parameter (Definition, siehe [13, 14]) hatten folgende Werte: PDT 10 μ s, HDT 200 μ s, HLT 300 μ s. Die SE-Sensoren wurden jeweils mittels eines speziellen Konus' aus Fichtenholz an den Rundstab angekoppelt. Wobei der SE-Sensor des ersten Kanals mit der Mantelfläche und der des zweiten Kanal mit der Stirnseite des Rundstabes gekoppelt war, siehe Bild 5. Sanitäröfett an allen Kontaktflächen diente zur dämpfungsfarmen Weiterleitung der SE-Signale zu den Sensoren. Die Abstände der Sensoren zur SE-Quelle und relativ zueinander wurden während der Versuche systematisch verändert.

4.1.2 Wellenleitung im Rundstab

Die Anisotropie des Holzes (axiale, radiale oder tangentielle Wachstumsrichtung) hat, je Wellenart, einen großen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit. Entlang einer Wachstumsrichtung breiten sich Ultraschallwellen quasi isotrop aus. Auch das in der Zellstruktur gebundene Wasser (Holzfeuchte) und hauptsächlich die Holzart beeinflussen die Schallgeschwindigkeit [15]. Die in dieser Untersuchung verwendeten Rundholzstäbe bestanden alle aus Kiefernholz und unterlagen im Mittel einer konstanten Raumlufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, so dass von konstanten Schallgeschwindigkeiten auszugehen ist.

4.2 Hörschall

Für die Messung des von der Oberfläche des Rundstabes über die Luft weitergeleiteten und vom Menschen detektierbaren Hörschalls kamen folgende Geräte bzw. Software der Fa. Norsonic zum Einsatz: Schallanalysator Nor140, Verbindungskabel, Mikrofon Typ 1225,

Datenübertragungs- und Konvertierungssoftware NorXfer, Analyseprogramm NorReview, siehe [16]. Der energieäquivalente Schallpegel LAeq [dB(A)] wurde fortwährend im Sekundenintervall gespeichert. Synchron dazu wurden Tonaufnahmen beim Überschreiten eines Schallpegels von 35dB(A) angelegt.

5. Durchgeführte Versuche

5.1 Korrelation der Larvenaktivität mit der detektierten Schallemission

Nachdem die Larve sich mit ihrem künstlichen Lebensraum vertraut gemacht hatte, siehe

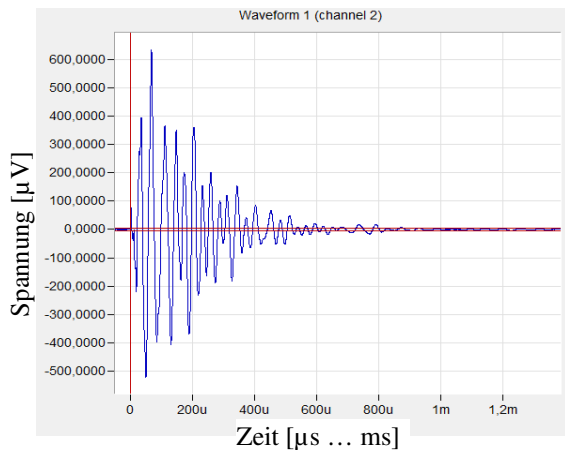


Bild 6. SE-Signal, erzeugt durch das Nagen der Larve am Holz.

Bild 3, begann sie an dem abgeschrägten Rundstab zu nagen. Die Larve benötigte ca. 48 Stunden, um sich der Länge nach in das Holz zu nagen. In [11] werden dafür nur ca. 10 Stunden angegeben. Erklärbar ist dies durch die ungünstigeren Umgebungsbedingungen in dieser Untersuchung. Die Korrelation zwischen der Beobachtung der Larvenaktivität und der dabei gemessenen Schallemissionssignale ergab eine eindeutige Zuordnung der gemessenen Burstsignale während der Fraßaktivität der Larve, siehe Bild 6. Die SE-Sonde Nr. 2 wurde dabei an der Stirnseite des Rundholzes positioniert.

Der Abstand C gemäß Bild 5 betrug 100mm. Die Grundfrequenz der Burstsignale lag bei ca. 25kHz. Es wurden auch schwächere SE-Signale (oberhalb der Triggerschwelle), als das in Bild 6 dargestellte, detektiert. Der Signaltyp Burst (Definition, siehe z.B. [17]) blieb dabei



Bild 7. Larve verdichtet das „Genagsel“, dabei wurden keine Schallemissionssignale detektiert.

jedoch erhalten, alle überschritten die Triggerschwelle von 35dB. Andere beobachtete Aktivitäten der Holzbocklarve, wie z.B. Vorwärts- bzw. Rückwärtsbewegungen, 180° Richtungsänderungen oder das Verdichten des Genagsels, siehe Bild 7, generierten keine auswertbaren Schallemissionssignale.

5.2 Langzeitmessungen

Aus den Langzeitmessungen (bis zu 42 Stunden) der von der Larve generierten Schallemission konnte ein sehr regelmäßiges Aktivitätsmuster abgeleitet werden, siehe Bild 8.



SE Aktivität Keine SE Aktivität

Bild 8. Generierung von Schallemission durch die Larve

Die in den rot markierten Zeiträumen dargestellte SE-Aktivität lässt sich aufgrund der Ergebnisse von Kap. 5.1 eindeutig der Fraßaktivität der Larve zuordnen. In den schwarz

markierten Zeiträumen trat Schallemission nur sporadisch und mit geringer Energie auf. Dieser Rhythmus wiederholt sich im Mittel alle 8 Stunden. Die Larve lässt sich nur durch sehr starke Erschütterungen (Klopfen auf das Rundholz mit dem Schraubendreher) von ihrer Fraßaktivität abbringen. Nach ungefähr 10 Minuten fängt sie wieder an zu fressen.

In den überwiegend sehr aktiven Fressphasen der Larve konnten SE-Burst-Cluster im mittleren Abstand von 1,5 Sekunden gemessen werden, siehe Bild 9. Die Cluster bestanden jeweils aus ca. 5-6 einzelnen Burstsignalen. Der Verfasser ordnet die SE-Cluster dem Abschälen von Holzteilchen durch eine Kopfbewegung der Larve zu, siehe Kap. 2.

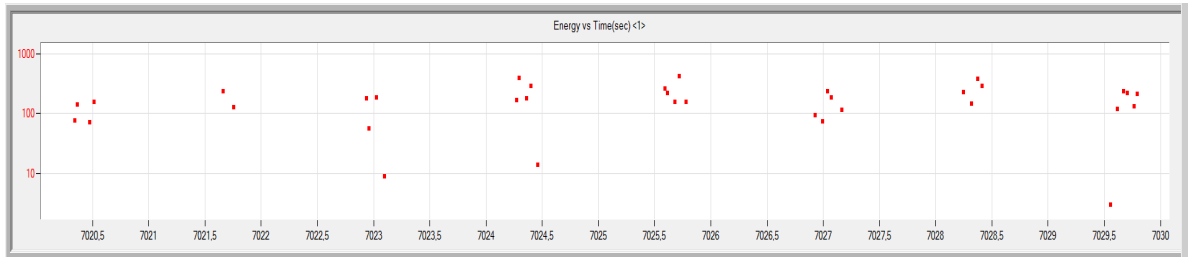


Bild 9. Cluster-Bildung der detektierten SE-Bursts in der Fressphase der Larve

5.3 Bestimmung des maximalen Detektionsabstandes

Der maximale Abstand zwischen der SE-Quelle und dem SE-Sensor, bei dem noch eindeutig zuordenbare SE-Signale gemessen konnten, betrug 4,3m. Die Länge des Rundstabes wurde dabei von 2,3m durch das stirnseitige Ankoppeln eines zweiten Rundstabes auf 4,6m vergrößert. Anschließend erfolgte die Ankoppelung der SE-Sensoren gemäß Bild 5, mit $A = 0,1\text{m} = \text{konst.}$, der Abstand C wurde von 4,6m schrittweise verkleinert, bis Kanal 2 definierte Messsignale lieferte. Die Korrelation beider Messkanäle erlaubte die eindeutige Identifizierung der propagierenden SE-Signale. Der Laufzeitunterschied zwischen Sensor 2 und 1 betrug dabei durchschnittlich $8,348 \cdot 10^{-4}\text{s}$. Die Schallgeschwindigkeit demzufolge ca. $5151,56\text{m/s}$, die einer Longitudinalwelle zuzuordnen ist. Die Maximalamplituden der Bursts signale des Sensors 2 waren dabei im Vergleich zu denen des Sensors 1 ca. 40-mal kleiner.

5.4 Abschätzung der relativen Signalstärke beim Larvenfraß

Die Maximalamplitude der Bursts während der Fraßaktivität der Larve wurde mit der beim Abbrechen einer Bleistiftmine (Penciltest) verglichen. Aufgrund des relativ geringen Durchmessers ($0,3\text{mm}$) der Minen, die für die Penciltest verwendet werden, im Vergleich zum Durchmesser des Rundstabes konnte nicht davon ausgegangen werden, dass alle Schallleitungsbahnen (Frühholz, Spätholz) vom SE-Impuls erfasst werden. Abhilfe schaffte hier eine dünnes, kreisrundes Metallplättchen das auf die Stirnseite eines Rundstabes geklebt wurde. Die Abstände, gemäß Bild 5, bei diesen Messungen war wie folgt: $A = 0,1\text{m}$, $C = 2,0\text{m}$. Die Larve als SE-Quelle generierte hierbei eine ca. 2,5-fach kleinere Maximalamplitude als der Bleistiftminenbruch.

5.5 Korrelation zwischen Hörschall und Schallemission

Die von der nagenden Larve generierten SE-Wellen werden durch das Rundholz zu den SE-Sensoren geleitet. Zur Klärung, ob dabei auch gleichzeitig Hörschall über die Mantelfläche des Rundholz abgegeben wird, ließ sich mit der Erweiterung des Messaufbaus mit den in Kap. 4.2 beschriebenen Geräten erreichen. Das verwendete Mikrofon war dabei senkrecht zur Mittelachse des Rundstabes (Fraßposition der Larve) im Abstand von 1cm von dessen Oberfläche positioniert; es konnte nur Luftschall detektieren. Ein schalldämmendes Gehäuse hielt weitgehend Störgeräusche vom Messaufbau fern, zusätzlich wurden die Messungen nur

zwischen 20.00 Uhr und 6.00 Uhr durchgeführt. Folgendes Bild 10 zeigt einen Vergleich zwischen den synchron detektierten Hörschall und der Energy der Schallemission innerhalb eines Zeitbereiches von 1800 Sekunden. Grundsätzlich korrelieren die Messergebnisse des Hörschallbereich und der Schallemission sehr stark. In den Bereichen in denen viele SE-Signale mit hoher Energie detektiert wurden, werden auch relativ hohe Schallpegel gemessen. In den Pausen mit gelegentlich auftretenden, schwachen Schallemissionssignalen

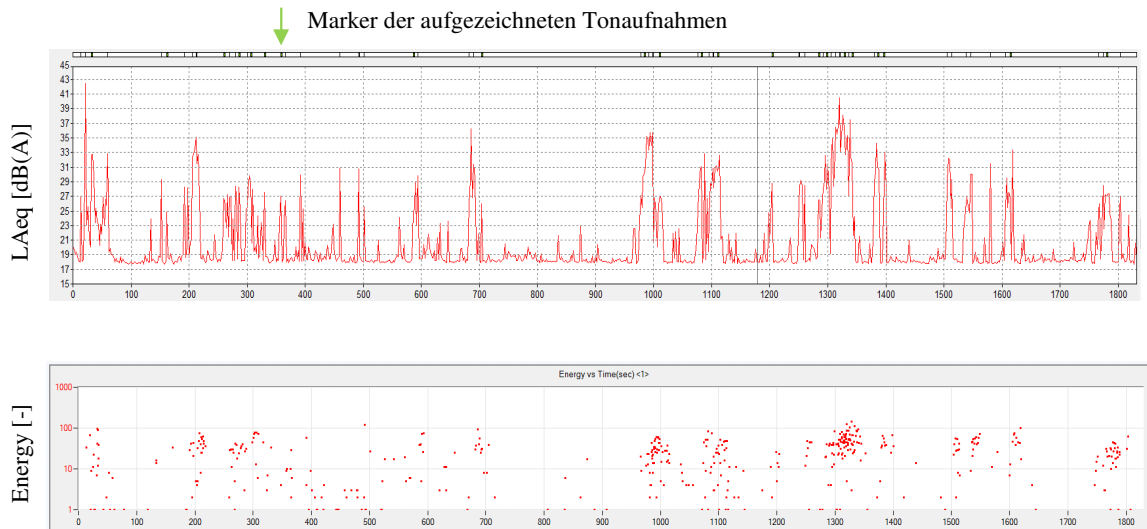


Bild 10. Bild oben, Tonaufnahmen und energieäquivalenter Hörschallpegel (LAeq) vs. Zeit [s].
Bild unten, Schallemission (Energy) vs. Zeit [s]. Die Daten wurden synchron gemessen.

entsprechend kleine Hörschallpegel, die meist nicht das Grundrauschen überschreiten.

Die Auswertung der Tonaufnahmen ergab unterschiedliche Geräuschemuster, mehrheitlich konnten diese der Fraßaktivität der Larve zugeordnet werden. Auf wenigen Tonaufnahmen lassen sich Geräusche finden, die sowohl lauter als auch impulshaltiger als die Fraßgeräusche sind. Diese treten in großen Zeitabständen (ca. 2 – 4 Stunden) auf und werden vom Verfasser dem Säubern und Schärfen der Mandiblen der Larve, siehe Kap. 2, zugeordnet. Während dieser aufgeführten Signalfolgen im Hörschallbereich wurde keine oder nur relativ geringe Schallemission gemessen, dies lässt sich durch die Unterbrechung der Festkörperschalleitung erklären. Die Mandiblen der Larve haben beim Schärfen oder Säubern keinen Kontakt zum Rundholz. Der generierte Hörschall konnte aber problemlos die verbleibende „papierdünne“ Holzschicht durchdringen (Das Innere des Rundstabes wurde restlos von der Larve zerstört). Beim Zurückfedern der gespannten Mandibel wird kurzzeitig eine relativ hohe Lautstärke erzeugt, die sich aber wegen der zeitlichen Mittelung des Hörschallpegels nicht signifikant auf diesen auswirkt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einsatzmöglichkeit der SEA zur Feststellung des Befalls der Larve des Hausbockes in einem Kiefernrundholz wurde erforscht. Dank ihrer hohen Fraßaktivität stellte die Larve eine zuverlässig SE-Quelle dar. Die generierten SE-Signale und SE-Muster konnten eindeutig zugeordnet werden. Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen ließ sich die Larve bis zu einer axialen Distanz von 4,3m eindeutig mit Standard SE-Equipment nachweisen. Die Larve generiert SE-Bursts mit einer etwa 2,5 Fach kleinere Maximalamplitude als ein Penciltest. Im Hörschallbereich konnte die Larve nur unter Laborbedingungen reproduzierbar detektiert werden. Ohne Messtechnik lässt sich die Larve nur während dem zufälligen Schärfen ihrer Mandiblen und ohne störende Geräusche wahrnehmen. Zwischen den SE-Signalen und der

Hörschallaktivität besteht grundsätzlich eine positive Korrelation.

Auf Grundlage der vorliegenden Untersuchung ist der Verfasser von der Einsatzfähigkeit der Schallmissionsanalyse zur Feststellung des Befalls von Bauhölzern mit den Larven des Hausbockes überzeugt. Für die praktische Umsetzung des Verfahrens sind die folgenden Untersuchungen geplant:

- Umsetzung der Larve in einen Holzbalken (6×12cm, L= 6m) aus Kiefernholz.
- Verfolgung der Larvenentwicklung bis zum Imago und Ausflug aus dem Balken.
- Wiederholung der Versuche mit frisch geschlüpften Larven.

7 Danksagung

Der Verfasser bedankt sich hiermit ausdrücklich beim Fachbereich Bau der Technischen Hochschule Mittelhessen, speziell bei Herrn me. Thomas Reinhold für die technische Beratung und die vertrauensvolle Überlassung der Norsonic® Hard- und Software.

8 Referenzen

- [1] Hausstein, T., Zur Diagnose und integrierten Bekämpfung Holz zerstörender Insekten unter besonderer Berücksichtigung der Buntkäfer (Coleoptera, Cleridae) als deren natürliche Gegenspieler in historischen Gebäuden, Dissertation Universität Rostock, 2010.
- [2] Liebetreu, J., Die Darstellung biogener Holzschädlinge in Nord- und Mitteleuropa hinsichtlich des Lebensraumes, der Schadensbilder und Bekämpfungsmethoden. Bachelorthesis, FH Hildesheim / Holzminden / Göttingen, Fakultät Erhaltung von Kunst und Kulturgut, 2008.
- [3] Radovic, B., Unempfindlichkeit von technisch getrocknetem Holz gegen Insekten, Informationsdienst-Holz, www.informationsdienst-holz.de, 2008.
- [4] Kempe, K., Holzschädlinge Vermeiden Erkennen Bekämpfen, Fraunhofer IRB Verlag: ISBN 978-3-8167-7982-7, 2009.
- [5] Hasenstab, A., Krause, M., Lutz, J., Hillemeier, B., Rieck, C., Niederfrequente Ultraschall-Echo-Verfahren und Bohrwiderstandsmessung zur Untersuchung von Holzbauteilen, DGZfP-Berichtsband 94-CD, 2005.
- [6] Rüpke, H.-J., Kürsten, E, Sachverständigenbüro für Holzschutz, www.Holzfragen.de, 2016.
- [7] Laar WD60, Produktbeschreibung, <http://www.vonlaarmedia.de/html/vibrationsdetektion.html#WD60> .
- [8] Umweltbundesamt, Biozidinfo, <http://www.biozid.info/deutsch/schaedlingsratgeber/alle-organismen/hausbockkaefer-umgangssprachlich-auch-grosser-holzwurm-oder-hausbock-genannt/detail/>, 2016.
- [9] Makovine, I., et al., Control of house longhorn beetle (*Hylotrupes Bajulus*) larvae by microwave heating. Wood research, 57(2) 179 188, 2012.
- [10] Zhangjin, C., et al., Low-pressure vacuum to control larvae of *hylotrupes bajulus*, Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Pests, 2005.
- [11] Schmidt, H., Parameswaran, N., Mandiblen des Hausbockkäfers (*Hylotrupes bajulus*) und Fraßstruktur des Holzes im Rasterelektronenmikroskop, ISSN 0040-2240 / ASTM-Coden ZANEAE, 1977.
- [12] Schmidt, H., Buchholz, G., Über die Mandibeln der Larve des (Hausbockkäfers (*Hylotrupes bajulus*) im Zusammenhang mit der Zerstörung des Holzes, nicht datiert .
- [13] USB-AE Node™ & AEwin™ for USB™ Software Users's Manual, Mistras Group Inc, USA, 2010.
- [14] Löhr, M., Santner, E., Spaltmann, D., Woydt, M., Binkowski, S.: In-situ Acoustic Emission for wear-life detection of Diamond-Like Carbon coatings during slip-rolling friction, WEAR, Elsevier Verlag, Vol. 260, 469-478, 2005
- [15] Körper, S., Göller, S. Krause, M., Stephan, I., Feuchteabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit und des Biegeelastizitätsmoduls für Holz, DGZfP-Jahrestagung – Poster 4, 2011.
- [16] Norsonic, Nor140 Bedienungsanleitung, Norsonic Tippkeper GmbH, 59032 Oelde-Stromberg, 2013.
- [17] Ziegler B., Contribution of Acoustic Emission into optimal bearing lubrication, Journal of Kones, Vol. 14, Nr: 4, Pages 571 – 578, ISSN 123135-4005, Permanent Committee of KONES, Warsaw 2007.