Rathgen-Forschungslabor
Staatliche Museen zu Berlin

Innovative Untersuchungsmethoden zur nachhaltigen Wirksamkeit modellhafter Anoxia-Behandlung gegen Insektenbefall an national bedeutsamen Kulturgütern der Sammlungen der Stiftung Preußischer Kulturbesitz (DBU AZ 31865-45)

Abschlussbericht zum Projekt
gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Berlin, 27. März 2018

Konsortium

Projektkoordination: Rathgen-Forschungslabor
Dr. habil. Ina Reiche
Dipl.-Biol. Bill Landsberger

Projektmitarbeiter: Dr. Harro Frauendorf

Projektpartner: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin
PD Dr. habil. Rüdiger Plarre

Julius-Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen
Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz
Dr. Cornel Adler

Technische Universität Ilmenau
Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik
Dr. Jürgen Sachs

Projektmitarbeiter: Johannes Zender

Projektbeirat: Stephan Biebl, Ingenieurbüro für Holzschutz Benediktbeuern

Dr. Johannes Frisch, Museum für Naturkunde Berlin

Leonie Gärtner, Ethnologisches Museum, Staatliche Museen zu Berlin

Dr.-Ing. Marko Helbig, Technische Universität Ilmenau

Dr. Uwe Noldt, Lauenburg/Elbe

Dr. Marisa Pamplona-Bartsch, Deutsches Museum München

Danksagung

Wir danken allen Mitgliedern des Projektbeirats für ihre wertvolle fachliche Unterstützung und ihre Bereitschaft zur Diskussion der Projektinhalte.

Für ihre Mitarbeit bei der Fertigung von Prüfkörpern und das Bereitstellen von Versuchskulturen gilt an dieser Stelle Sabine Busweiler, Yvonne de Laval, Agnes Paul und Detlev Rätsch ein ganz besonderer Dank.

Konsortium 2
Danksagung 2
1. Zusammenfassung 4
2. Einleitung und Zielsetzung des Projekts 4
3. Arbeitsschritte und angewandte Methoden 5
3.1. Einrichtung der Prüfkammer (AP1) 5
3.2. Konzeption und Fertigung der Prüfkörper (AP2) 6
3.3. Etablierung der Testorganismen in Einheiten der Prüfkulturen (AP3) 9
3.4. Entwicklung und Aufbau eines Handgerätes mit UWB-Radarsensor (AP4) 11
3.5. Durchführung der Versuchsserien (AP5) 25
3.6. Datenauswertung und Review publizierter Daten (AP6) 25
4. Ergebnisse und Diskussion 26
5. Schlussfolgerungen 33
6. Veröffentlichungen 33
Literaturverzeichnis 34
Anhang 36

1. Zusammenfassung

Anoxische Objektbehandlungen gegen Schädlingsbefall stellen eine besonders materialverträgliche und umweltschonende Alternative zu chemischen Bekämpfungsverfahren dar. Die Wirksamkeit hängt jedoch von der Dauer, dem Restsauerstoffgehalt sowie der Temperatur und Feuchtigkeit ab. Unterschiedliche Arten von Schadinsekten sind verschieden tolerant gegenüber sauerstoffarmen Bedingungen. Insbesondere bei Behandlungsbedingungen von unter 24° C und mehr als 0,5 % Restsauerstoffgehalt stößt das Verfahren an die Grenze der Zuverlässigkeit. In Versuchsreihen unter standardisierten Bedingungen erwiesen sich insgesamt 12 von 34 im Projekt untersuchte Insektenarten hierbei als widerstandsfähig. Davon als besonders tolerante Arten sind *Hylotrupes bajulus*, *Lasioderma serricorne*, *Trogoderma parabile* und *Mezium affine* zu nennen.

Mit dem entwickelten UWB-Sensoriksystem können durch elektromagnetische Wellen Bewegungen von Schädlingen innerhalb geschlossener Holzobjekte berührungslos erfasst werden. Voraussetzung für die eindeutige Detektion der Schädlingsaktivität ist neben der digitalen Signalverarbeitung zur Filterung und Extraktion des Nutzsignals, die genügend hohe Eindringtiefe, die ausreichend ist, wenn Schädlingsvorkommen häufig dicht unter der Holzoberfläche gelegen sind. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass bereits eine einzelne Trockenholztermite der Art *Incisitermes marginipennis* hinter einer 5 cm dicken Holzplatte aufgespürt werden kann. Somit erscheint das Messsystem potentiell für die Erfolgskontrolle einer Anoxia-Behandlung an Museumsgütern geeignet.

2. Einleitung und Zielsetzung des Projekts

Inhalte der anwendungsorientierten Forschungsarbeiten sind die modellhafte Methodenentwicklung eines neuartigen, umweltverträglichen und ressourcenschonenden Verfahrens zum nachhaltigen Substanzerhalt national wertvoller Kulturgüter sowie der Eignungstest einer innovativen Technologie zur Diagnostik und Qualitätssicherung bei Objektbehandlungen gegen Schädlingsbefall.

Museale Sammlungen sind ständig der Gefahr ausgesetzt, biogene Schädigungen zu erfahren. Unbeachtet kann Schädlingsbefall einen Substanzverlust bis hin zur Zerstörung der Objekte verursachen. Im Integrated Pest Management (IPM) gilt es, Verfahren zur Vermeidung, zur Früherkennung und zu einer gezielten Vernichtung materialschädigender Organismen miteinander zu verbinden. Im Vordergrund stehen dabei physikalische und biologische Verfahren, die Schaderreger effizient und umweltschonend bekämpfen. Bei prophylaktischen oder kurativen Behandlungen musealer Objekte gegen Schädlingsbefall sind darüber hinaus Methoden wichtig, die besonders materialschonend und rückstandsfrei durchgeführt werden können. Diesen Anforderungen wird eine Anoxia-Behandlung mittels Stickstoffgas gerecht, wobei der verbleibende Sauerstoffanteil, das Umgebungsklima und die Behandlungsdauer den Erfolg der Maßnahme beeinflussen. In Abhängigkeit von der Materialbeschaffenheit zu behandelnder Objekte und den vorkommenden Schädlingsarten können die Behandlungszeit und die erforderliche Minimalkonzentration für Stickstoff sehr variabel sein (Selwitz und Maekawa 1998, Bergh J-E et al. 2003).

Im Projekt wurden die wirtschaftlich bedeutendsten Materialschädlinge in deren unterschiedlichen Entwicklungsstadien unter kontrollierten und im üblichen Museumsbetrieb reproduzierbaren Bedingungen mit Anoxia behandelt werden. Dabei konnten Dosis-Wirkungs-Parameter bei unterschiedlichen Klimabedingungen generiert werden. Zusätzlich wurde die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Prüfung durch Radarsensorik entwickelt und im Praxiseinsatz erprobt. Die Anwendung dieser Technologie kann dem Nachweis der Aktivität eines Befalls und der Erfolgskontrolle von Anoxia-Behandlungen dienen. In der technischen Ausführung als handliches

Kleingerät könnte Ultrabreitband-Radardetektion (UWB) von Schädlingsbefall Bestandteil von Routinearbeiten bei der Sammlungspflege werden (Sachs et al. 2008).

3. Arbeitsschritte und angewandte Methoden

3.1. Einrichtung der Prüfkammer (AP1)

Es wurde ein Stickstoffgenerator HPN2 5200C (Parker Hannifin Corporation) genutzt, der hochreinen Stickstoff (99.999 %) zur Einleitung in den Klimaschrank erzeugt. Maßgeblich für die Versuchsdurchführung war eine genaue Überwachung und Steuerung der Sauerstoffkonzentration im Innenraum der Kammer. Für den Einbau in den Klimaschrank wurde daher ein Zirkoniumdioxid-Sauerstoffmesssystem (Zirox GmbH) mit einer Auflösung von 10 Vol. ppm bis 21 Vol. % Sauerstoff erworben. Dieses besteht aus der Sauerstoffsonde SS27 und der Elektronik E713. Diese Einzelkomponenten wurden zu Projektbeginn beschafft und in der klimatisierbaren Prüfkammer verbaut. Die Messergebnisse der Sonde wurden zusätzlich stichprobenweise mit einem zweiten Sauerstoffsensor (Dansensor CheckPoint) verifiziert.

Die Firma WKM wurde mit dem Bau der vollautomatisch gesteuerten, klimatisierbaren Prüfkammer CTS Typ C -40/350 beauftragt (Abb. 1a). Die anschließenden Betriebs- und Funktionsprüfungen erbrachten, dass die hohe Abwärme von bis zu 10,7 kW des Klimaprüfschrankes problematisch sein könnte. Der Betriebsraum heizte sich bis über 40 °C auf, was einen geregelten Dauerbetrieb des Klimaprüfschrankes und des Stickstoffgenerators nicht zuließ. So weisen die Betriebsanweisungen für den Klimaschrank eine maximale Betriebstemperatur von 30 °C und für den Stickstoffgenerator von lediglich 25 °C aus. Eine zu hohe Außentemperatur bei der Stickstoffaufreinigung führt durch eine reduzierte Adsorptionsfähigkeit des Molsiebes im Stickstoffgenerator zu einer verminderten Stickstoffreinheit, was für anoxische Behandlungen widrig ist. Folglich musste eine Klimaanlage für den Aufstellungsraum konzipiert und installiert werden. Die Klimatisierung des Aufstellungsraumes erlaubte dann zusätzlich eine adäquate Aufstellung der Insektenproben, die als unbehandelte Kontrollen fungierten und den gleichen Bedingungen wie Tiere in der Anoxia-Behandlung ausgesetzt waren, aber als Kontrolle unter Normalatmosphäre gehalten wurden. Im Anschluss wurde die Klimakammer im Dauerbetrieb getestet. Erwartungsgemäß hielt der Klimaschrank die eingestellte Temperatur und Feuchtigkeit sehr genau, allerdings wiesen die Sauerstoffwerte trotz einwandfrei laufender Gerätschaften eine zu hohe Schwankungsbreite auf. Dies konnte durch Erneuerung der Software behoben werden. Im Anschluss konnte die Prüfkammer nachweislich die eingestellte Temperatur mit einer Schwankung von ± 0,5 °C, die relative Feuchte (rF) mit ± 1 % und den Sauerstoffgehalt bei ± 0,08 % halten (Abb. 1b). Jedoch würde bei dieser Temperaturschwankung im Klimaschrank die relative Feuchte etwa um 2,5 % schwanken, da davon auszugehen ist, dass die relative Luftfeuchte pro Grad Celsius um 5 % steigt oder sinkt. Zur besseren Überwachung der Messwerte wurde der Klimaprüfschrank außerdem an das IT-Netzwerk angeschlossen, so dass eine Beaufsichtigung vom PC-Arbeitsplatz stattfinden konnte. Zusätzlich wurde an die Messeinheit der Zirox-Sauerstoffsonde ein Laptop angeschlossen, was die direkte Aufzeichnung der Messwerte über eine Zirox-Auswerte-Software ermöglichte und somit eine weitere Sicherheit für die Sauerstoffmesswerte vorhanden war.

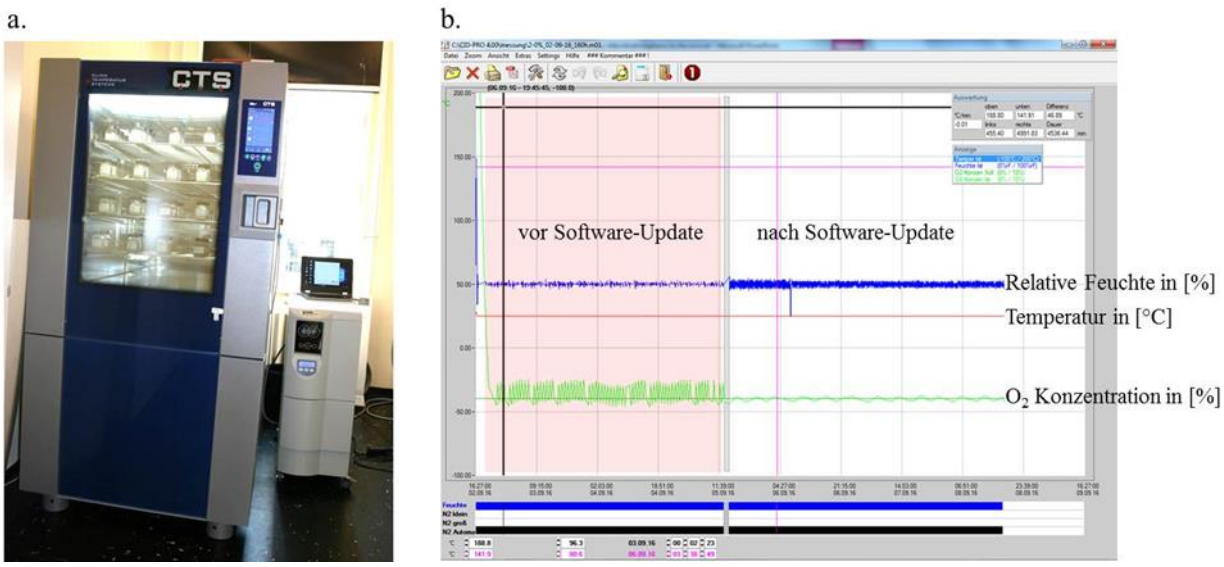


Abb. 1: a.) Geräteanordnung. Klimaprüfschrank mit Stickstoffgenerator und angeschlossenem Laptop zur Aufzeichnung der Sauerstoffkonzentration über die Zirox-Messeinheit. Im Hintergrund ist außerdem ein Klimagerät zur Raumkühlung zu sehen. b.) Messwerte der Versuchsparameter relative Feuchte (rF), Temperatur (T) und Sauerstoffkonzentration (O2-conc.), die durch die Software CID-Pro 4.02 am Arbeitsplatz aufgezeichnet werden. Der Klimaprüfschrank hält die Parameter RH (blaue Linie) und T (rote Linie) mit einer Schwankung von ± 1 % und ± 0,5 °C. Die Schwankung der O2-conc. (grüne Linie) wurde durch eine Softwareumstellung von ± 0,4 % auf ± 0,08 % reduziert.

3.2. Konzeption und Fertigung der Prüfkörper (AP2)

Im musealen Alltag finden unterschiedlichste Materialien Verwendung. Diese können vermutlich den Begasungserfolg beeinflussen, da sie die Diffusion des Stickstoffs und somit die Verdrängung des Restsauerstoffs behindern (Petty 1973, Sorz und Hietz 2006) und ebenso als Sauerstoffreservoir fungieren können. Um diesen Einfluss zu untersuchen und zu bewerten, wurden zwei unterschiedliche Ansätze bei der Simulation des Einflusses von umliegendem Material auf die Stickstoffdiffusion und damit auf die Behandlungswirksamkeit verfolgt.

In Kooperation mit der Firma Bentert, Berlin sollte der Diffusionswiderstand von verschiedenen Materialien, wie Holz, Papier oder Luftpolsterfolie ermittelt werden. Hierzu wurde eine Diffusionskammer genutzt werden. Die gemessenen Diffusionswiderstände sollten im Anschluss Programmdaten für ein Zeit-Begasungsprofil liefern. Mittels solcher Profile kann das Diffusionsverhalten von Objekten von der Regeltechnik des Prüfschrankes simuliert werden. Die Diffusionskammer bestand im Wesentlichen aus zwei metallenen Schalen, zwischen denen das zu messende Objekt mittels Dichtungen luftdicht eingespannt werden kann. In einer der beiden metallenen Schalen befindet sich ein Sauerstoffsensor, der den Sauerstoffgehalt misst und in die andere Schale wird hochreiner Stickstoff gasförmig eingeleitet. Somit muss Stickstoff durch das eingespannte Objekt diffundieren, um den Sauerstoffgehalt in der anderen Schale zu beeinflussen (Abb. 2). Dieses System hat sich in der Vergangenheit als praktikabel für Diffusionsmessungen an Folien erwiesen und wurde für die Versuche mit größeren Holzkörpern adaptiert. Die Messung eines Holzobjektes von 10 cm Stärke erwies sich als fehlerhaft, da durch die Flanken des Holzzylinders Außenluft diffundierte, was die Messung maßgeblich beeinflusste. Die Seiten des eingespannten Holzzylinders konnten weder mit Metallfolie noch mittels Lackieren mit diffusionsdichten Anstrichen (Polyurethane-Kunstharz) ausreichend abgedichtet werden.

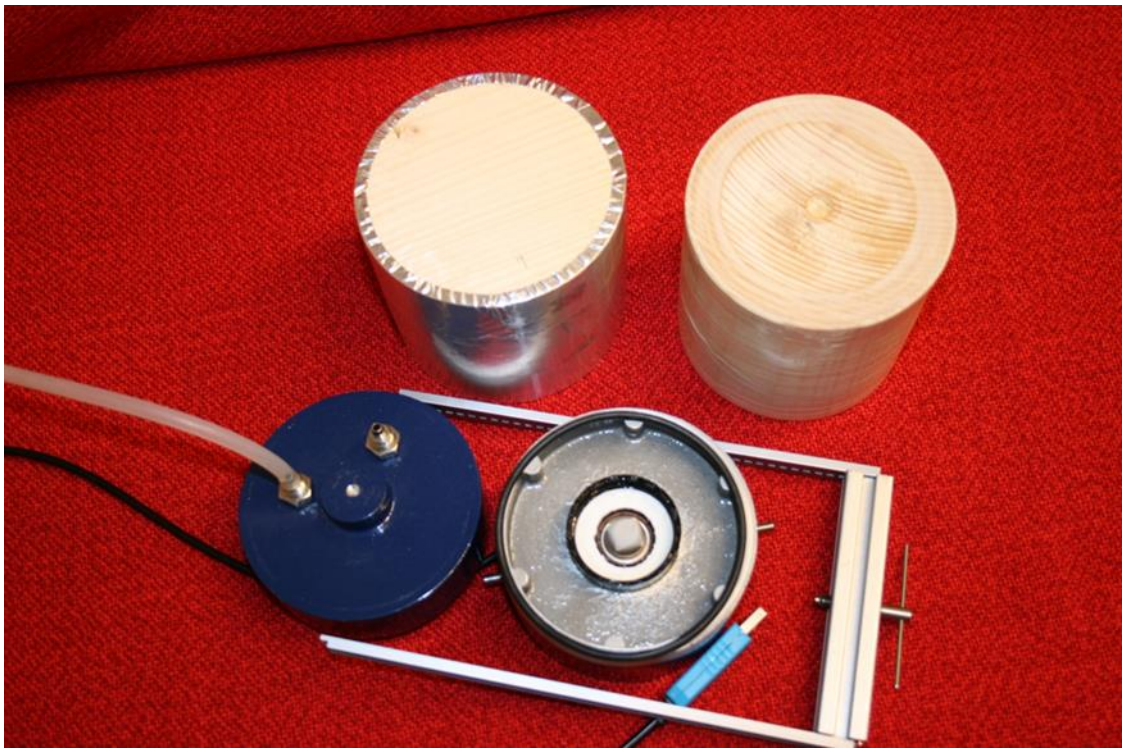


Abb. 2: Diffusionsmesskammer und zwei Holzzylinder von 10 cm Höhe und 10 cm Durchmesser. Die Messkammer besteht aus zwei Schalen, zwischen die das zu prüfende Objekt eingespannt wird. In die obere Schale (links im Bild, blaues Gehäuse) wird ständig hochreiner Stickstoff geleitet. Dieser muss das eingebrachte Prüfobjekt durchdringen, um zu dem Sauerstoffsensor zu gelangen, der sich in der unteren Kammer befindet (rechte Halbschale, Sensor befindet sich in der Mitte der Schale). Als Prüfobjekte werden zwei Holzzylinder (oben im Bild) genutzt. Um das Eindringen von Sauerstoff über die Flanken der Holzzylinder zu unterbinden, wurden die Zylinder versuchsweise mit einem Metallklebeband (links) und mit Polyurethane-Kunstharz (rechts) abgedichtet.

Für materialabhängige Untersuchungen wurden verschiedenartige Probenkörper konstruiert. Wie Abb. 3 zeigt, wurde zunächst ein Teppichläufer aus Wolle in Abschnitte geteilt, gerollt und in Papprollen eingebracht. Die Rollen selbst wurden mit dazugehörigen Deckeln verschlossen. Im Anschluss wurden diese Probenbehälter zur BAM überstellt und mit Kleidermotteneiern (*Tineola bisselliella*) beimpft. Diese Proben wurden in den Zuchträumen der BAM gehältert und sollten als Attrappe für einen mit Schädlingen befallenen Museumsgegenstand dienen und zum Ende des Projekts die Sicherheit der Methode anschaulich demonstrieren. Dieser Versuch konnte aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit nicht abschließend durchgeführt werden.

Abb. 3: Konstruktion von Probekörpern. Gezeigt sind erste Probenkörper. Hierzu wurden Papprollen von 20 cm Höhe, 15 cm Durchmesser und 4 mm Wandstärke mit aufgerollten, passenden Stücken eines Wollteppichs versehen. Die entsprechenden Probenkörper wurden anschließend zur BAM gebracht und dort mit Eiern der Kleidermotte beimpft. Aktuell werden diese Proben bebrütet, um ein museales Objekt mit starken, andauernden Kleidermottenbefall zu simulieren.

Zusätzlich wurden weitere Probenkörper für einen systematischen Ansatz aus den Materialien Nadelholz, Papier, Textil und Luftpolsterfolie gefertigt (Abb. 4). Diese Materialien spielen eine Rolle im Museumsalltag, als museales Objekt oder Verpackungsmaterial. Die Holzkörper bestanden aus je drei übereinander gestapelten 4 cm dicken und 30 cm langen Fichtenholzabschnitten. In das mittige Brett wurde eine Lücke geschnitten, in dem die Prüfinsekten eingesetzt werden konnten. Ein Verrutschen der einzelnen Bretter wurde mit Hilfe von zwei X-Gummis verhindert, die um die drei Bretter gespannt wurden. Auf eine weitere diffusionsdichte Abdichtung der einzelnen Bretter zueinander wurde einfachheitshalber verzichtet. Die Nahtstellen simulierten somit feine Risse, Spalten oder Fraßgänge von Holzschädlingen, wie sie in natürlich besiedelten Objekten auch vorhanden wären. Der Probenkörper aus Papier wurde analog aufgebaut. Hierzu wurden DIN A4 Telefonbücher mit identischen Aussparungen wie in dem vorherigen Probenkörper versehen. Zum Verschließen wurden vorhandene Kataloge mit gleichem Format genutzt. Als Stoffprobe wurden kostengünstige Packdecken aus 60:40 % Baumwoll-Synthetik-Mischgewebe verwendet. Darüber hinaus wurde noch Luftpolsterfolie getestet. In diesen beiden letztgenannten Materialien wurden keine expliziten Aussparungen eingefügt. Die Flexibilität dieses Materials lässt ein Einfügen von Proben ohne vorherige Bearbeitung zu. Ein Probenkörper aus Packdecken bestand aus drei Decken à 100 x 150 cm^2, die jeweils auf Größe DIN A4 gefaltet wurden. Diese wurden dann analog zu den anderen Probenkörpern übereinandergestapelt, wobei in die mittlere Decke die Insektenproben eingefügt wurden (Abb. 4 C). Der Körper aus Luftpolsterfolie bestand jeweils aus insgesamt 40 auf DIN A4 Format geschnittenen Lagen Luftpolsterfolie. Nach 20 Blättern wurden die Insektenproben eingefügt und mit weiteren 20 Blättern überschichtet (Abb. 4 D). Die Probenkörper wurden mit jeweils drei Hausbocklarven bestückt und in den im 3.3 beschriebenen Standardgefäßen für den

jeweiligen Versuchszeitraum begast. Die Kontrollen bestanden aus identischen Probenkörpern und wurden ebenfalls mit je drei Hausbocklarven bestückt und unter gleichen klimatischen Verhältnissen für den Versuchszeitraum unter Normalatmosphäre gelagert.

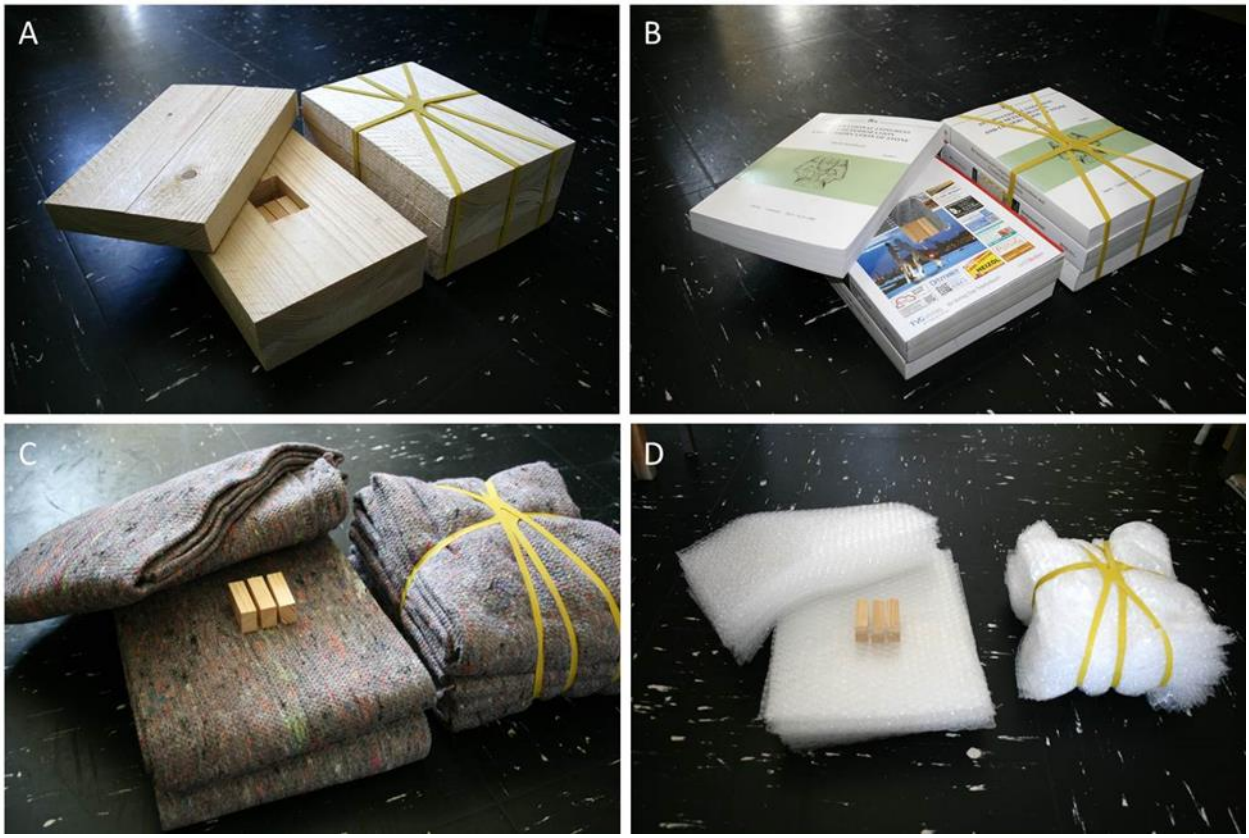
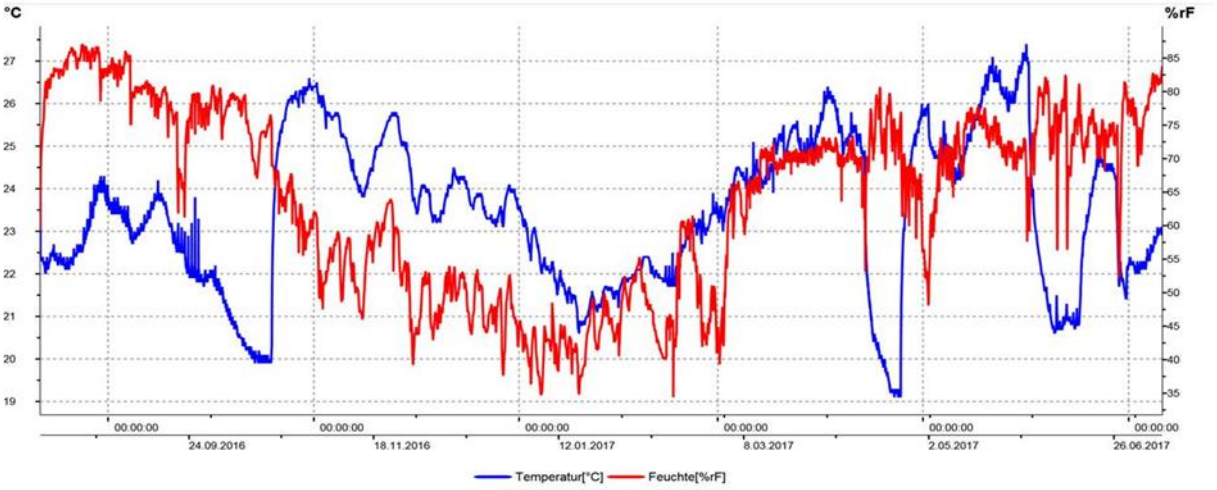


Abb. 4: Testkörper zur Untersuchung des Einflusses des umliegenden Materials auf den Behandlungserfolg auf Hausbocklarven. A) Probenkörper aus je drei 20 x 30 cm2 Fichtenholzbrettern von 4 cm Stärke. In das mittlere Brett ist eine Aussparung von ca. 7,5 x 5 cm2 gesägt. Hier werden drei Prüfhölzchen mit je einer Hausbocklarve eingefügt. Der Verschluss erfolgt mit zwei „X-Bändern“ aus Gummi. B) Wie A. allerdings besteht der Probenkörper aus 3 cm starken DIN A 4 Büchern. C) Probenkörper besteht aus drei Allzweck-Packdecken. In der mittleren Decke werden die Prüfinsekten eingefügt. D) Probenkörper besteht aus Luftpolsterfolie. Zwischen jeweils zwanzig 20 x 30 cm2 großen Blättern Luftpolsterfolie werden die Prüfhölzchen mit den Insekten eingefügt. Die Verbindung erfolgt jeweils mit zwei X-Bändern aus Gummi.

3.3. Etablierung der Testorganismen in Einheiten der Prüfkulturen (AP3)

Für Arten, die nicht von den Kooperationspartnern zur Verfügung gestellt werden konnten, wurde eine Zucht im RF erweitert und über den Projektzeitrahmen fortlaufend optimiert. Eine standardisierte, kontrollierte Zucht war jedoch nur ansatzweise möglich, da die Außentemperatur einen starken Einfluss auf die Bedingungen im Zuchtraum hatte (Abb. 5).

Gerätename: RF_01		17.08.2017 15:45:27			Seite 1/1
Startzeit: 11.08.2016 17:54:00		Minimum	Maximum	Mittelwert	Grenzwerte
Endezeit: 11.07.2017 00:54:00	Temperatur [°C]	19,1	27,4	23,44	-20,0/70,0
Messkanäle: 2	Feuchte [%rF]	34,4	87,1	64,39	0,0/100,0
Messwerte: 8000					
36924368					



Temperatur: Ø 23,44 °C
Feuchtigkeit: Ø 64 % rF

Abb. 5: Auszug aus der Klimaerfassung des Zuchtraumes am RF. In der Grafik sind deutlich die plötzlichen Temperaturwechsel (blau) im Zuchtraum erkennbar, die auf die unbefriedigende Steuerung der Heizung im Zuchtraum zurückzuführen sind. Bei der Luftfeuchtigkeit (rot) kam es ebenfalls zu starken Schwankungen. Beide Parameter haben Einfluss auf die Entwicklungszeit von Insekten. Schwankungen erschweren eine kontinuierliche, standardisierte Zucht von Insekten.

Eine hohe Außentemperatur führte zu einem starken Anstieg der Temperatur im Zuchtraum, was gleichzeitig einen Anstieg der Luftfeuchte nach sich zog. Eine Temperatur von über 30 °C lässt Arten, wie Silberfischchen (*Lepisma saccharina*) absterben, während andere Arten eine stark beschleunigte Entwicklung durchlaufen und dabei aber auch eine hohe Ausfallquote für die Zucht durch die zu schnelle Entwicklung erleiden. Die meisten Arten konnten jedoch für das Projekt am RF erfolgreich gezogen werden.

Stress ist ein maßgeblicher Faktor, der die Widerstandfähigkeit von Tieren gegen diverse Umwelteinflüsse herabsetzen kann. Um eine praxisnahe Simulation von Schädlingsbefall an Museumsobjekten und eine Minimierung von Stressfaktoren bei der Handhabung der Testorganismen zu bewirken, wurden Gruppen von Tieren in Prüfgefäßen aus PETG (100 ml Rotilabo®-Weithalsbehälter) verbracht, damit sich diese dort etablieren und idealerweise auch vermehren können. Im Verlauf der Versuchsreihen wurden diese PETG Gefäße ohne Deckel verwendet und gegen ein Entweichen der eingesetzten Insekten mittels Gaze bzw. Papiertüchern gesichert. Dies hatte den Vorteil, dass das Mikroklima in den einzelnen Gefäßen vergleichbar wurde, da anzunehmen war, dass die unverschlossenen Gefäße durch die große Belüftungsfläche vergleichbar mit den Außenparametern waren.

Zusätzlich zu den am RF gezogenen Arten wurden die holzzersetzenden Käferarten *Hylotrupes bajulus* (Hausbock), *Anobium punctatum* (Gemeiner Nagekäfer) und *Lyctus brunneus* (Brauner Splintholzkäfer), die Motten *Tineola bisselliella* (Kleidermotte) und *Tinea pellionella* (Pelzmotte) und

die europäische Trockenholztermite *Kalotermes flavicollis* vom Projektpartner BAM bezogen. Um auch hier mit Tieren arbeiten zu können, die sich bereits im Substrat etabliert haben, wurden die Larven aus dem Brutsubstrat gelöst und dann in vorbereitete Prüfhölzer eingesetzt (Abb. 6). Dies geschah mindestens 10 Tage vor jeder Anoxia-Behandlung, damit sich die ausgelösten Larven wieder einnagen und etablieren konnten. Dies bot den Vorteil, dass sich eine bestimmte Anzahl von Tieren in definierten Prüfhölzern einsetzen ließ. Abb. 6 ist zu entnehmen, dass es vermutlich einen Unterschied macht, ob eine freie Larve (Abb. 6 im Vordergrund) für die Versuche verwendet wird oder eine im Holzprüfkörper etablierte Larve, die sich bereits eine Larvenkammer gefressen hat und somit vermeintlich weniger Stress ausgesetzt ist, was den natürlichen Bedingungen näher kommt und somit für realistische Ergebnisse sorgt.

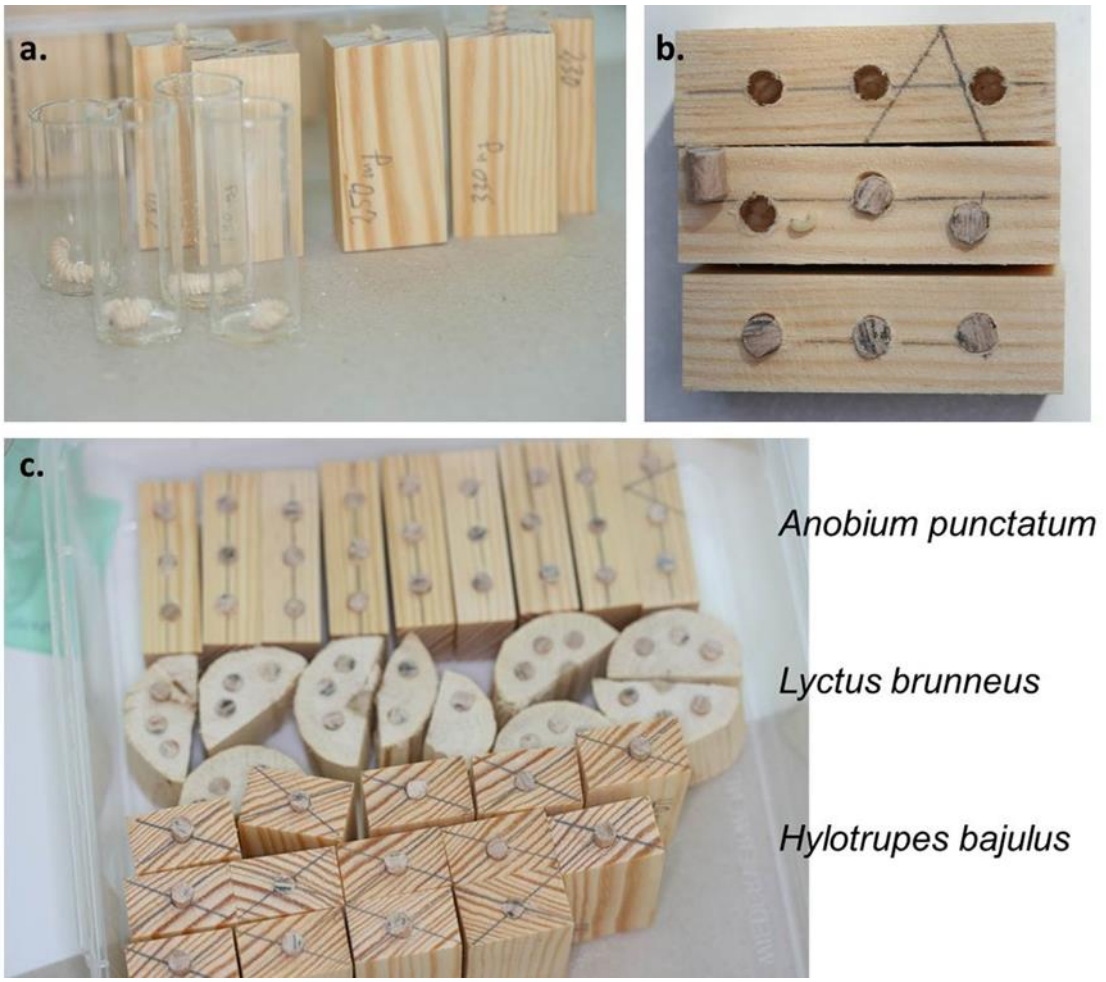


Abb. 6: Einbringen von holzbohrenden Käferlarven in definierte Prüfkörper. a. Ausgelöste Hausbock-Larven (*Hylotrupes bajulus*) werden in Prüfhölzer eingesetzt. b. Larven des Gemeinen Nagekäfers (*Anobium punctatum*) werden in Prüfhölzer verbracht. c. Übersicht der mit Käferlarven versehenen und mit Holzdübeln verschlossenen Prüfhölzer. Die Larven werden mindestens 10 Tage vor einer Anoxia-Behandlung eingesetzt, was ihnen ermöglicht, sich in dem Prüfhölzchen zu etablieren. Im Anschluss werden diese Prüfhölzer für die Versuche verwendet.

3.4. Entwicklung und Aufbau eines Handgerätes mit UWB-Radarsensor (AP4)

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde von Seiten des Projektpartners Technische Universität Ilmenau eine Ultrabreitband-Radarsensorik entwickelt, mit deren Hilfe die Wirksamkeit einer Anoxia-Behandlung zerstörungsfrei verifiziert werden kann. Die verwendete Ultrabreitband (UWB)-Sensorik zeichnet sich neben der hohen Bandbreite auch durch eine extrem geringe Sendeleistung aus. Diese beträgt -6 dBm, was unter der durchschnittlichen Sendeleistung herkömmlicher Mobiltelefone liegt

und somit für die Verwendung keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden müssen. Das entwickelte Tischgerät arbeitet in einem Frequenzbereich von etwa 25-30 GHz und ist durch die kompakte Bauart mobil einsetzbar. Die Funktionalität wurde anhand mehrerer Langzeitmessungen an Schädlingsproben am RF in Berlin verifiziert.

Berührungslose Messmethoden, welche auf dem Aussenden elektromagnetischer Wellen basieren, sind weitestgehend aus den Bereichen der Verkehrskontrolle und der Flugraumüberwachung bekannt. Die darauf beruhenden Messmethoden können jedoch auch auf wesentlich geringere Distanzen angewandt werden und kommen dabei mit einer geringeren Sendeleistung und gleichzeitig höherer Auflösung aus. Alle Messgeräte haben gemeinsam, dass sie einen internen Taktgenerator besitzen, welcher ein hochfrequentes Signal erzeugt. Dieses interagiert, nachdem es über eine Antenne abgestrahlt wurde, mit der gesamten Umwelt. Die elektromagnetische Welle wird dabei an Phasenübergangen gebrochen und reflektiert. Die zurückgeworfenen Anteile werden gleichzeitig über Antennen aufgenommen und der anschließenden Datenauswertung zugeleitet. Für die Erzeugung des Anregungssignals, welches in die Umwelt ausgestrahlt wird, stehen drei etablierte Verfahren zur Verfügung. Beim Impulsradar wird ein zeitlich schmaler Signalimpuls erzeugt und abgestrahlt, welcher signaltheoretisch durch seine steilen Signalflanken ein sehr breites Spektrum besitzt. Zwar kann mit diesem Verfahren eine sehr hohe Messwiederholrate erreicht werden, allerdings sind die Anforderungen an die Elektronik sehr hoch und damit die technologische Umsetzung sehr kostenintensiv. Alternativ dazu kann beim FMCW (Frequency Modulated Continous Wave)-Radar ein kontinuierliches Sinussignal abgestrahlt werden, welches in seiner Frequenz durchmoduliert wird. Der sehr feinen spektralen Auflösung steht die geringere Aufnahmegeschwindigkeit entgegen. Als Alternative zu beiden Verfahren besteht die in diesem Projekt verwendete M-Sequenz-Technologie. Bei dieser wird ein quasistochastisches Signal ausgesendet, welches erst im Empfänger zu einem zeitlichen Impulssignal korreliert wird. Damit werden die Vorteile des Impulsradars (hohe Aufnahmegeschwindigkeit) mit denen des CW-Radars (hohe Auflösung) vereint.

Der grundlegende Messaufbau zur berührungslosen Schädlingsdetektion besteht aus einer Sende- und ein bis zwei Empfangsantennen. Die ausgestrahlte elektromagnetische Welle dringt dabei in das zu untersuchende Objekt ein und wird an jedem Phasenübergang unterschiedlich stark gedämpft und reflektiert. Dabei bilden Insekten gleichermaßen Phasenübergänge aus wie die äußere Schicht des Prüfobjekts oder etwaige Lufteinschlüsse. In Abb. 7 ist ein schematischer Messaufbau abgebildet.

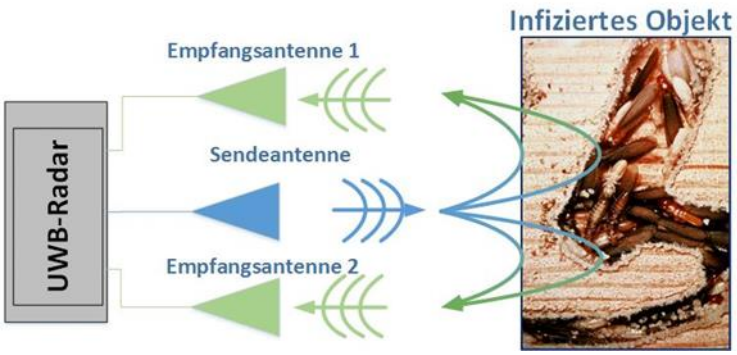


Abb. 7: Schematischer Messaufbau zur berührungslosen Schädlingsdetektion. Die emittierte Welle dringt in das zu untersuchende Objekt ein und wird an allen Grenzflächen reflektiert. Die zurückgeworfenen Signalanteile werden von den Empfangsantennen aufgenommen.

Die anschließende Signalauswertung basiert auf der Annahme, dass die Schädlinge die einzige Quelle für Signalveränderungen innerhalb des zu untersuchenden Bereichs (Region Of Interest, ROI) sind. Somit werden zunächst sämtliche statische Signalanteile eliminiert, so dass ein rein dynamisches Messsignal übrigbleibt. Die stärkste Signalkomponente sollte dabei die Bewegungen der Schädlinge innerhalb des Prüfobjekts darstellen. Dabei bilden externe Sendeeinrichtungen wie Access Points oder Mobiltelefone starke Störquellen, welche die Nutzsignalamplitude um ein Vielfaches übersteigen können. Aus diesem Grund ist eine digitale Bereinigung der Messdaten von unerwünschten Störquellen unbedingt erforderlich.

Zur ersten Machbarkeitsanalyse und Erprobung der Technologie am speziellen Anwendungsfall der Schädlingsdetektion wurden zunächst in Voruntersuchungen einfache Labormessungen durchgeführt. Das RF hatte dazu verschiedene Schädlingsproben mit Termiten bereitgestellt. Als Näherung wurden die Proben zunächst im Labor mit Hilfe eines Netzwerkanalysators und zwei Antennen untersucht. Dies diente zur Abschätzung der Machbarkeit und der zu erwartenden technischen Parameter wie Bandbreite und Signal-Rausch-Abstand.

Da die Schädlinge in ihrer natürlichen Umgebung bzw. beim Befall von Museumsgütern nur in geschlossenen Holzvolumina aktiv sind, wurde ein entsprechender Prüfkörper gefertigt. Dieser besteht aus einem zweiteiligen Holzblock (MDF) mit einer Kantenlänge von 30 cm, in dessen mittlere Aussparung die Schädlingsproben eingebracht werden können. In Abb. 8 ist der MDF-Block dargestellt.

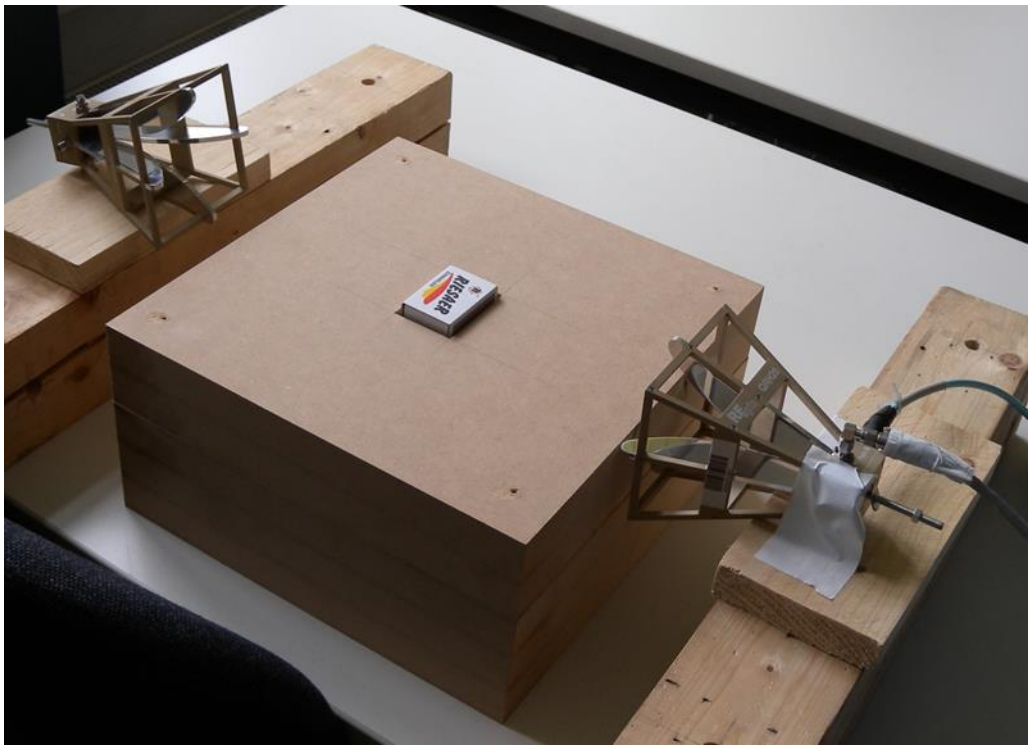


Abb. 8: Offener MDF Block. In der Mitte des MDF-Blocks ist eine Aussparung zu erkennen, in die eine Streichholzschachtel mit mehreren Termiten gelegt wurde.

Als Ergebnis der ersten Voruntersuchungen mit dem Prüfkörper konnte die Aktivität einer Termitenkolonie von ca. 10-15 Tieren, welche in den geschlossenen MDF-Block eingebracht wurden, mit Hilfe der UWB-Sensorik detektiert werden. Das verwendete Messspektrum lag zwischen 0,1-8

GHz. In Abb. 9 und Abb. 10 sind das Messszenario sowie die dazugehörigen Messergebnisse zu sehen.

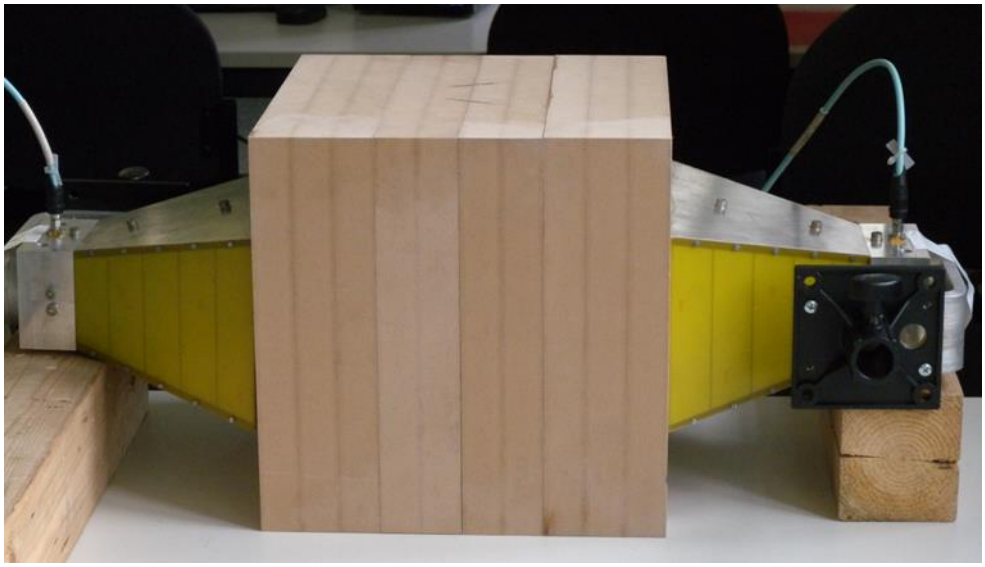


Abb. 9: Messszenario zu Voruntersuchungen. In der Mitte ist der MDF-Block platziert, in dessen Mitte eine Termitenkolonie eingebracht wurde. Links und rechts sind die beiden Breitbandantennen erkennbar.

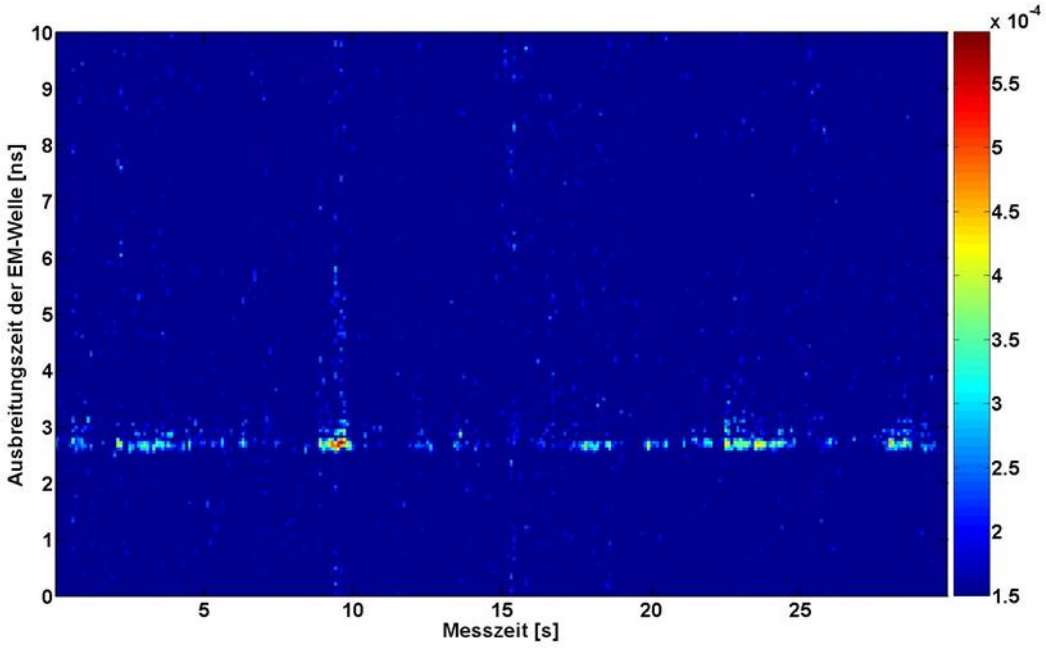


Abb. 10: Radargramm zu den Voruntersuchungen. Gemessen wurde eine Termitenkolonie von ca. 15 Tieren innerhalb des MDF-Blocks.

Die in Abb. 10 gezeigten Messdaten sind als Radargramm dargestellt. Dabei beschreibt die x-Achse die Beobachtungs- bzw. Messzeit in Sekunden und die y-Achse die Laufzeit der elektromagnetischen Welle von der Sendeantenne über das reflektierende Objekt zur Empfangsantenne. Aus dieser Laufzeit kann durch Kenntnis der von der Welle durchlaufenden Medien der Abstand zwischen Antennen und reflektierendem Objekt approximiert werden. Die Signalamplitude ist in der Farbskala kodiert, wobei blaue Bereiche einen niedrigen und orange/rote Bereiche einen hohen Signalanteil widerspiegeln. Über die gesamte Messzeit ist ein „Aktivitätsstreifen“ im Bereich um 3 ns erkennbar.

Dieser stellt die Bewegung der Schädlinge dar. Je stärker die Bewegung ausgeprägt ist, desto höher ist die im Radargramm dargestellte Amplitude in der Farbskala. Durch die Darstellung als Radargramm können die Messdaten sehr schnell bewertet und eine Aussage über das mögliche Vorhandensein von Schädlingen getroffen werden.

Anhand dieser Messergebnisse konnte im ersten Schritt gezeigt werden, dass es mit Hilfe der verwendeten UWB-Sensorik möglich ist, die Bewegungsaktivität von Schädlingen zerstörungsfrei innerhalb eines geschlossenen Volumens zu detektieren. Um sich einem realen Anwendungsszenario weiter anzunähern, wurde der Versuchsaufbau dahingehend geändert, dass das Schädlingsaufkommen pro Volumen reduziert wurde. Bei Verringerung der Einzeltiere der untersuchten Proben fiel jedoch, wie zu erwarten war, auch das Signal-Rausch-Verhältnis signifikant ab. Damit war es nicht mehr möglich, die Bewegungsaktivität eindeutig zu detektieren. Erschwerend kam hinzu, dass durch Abnahme der Individuenzahl gleichzeitig die Bewegungsaktivität der einzelnen Tiere abnahm. Somit konnte nicht verifiziert werden, ob die Tiere sich während der Messung tatsächlich bewegt haben und somit ein Nutzsignal in den Messdaten vorhanden ist.

Zur Erhöhung der Praktikabilität der Voruntersuchungen wurde ein Simulator aufgebaut. Dieser bildet die Bewegungen der zu detektierenden Schädlinge nach und garantiert eine kontinuierliche Bewegungsaktivität. Der Aktor des Simulators besteht aus einem Servomotor, welcher einen in der Größe den gesuchten Schädlingen entsprechenden Draht zirkular bewegt. In Abb. 11 ist der Simulator erkennbar. Das Bewegungsmuster kann wahlweise periodisch oder stochastisch erfolgen. Die Ansteuerung erfolgt dabei über einen Mikrocontroller.

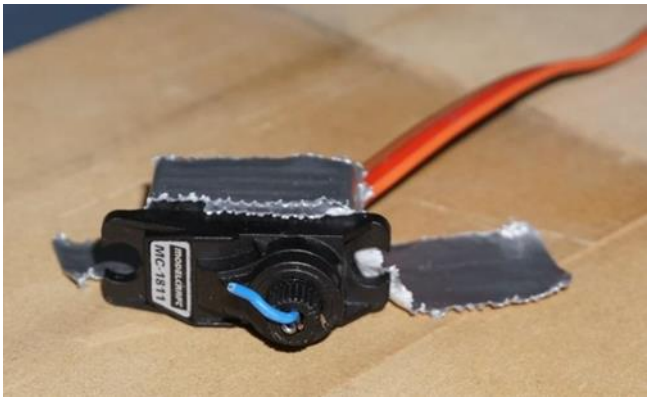


Abb. 11: Simulator

Die Größe des Simulators wurde so gewählt, dass er in den bereits vorhandenen MDF-Holzblock eingebracht werden kann, ohne mechanische Anpassungen vornehmen zu müssen. Für die Testmessungen wurde der Simulator zunächst offen in einem Abstand von etwa 30-40 cm vor den Antennen platziert. Als Bewegungsmuster wurde eine periodisch-zirkulare Wechselbewegung von ca. 180° gewählt. Abb. 12 gibt das Ergebnis der Messung als Radargramm wieder.

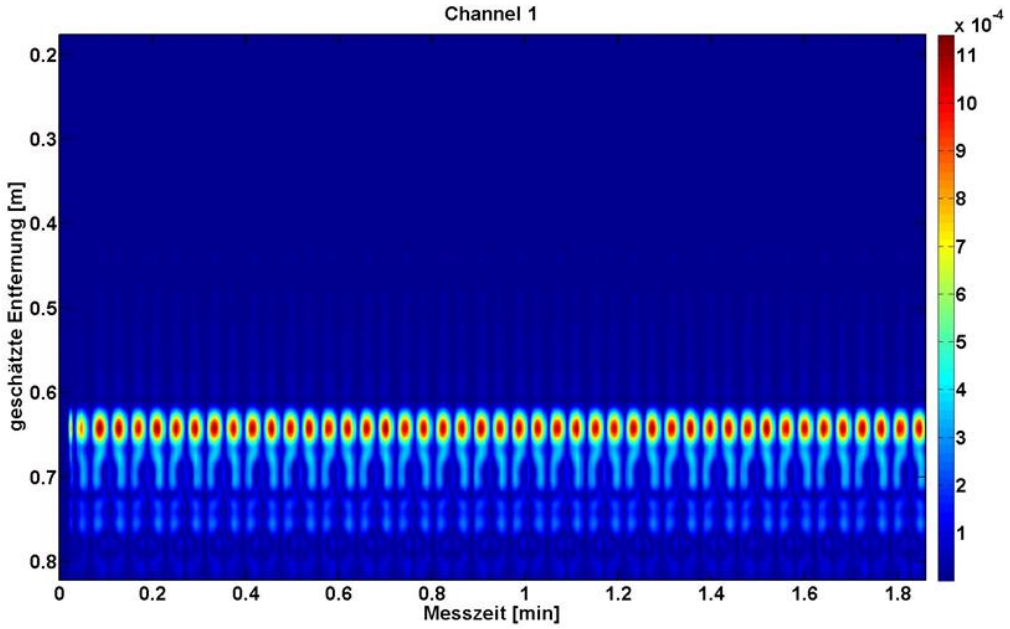


Abb. 12: Radargramm der Messung mit freiliegendem Simulator

Die periodische Simulatorbewegung ist dabei eindeutig erkennbar. Da im realen Anwendungsfall die gesuchte Schädlingsbewegung jedoch nicht periodisch, sondern streng stochastisch ist, wurde die Simulatorbewegung daran angepasst. Der Mikrocontroller wertet dazu einen offenen Analogeingang aus. Da dieser Eingang kein definiertes Signal erhält, besitzt das elektronische Rauschen den stärksten Signalanteil. Mit diesem natürlich-stochastischen Signal wird ein interner Zufallsgenerator gespeist, welcher anschließend die Bewegung des Simulators beeinflusst. Somit wurde eine möglichst hohe Zufallsverteilung der Simulatorbewegung erzielt. In Abb. 13 ist das Ergebnis der Messung des sich zufällig bewegenden Simulators innerhalb des geschlossenen MDF-Blocks dargestellt. Die Bewegung ist weiterhin als „Aktivitätslinie“ eindeutig erkennbar, jedoch in der Amplitude wesentlich stärker gedämpft im Vergleich zur vorherigen Messung.

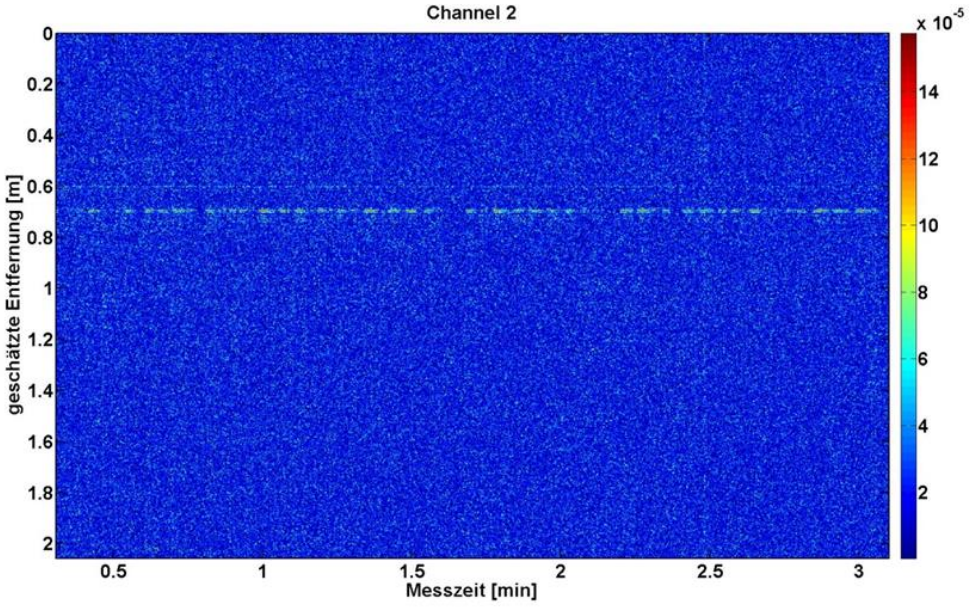


Abb. 13: Radargramm zur Messung des Simulators mit zufälligem Bewegungsmuster innerhalb des MDF-Blocks

Da alle Bewegungsmuster auch mit dem geschlossenen MDF-Holzblock deutlich in den Radargrammen erkennbar sind, wurde damit die Machbarkeit der Bewegungsdetektion mit Hilfe der verwendeten UWB-Sensorik durch Holzobjekte hindurch erneut verifiziert. Die verwendete UWB-Sensorik basierte auf einer internen Taktrate von 18 GHz.

Als weiterer Schritt wurden die obigen Messungen mit Testorganismen aus der Insektenzucht des RF wiederholt. Als Schädlinge wurden *Tribolium destructor* (Großer Reismehlkäfer) und *Tribolium confusum* (Amerikanischer Reismehlkäfer) verwendet. Diese zeichnen sich durch eine einfache und ungefährliche Zuchthaltung aus. Sowohl die Größe als auch das Bewegungsmuster der Tiere spiegelt einen guten Mittelwert der in Museen zu erwartenden Schädlinge wider. Die Testorganismen wurden in den vom RF gelieferten Kunststoffgefäßen gehalten. Jedes Gefäß umfasste eine Gruppe von etwa 10-15 Tieren.

In Abb. 14 und Abb. 15 ist der Messaufbau mit den Testorganismen in einer Messkammer dargestellt.

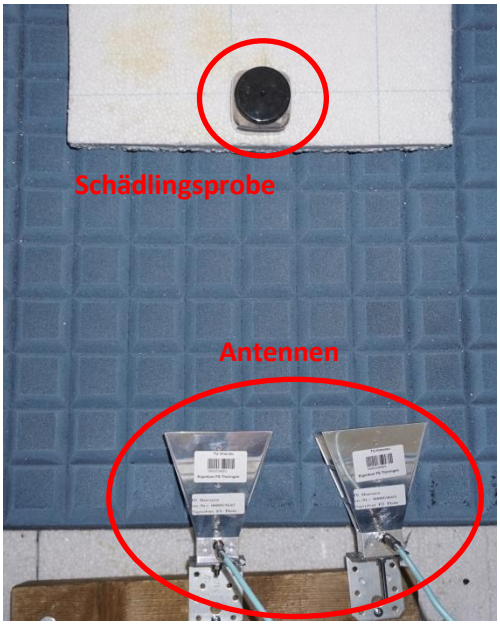


Abb. 14: Messaufbau zur Detektion einer Schädlingskolonie (*Tribolium confusum*) mit direkter Ausleuchtung ohne Hindernis

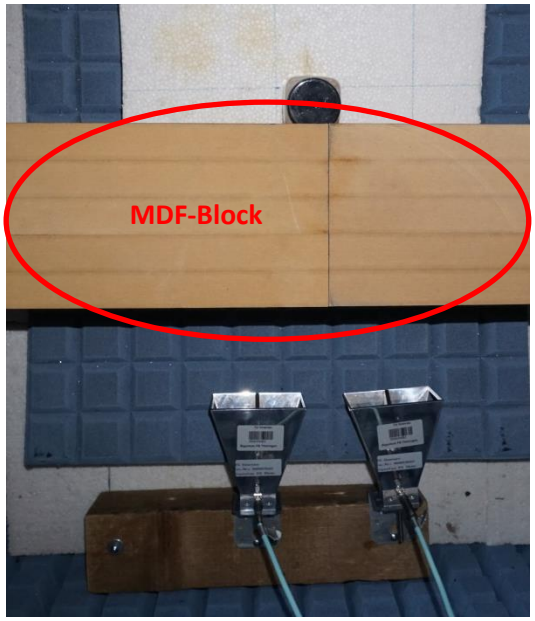


Abb. 15: Messaufbau zur Detektion einer Schädlingskolonie (*Tribolium confusum*) mit eingebrachtem Hindernis (zweiteiliger MDF-Block)

Die Testorganismen wurden zunächst ohne Hindernis gemessen. Anschließend wurde der MDF-Block zwischen die Schädlingsprobe und die Antennen eingebracht. Die Antennenkonfiguration wurde dabei nicht verändert. Die Ergebnisse nach der Signalverarbeitung sind in Abb. 16 als Radargramm dargestellt.

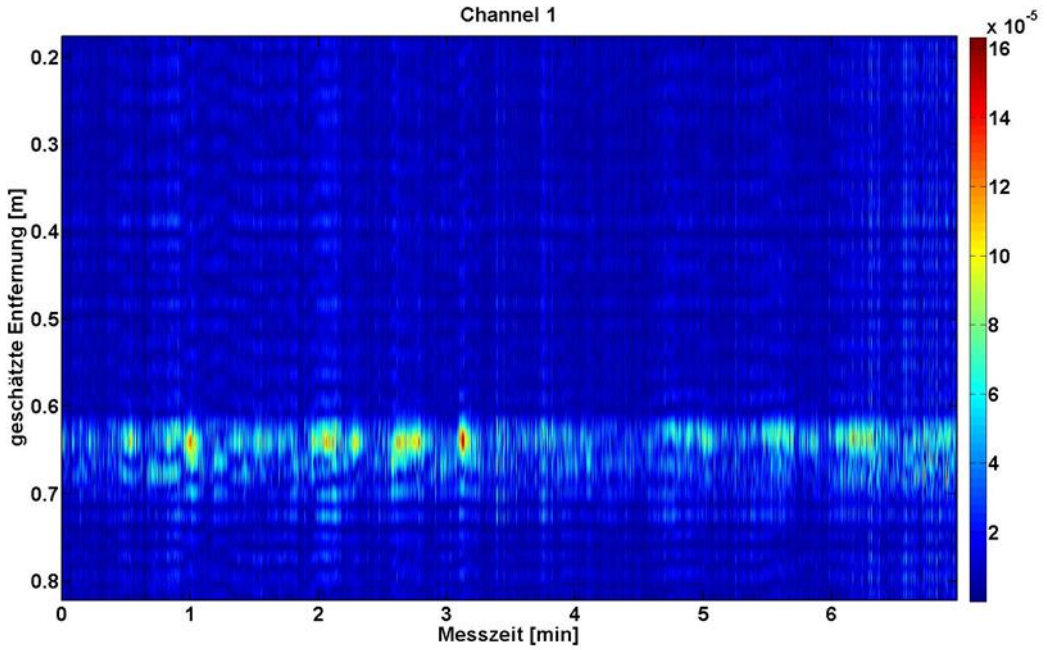


Abb. 16: Radargramm der Messung einer Schädlingskolonie (*T. destructor*) mit direkter Ausleuchtung ohne Hindernis

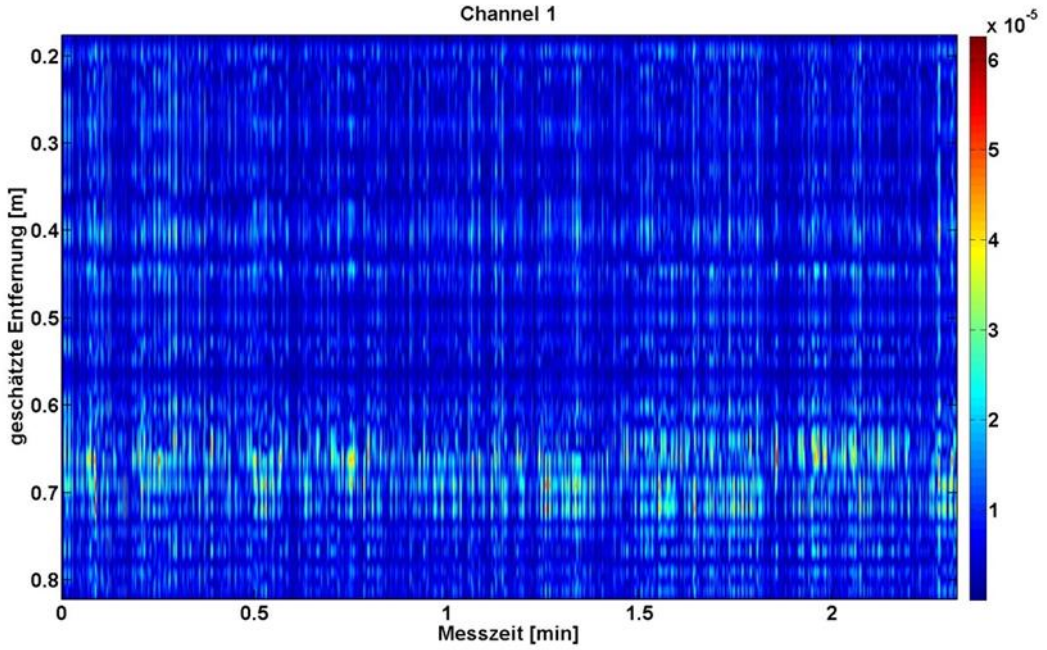


Abb. 17: Radargramm der Messung einer Schädlingskolonie (*T. destructor*) durch ein Hindernis (MDF-Block)

Bei der direkten Messung ist die Schädlingsaktivität eindeutig erkennbar. Über die gesamte Messzeit ist eine „Aktivitätslinie“ erkennbar. Diese verschwindet jedoch nahezu durch das Einfügen des Hindernisses, wie in Abb. 17 zu sehen ist.

Am Ethnologischen Museum Berlin bestand die Möglichkeit der Praxiserprobung des UWB-Messsystems. Die dortige, für die Öffentlichkeit bereits geschlossene, Ausstellung beinhaltete unter anderem einen Einbaum, bei welchem ein Verdacht auf Schädlingsbefall durch Trockenholztermiten bestand. An allen potentiellen Infektionsstellen wurden daher Messungen mit Hilfe des UWB-Sensors

durchgeführt. In Abb. 18 ist ein exemplarischer Messaufbau abgebildet. Die Antennenanordnung wurde dabei aus den vorherigen Laboruntersuchungen mit der mittigen Sendeantenne übernommen.

Abb. 18: Messaufbau am Ethnologischen Museum in Berlin. Die mittlere Antenne bildet den Sendekanal, links und rechts davon sind die beiden Empfangskanäle.

Die anschließende Datenauswertung zeigte keine eindeutige Aktivität innerhalb des Einbaums. Durch das Fehlen einer eindeutigen Aktivitätslinie in den verarbeiteten Daten ist jedoch nicht gleichzeitig das Fehlen von Schädlingen bewiesen, wodurch in diesem Fall keine beweiskräftige Aussage zum Befall des Einbaums durch Schädlinge getroffen werden konnte.

Um die verwendete UWB-Sensorik bezüglich ihrer Sensibilität gegenüber verschiedener Schädlingsgrößen zu spezifizieren, wurden in Kooperation mit dem Rathgen-Forschungslabor Langzeitmessungen durchgeführt. Da das RF im Rahmen des Projektes auf einen großen Pool an Schädlingsproben zurückgreifen kann, konnten mehrere Schädlingsarten untersucht werden. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 19 gezeigt und bestand aus einem Exsikkator sowie der UWB-Sensorik mit drei Antennen. In der Mitte des Exsikkators wurden die Schädlingsproben positioniert, welche anschließend sowohl reflektiv als auch transmissiv ausgeleuchtet wurden. Weiterhin bestand durch die Verwendung eines Exsikkators die Möglichkeit, durch Zugabe eines Sauerstoffabsorbers eine kurzzeitige Anoxia-Behandlung zu simulieren.

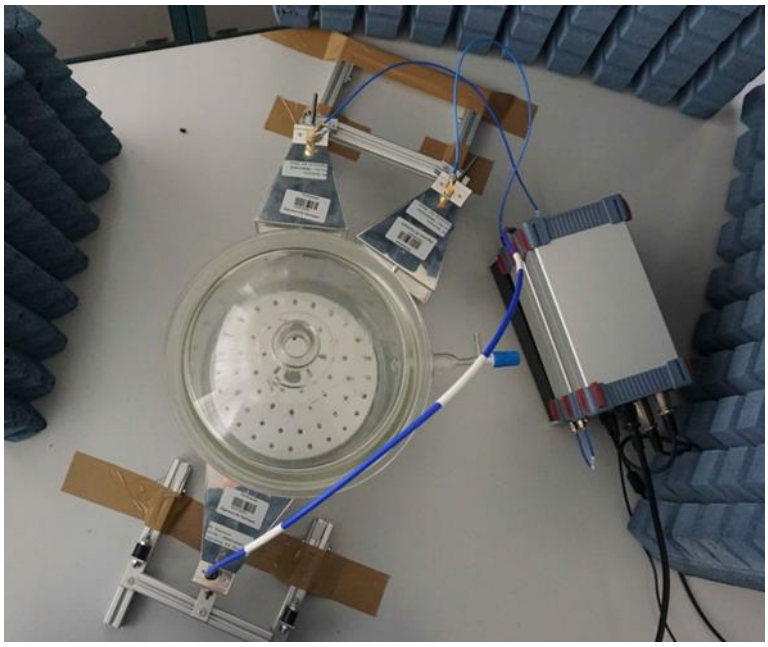
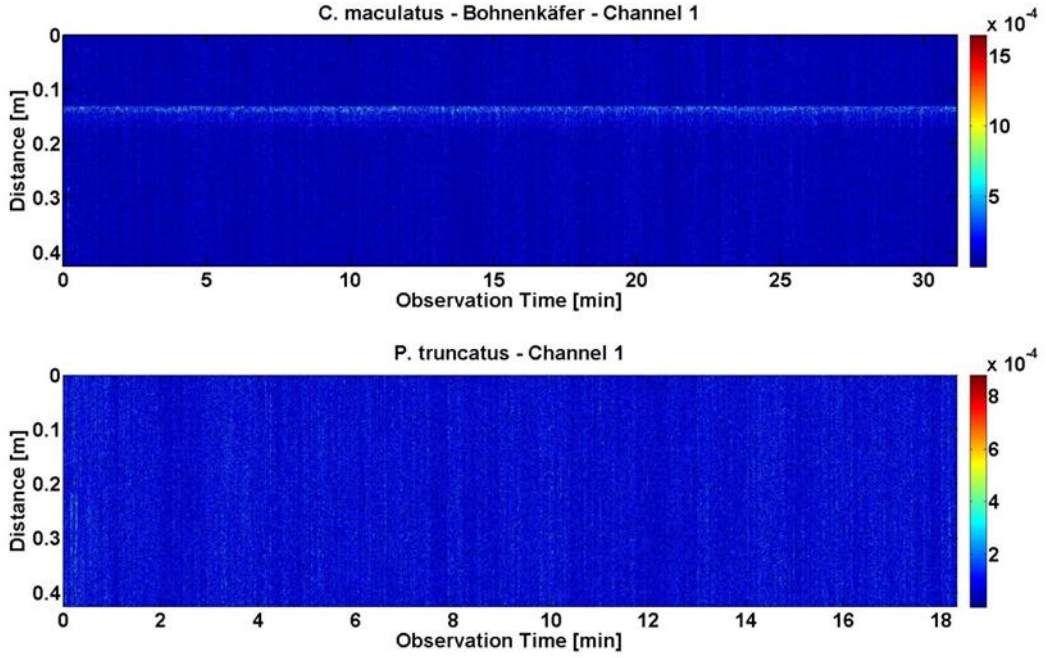


Abb. 19: Messaufbau im RF. In der Mitte ist der Exsikkator erkennbar, in welchen die Schädlingsproben eingebracht wurden. Außen angeordnet sind die Sende- (Tx) und Empfangsantennen (Rx1+Rx2)

Als Schädlingsproben wurden *Callobruchus maculatus*, *Prostephanus truncatus*, *Gibbium psylloides*, *Lasioderma serricorne* (Larven und Puppen) sowie *Incisitermes marginipennis* vermessen. Letztere wurden außerdem einer Anoxia-Simulation unterzogen. Die Messergebnisse sind in Abb. 20 dargestellt.



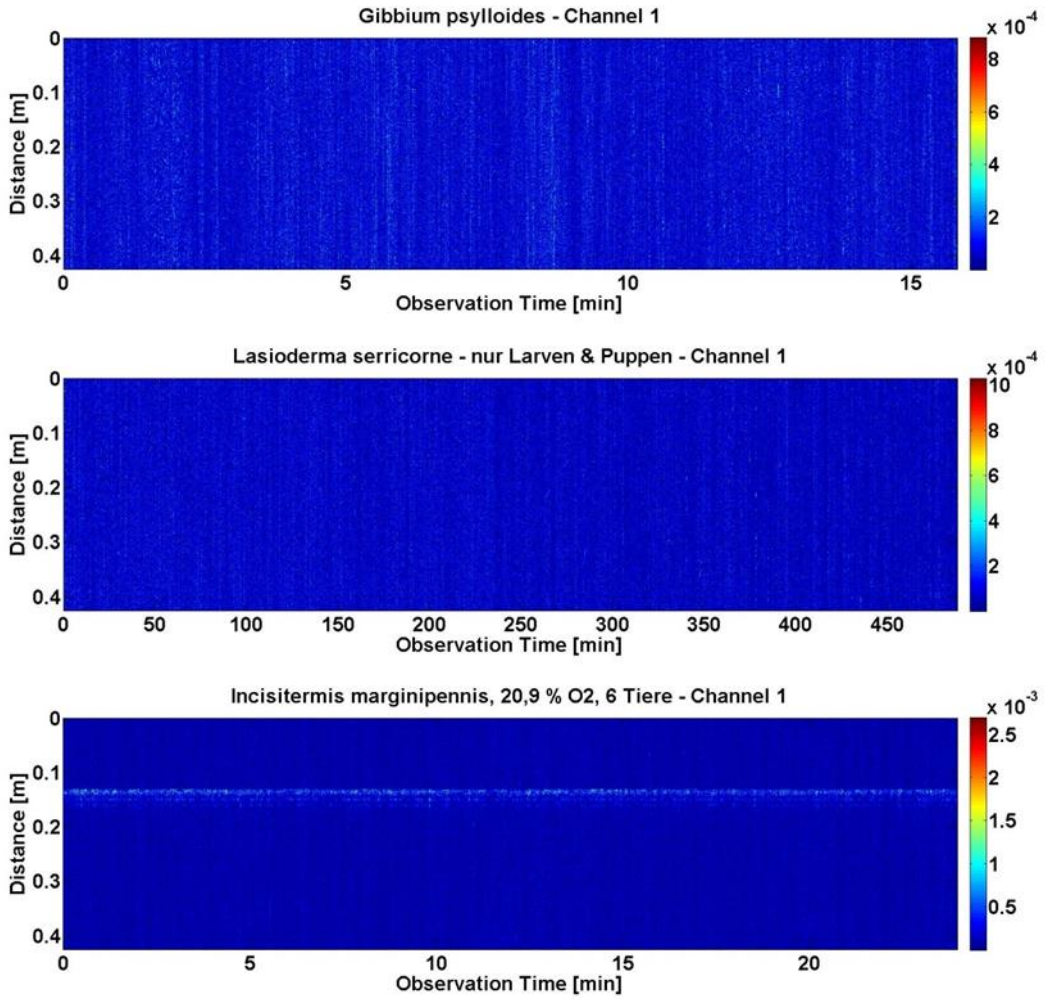


Abb. 20: Messergebnisse der Langzeitversuche am RF. Bis auf *C. maculatus* und *I. marginipennis* sind keine Aktivitäten im Radargramm erkennbar.

In den obigen Radargrammen sind nur bei *C. maculatus* und *I. marginipennis* deutliche Bewegungsmuster („Aktivitätslinie“) erkennbar. Der Grund, weshalb die übrigen Schädlinge kein deutliches Bewegungsmuster erzeugen, wird in der geringeren Größe der Schädlinge bzw. der geringeren Bewegungsaktivität vermutet.

Als weiterer Schritt wurden *I. marginipennis* einem Sauerstoffentzug unterworfen, währenddessen deren Aktivität mit dem oben genannten Messaufbau überwacht wurde. Dazu wurde zu Beginn der Messung ein Sauerstoffabsorber in den Exsikkator, zusammen mit den Schädlingen, eingebracht. In Abb. 21 ist das dazugehörige Radargramm dargestellt.

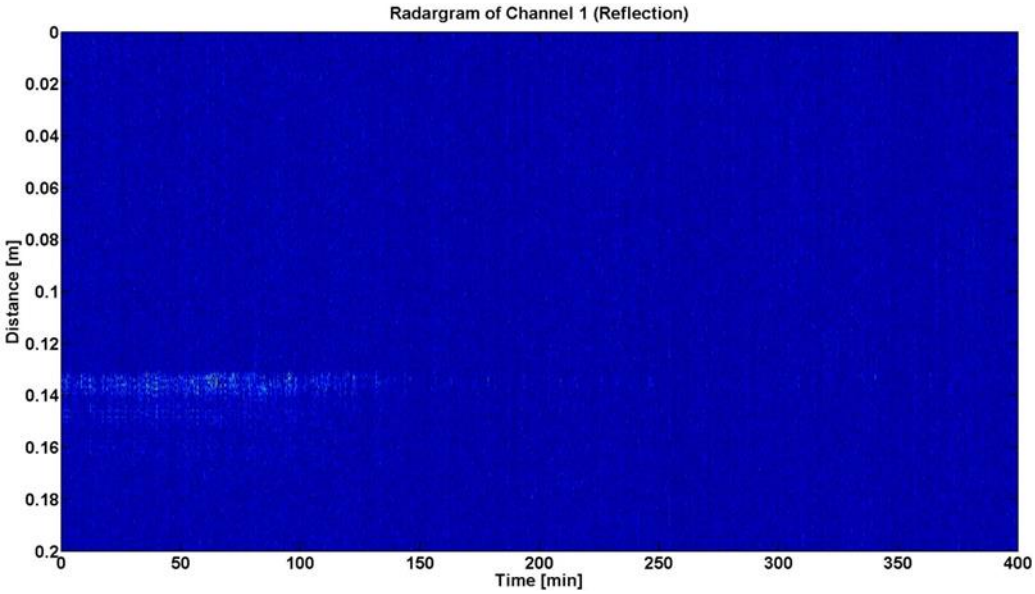


Abb. 21: Radargramm der Messung während einer Anoxia-Behandlung. Es ist deutlich erkennbar, wie die "Aktivitätslinie" nach ca. 150 Minuten verschwindet.

Bereits im Radargramm ist erkennbar, dass die Bewegungsaktivität nach ca. 150 Minuten sehr stark abnimmt. Für die deutlichere Auswertung der Messdaten wurde ein weiterer Signalverarbeitungsschritt angewandt. Dazu wurde das Radargramm in einzelne Zeitfenster mit einer Dauer von etwa fünf Minuten unterteilt. Für jedes Zeitfenster wurde anschließend die durchschnittliche Varianz, die der Aktivität gleichgesetzt wird, bestimmt und über die Zeit abgetragen. Das Ergebnis ist in Abb. 22 wiedergegeben.

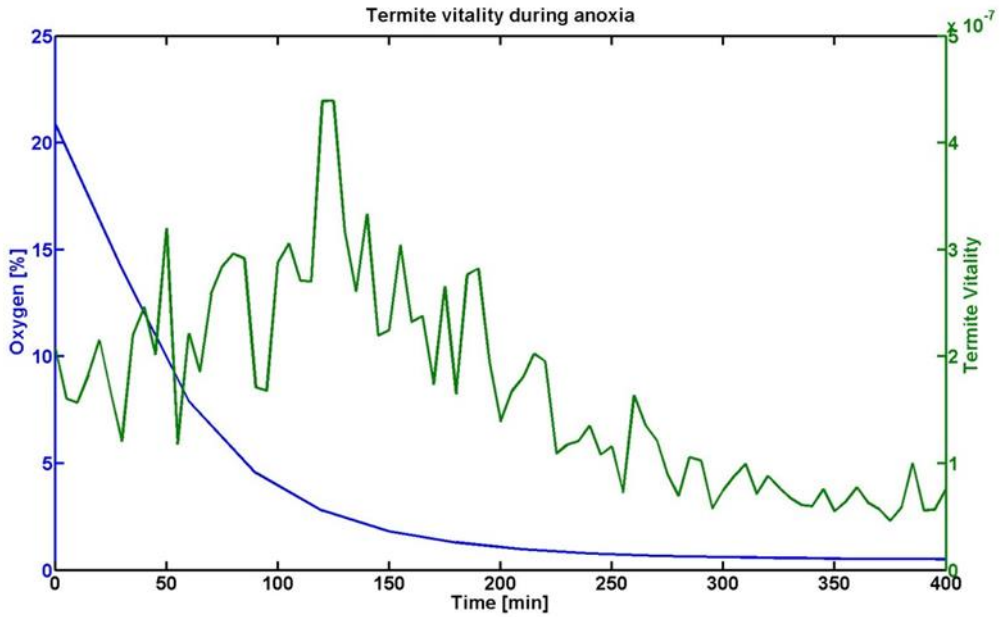


Abb. 22: Auswertung der Schädlingsaktivität in Bezug zur Sauerstoffkonzentration. Nach dem Absenken des Sauerstoffgehaltes ist zunächst eine erhöhte Aktivität erkennbar, welche auf einen Fluchtreflex schließen lässt. Abschließend sinkt die Aktivität mit abnehmender Sauerstoffkonzentration.

Mit der Abnahme der Sauerstoffkonzentration ist zunächst ein Anstieg der Schädlingsaktivität zu erkennen. Dies spiegelt den Fluchtreflex solcher Insekten wider, welcher häufig bei der Anwendung

einer Anoxia-Behandlung zu beobachten ist. Mit weiter sinkendem Sauerstoffgehalt nimmt auch die Aktivität stetig ab, bis diese vollständig zum Erliegen kommt. Anzumerken ist hierbei, dass nach Beenden der Messung und Öffnen des Exsikkators die Schädlinge sofort anfingen, sich wieder zu bewegen. Ein Einstellen der Bewegung aufgrund einer zu niedrigen Sauerstoffkonzentration ist somit nicht gleichbedeutend mit dem Absterben der Schädlinge.

Zur Erhöhung der Sensibilität der UWB-Sensorik gegenüber kleineren Messobjekten wurde die bisherige Systemkonfiguration bezüglich einer höheren Ortsauflösung angepasst. Ausschlaggebend für die Begrenzung der Ortsauflösung ist im Falle eines Impulssignals dessen maximale Krümmung. Je stärker der Hauptimpuls in seinem Maximum gekrümmt ist, desto höher ist die Ortsauflösung bzw. Sensibilität gegenüber kleinen Objekten. Erreicht wird die Erhöhung der Impulskrümmung im verwendeten M-Sequenz System durch die Erhöhung der internen Taktrate. Dazu wurde ein Up-Down-Converter entwickelt, welcher das Anregungssignal, welches mit 14,8 GHz Taktfrequenz erzeugt wird, spektral verschiebt. Das damit entstehende Anregungssignal arbeitet im Ka-Band von 26-30 GHz. In Abb. 23 ist das modifizierte System mit zwei Antennen zu sehen.

Abb. 23: 30-GHz Prototyp mit zwei Antennen

Einhergehend mit der Erhöhung der Frequenz wird die mögliche Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle verringert. Die gesuchten Schädlinge halten sich jedoch in den meisten Fällen nahe der Objektoberfläche auf. Somit ist eine Eindringtiefe von wenigen Zentimetern für den Großteil der Anwendungen ausreichend. Mit diesem System wurden die Langzeitversuche im RF wiederholt, um die erhöhte Sensibilität zu verifizieren. In erster Instanz wurden die Schädlingsproben ohne Hindernis in einem Abstand von ca. 20 cm vor der Sensorik positioniert. Anschließend wurde als Hindernis eine Holzplatte mit einer Dicke von ca. 5 cm zwischen Antennen und Probe gestellt. Bei beiden Messungen wurden zunächst nur Trockenholztermiten (*I. marginipennis*) untersucht. In

beiden Fällen, sowohl mit als auch ohne Holzplatte, konnte ein einzelnes Tier eindeutig identifiziert werden. Die Messergebnisse beider Messungen sind in Abb. 24 dargestellt.

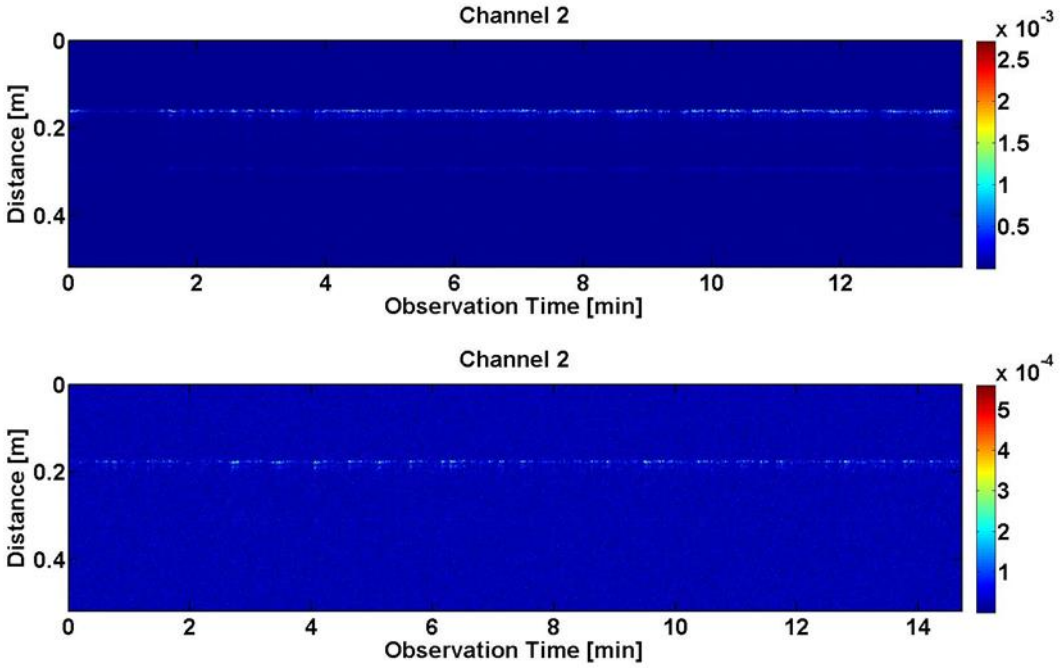


Abb. 24: Oben: Ergebnis der Messung eines Einzeltieres der Art *I. marginipennis*. Die Probe stand ca. 20 cm in direkter Sicht vor den Antennen. Unten: Ergebnis der Wiederholungsmessung mit eingebrachtem Hindernis (5 cm Holzplatte zwischen Antennen und Probengefäß)

In beiden Radargrammen ist eine deutliche Aktivität erkennbar. Vergleicht man die Farbskalierung, wird die Verringerung des Signal-Rausch-Abstandes sichtbar, welche durch die Dämpfungseigenschaften der Holzplatte verursacht wird. Mit diesem Experiment konnte eindeutig gezeigt werden, dass mit Hilfe des entwickelten UWB-Sensors die Bewegungsaktivitäten einzelner Insekten berührungslos hinter hölzernen Hindernissen detektiert werden können.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Sensorik-System entwickelt, mit dessen Hilfe die Bewegungsaktivität von Schädlingen innerhalb geschlossener hölzerner Volumina durch elektromagnetischen Wellen berührungslos erfasst werden kann. Voraussetzung für die eindeutige Detektion der Schädlingsaktivität ist neben der digitalen Signalverarbeitung zur Filterung und Extraktion des Nutzsignals die genügend hohe Eindringtiefe und örtliche Auflösung der elektromagnetischen Welle. Die Eindringtiefe des Anregungssignals beträgt bei trockenem Holz wenige Zentimeter. Dies wird als ausreichend betrachtet, da das Schädlingsvorkommen in den meisten Fällen dicht unter der Holzoberfläche auftritt. Durch die Anhebung des in den ersten Versuchen verwendeten Nutzspektrums von ca. 0,1-8 GHz auf ca. 26-30 GHz wurde die maximale Eindringtiefe zwar verringert, die Ortsauflösung dagegen wesentlich gesteigert. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass bereits ein einzelnes Tier der Art *I. marginipennis* (Trockenholztermiten) hinter einer 5 cm dicken Holzplatte detektiert werden kann. Somit erscheint das Messsystem potentiell für die Erfolgskontrolle einer Anoxia-Behandlung an Museumsgütern geeignet.

3.5. Durchführung der Versuchsserien (AP5)

Zur Untersuchung der Toleranz von Schadinsekten gegenüber sauerstoffarmen Bedingungen wurden Versuchsparameter von 20, 24 und 27 °C bei einer konstanten relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und Sauerstoffkonzentrationen von 0,5 und 1,0 % für eine Dauer von 14, 21 oder 28 Tage getestet. Die Insekten wurden dabei, wie in Absatz 3.3 (AP 3) beschrieben behandelt. Es wurden also nur etablierte Kleinkulturen oder Tiere für Versuche eingesetzt, die wenigstens 10 Tage vor dem Versuch in Prüfhölzchen oder in Testgefäße eingesetzt waren. Die Handhabung erwies sich dabei als einfach, wenn auch arbeits- und zeitaufwendig, da alle holzbohrenden Insekten und auch Kleider- und Pelzmotten vorher von der BAM abgeholt werden mussten und alle anderen Insekten in den eigenen Zuchten angesetzt werden mussten. Die Versuchsserien liefen dank des sehr zuverlässigen Equipments wiederum problemlos. Einziger Nachteil des Klimaprüfschrankes war, dass während des Versuches keine Möglichkeit bestand, Proben aus dem Schrank zu entnehmen oder weitere hinzuzufügen. Ein Öffnen des Prüfschrankes führte unweigerlich zu einer Belüftung und damit zu einem Versuchsabbruch.

3.6. Datenauswertung und Review publizierter Daten (AP6)

Die Auswertung der Versuche erfolgte auf zwei verschiedenen Wegen. Arten, bei denen die Individuenzahl bekannt war, wie etwa die abgezählten bei den holzbohrenden Arten, wurden im Anschluss des Versuchs ausgespalten und eine Lebend-Tot-Diskriminierung durchgeführt (Abb. 25).

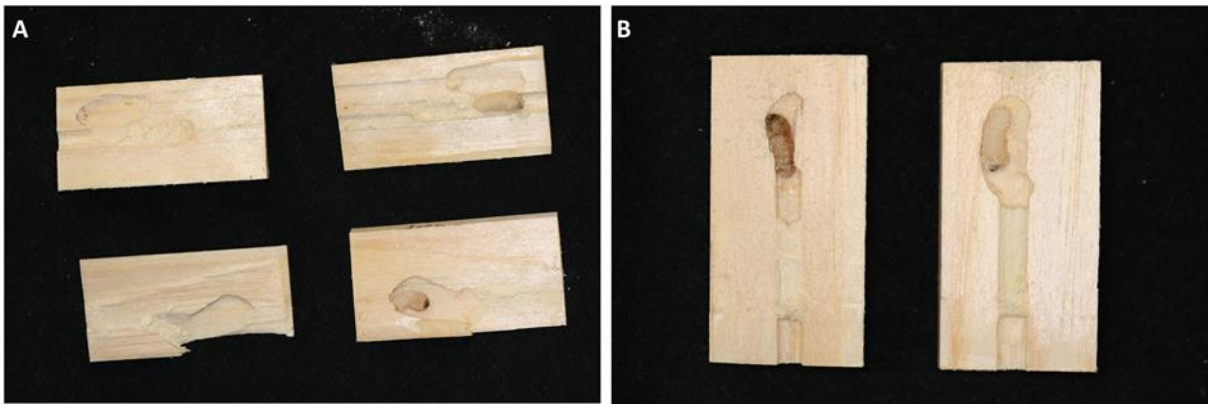


Abb. 25: Marginale Unterschiede in der Unterscheidung von lebenden und toten Larven. A) Zwei aufgespaltene Prüfhölzchen mit je einer Larve von *H. bajulus*. Unterschiede zwischen lebenden und toten Exemplaren können auch bei diesen Larven teilweise nur anhand von Mandibelbewegungen unter dem Binokular wahrgenommen werden. Hier ist die obere Larve gestorben, während die untere den Versuch überlebt hat. B) Verfärbungen zeigen eindeutig den Tod des linken Tieres an. Verfärbungen treten unter den hypoxischen Bedingungen im Versuch relativ selten auf.

Dies erfolgte ebenfalls bei Arten, die frei sichtbar im Substrat erfasst werden konnten. Die Auswertung begann 24-48 Stunden nach dem Versuchsende und war spätestens sieben Tage nach einem Versuch abgeschlossen. Die 24-48 Stunden dienten dabei zur Belüftung, damit sich innerhalb der Versuchsgefäße wieder die Normalatmosphäre mit etwa 21 % Sauerstoff einstellen, sich potenziell überlebende Insekten erholen und somit als lebendig wahrgenommen werden konnten. Dieses Vorgehen bietet einen direkten Zugriff auf die Versuchsergebnisse, ist allerdings nicht anwendbar bei Arten, die mit Brutsubstrat eingesetzt und im Substrat verborgen vorliegen. In diesem Fall ist die Ausgangszahl unbekannt und kleine Larvenstadien und Eier können in den heterogenen Brutsubstraten nicht detektiert werden. Selbst dehydrierte oder verstorbene, größere Larven oder Puppen können leicht übersehen werden. Häufig finden sich nur noch die Kopfkapseln oder Puppen, oder Puppenwiegen sind so stark mit Substrat behaftet, dass keine klare Struktur auffindbar ist, ohne diese bei der Kontrolle zu zerstören. Eine Lebend-Tot-Diskriminierung wird dadurch unmöglich.

Daher wurde bei diesen Proben eine Sichtprüfung durchgeführt, bei der Imagines oder größere bewegliche Larvenstadien augenblicklich wahrgenommen werden können. Falls dabei keine lebenden Insektenstadien entdeckt wurden, verblieben die Proben zur weiteren Bebrütung im Zuchtraum des RF. Dies diente dazu, dass verborgene Eier, Kleinlarven oder unbewegliche Puppen sich weiter entwickeln konnten, um sie bei späteren Kontrollen als größere Larven oder Imagines einfach detektieren zu können. Eine Auswertung nach Entwicklungsstadien ist hierbei nicht möglich, da die Temperaturbedingungen des Zuchtraumes nicht die nötige Konstanz aufwiesen, als dass ein Rückschluss vom Datum der Entdeckung auf das Entwicklungsstadium während der Behandlung möglich wäre. Weiterhin ist der Einfluss der hypoxischen Bedingungen während der Behandlung auf die Entwicklung von Insekten nicht ausreichend erforscht, sodass keine klare Zuordnung der Stadien möglich wäre. Es erfolgte hier eine qualitative „lebend-tot“ Auswertung, die allerdings für das Projektvorhaben vollständig angemessen ist, da bereits ein überlebendes Tier jedweden Stadiums die vorher durchgeführte Behandlung als „nicht ausreichend“ für diese Art kennzeichnet. Zusätzlich zu den getesteten Insekten wurden unbehandelte Kontrollansätze analysiert, die analog zu den Testansätzen gehalten wurden. Die Unterbringung während des Versuches erfolgte unter Normalatmosphäre neben dem Klimaschrank. Die entsprechende Temperierung erfolgte über die Klimaanlagen, während die Luftfeuchtigkeit nicht konstant gehalten werden konnte.

Ein direkter Vergleich der im Projekt gewonnen Versuchsergebnisse mit publizierten Literaturangaben ist nur unzureichend möglich. Häufig wurden Daten nicht systematisch oder unter nicht standardisierten Bedingungen und mit sehr unterschiedlichem Probenformat gewonnen, was eine Reproduzierbarkeit erschwert. Tabelle 3 stellt publizierte Forschungsergebnisse im Detail gegenüber.

4. Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die getesteten Arten und die Parameter der durchgeführten Versuche. Rot hinterlegt sind in der Tabelle jeweils Versuche, bei denen wenigstens ein Tier überlebte und die Stickstoffbehandlung folglich nicht ausreichend für die notwendige vollständige Bekämpfung war. Zahlen innerhalb der roten Markierung geben die Anzahl der gestorbenen (erste Zahl) und der überlebenden (zweite Zahl) Tiere wieder. Bei einer 21-tägigen Behandlung konnten bei 27 °C sowohl bei 0,5 % als auch bei 1,0 % Restsauerstoffgehalt alle getesteten Insekten erfolgreich abgetötet werden. Bei 24 °C hingegen konnte nur noch bei 0,5 % Restsauerstoff eine vollständige Bekämpfung aller eingesetzten Insekten erwirkt werden. Bei 1,0 % Restsauerstoff wurden einzelne Arten nicht mehr erfolgreich bekämpft (siehe Tabelle 1). Neben dem Hausbock (*Hylotrupes bajulus)*, der in musealen Einrichtungen eine geringfügige Rolle spielt und sich allein durch seine Körpergröße und Masse von den anderen untersuchten Schadinsekten deutlich absetzt, konnten zusätzlich auch Tabakkäfer (*Lasioderma serricorne*), Amerikanischer Speicherkäfer (*Trogoderma parabile*) und Kapuzenkugelkäfer (*Mezium affine*) nicht vollzählig abgewehrt werden. Dies ist bereits eine wichtige Erkenntnis, da ein Behandlungserfolg von Museumsgütern, dessen potenzielle Schadinsekten nicht bekannt sind, nicht mehr gegeben ist. Es ist also von besonderer Bedeutung, die Restsauerstoffkonzentration und die Temperatur zu jeder Zeit und an jedem Punkt des Behandlungsraumes genau einzuhalten, was gerade bei größeren Behandlungsräumen oder Zelten durchaus schwierig sein kann. Interessant sind ebenfalls die Ergebnisse, die bei 20 °C erzielt worden sind. Hier waren weitere relevante Arten, wie Trockenholztermiten (*Kalotermes flavicollis*), Gemeiner Nagekäfer (*Anobium punctatum*) und Brauner Splintholzkäfer (*Lyctus brunneus*) sowie der Australische Teppichkäfer (*Anthrenocerus australis*) überlebend zu finden. Wenig tolerant zeigten

sich die untersuchten Arten aus der Ordnung der Schmetterlinge (Lepidoptera). Hier konnten in jedem durchgeführten Versuch alle Arten, also Kleidermotten (*Tineola bisselliella*), Pelzmotten (*Tinea pellionella*) und Dörrobstmotten (*Plodia interpunctella*) vollständig bekämpft werden. Allerdings wäre eine noch zu ermittelnde verkürzte Behandlungszeit für diese häufig auftretenden, wenig toleranten Arten, wie die Kleidermotte nicht empfehlenswert, da mit dem Australischen Teppichkäfer *Anthrenocerus australis* eine tolerante Art auftritt, die ein ähnliches Nahrungsspektrum wie die Kleidermotte hat, die folglich verkürzte anoxische Behandlungen überleben könnte und somit im Anschluss an eine verkürzte Behandlung seinerseits für Schäden sorgen könnte. Die Bekämpfung von Pelz bzw. Keratin verwertenden Spezies sollte sich daher an den tolerantesten Arten orientieren.

Tabelle 1: Übersicht der über 21 Tage durchgeführten Versuche und eingesetzten Arten

Dauer	**21 Tage**					
Temperatur	20 °C		24 °C		27 °C	
Restsauerstoff	0,5 % O_2	1,0 % O_2	0,5 % O_2	1,0 % O_2	0,5 % O_2	1,0 % O_2
Gattung und Art						
Ctenolepisma longicaudata	X	/	X	X	/	/
Thermobia domestica	X	19; 6	X	X	X	X
Kalotermes flavicollis	X	15; 3	X	X	X	X
Acanthoscelides obtectus	X	X	X	X	X	X
Callosobruchus maculatus	X	X	X	X	X	X
Araecerus fasciculatus	X	X	X	X	X	X
Sitophilus granarius	-	-	X	X	X	X
Sitophilus zeamais	-	-	X	X	X	X
Anthrenocerus australis	-	-	X	X	X	X
Anthrenus flavipes	X	X	X	X	X	X
Attagenus smirnovi	X	X	X	X	X	X
Attagenus unicolor	X	X	X	X	X	X
Dermestes haemorrhoidalis	X	X	X	X	X	X
Dermestes lardarius	/	X	/	/	/	/
Dermestes maculatus	X	X	X	X	X	X
Trogoderma angustum	X	X	X	X	X	X
Trogoderma granarium	/	X	/	/	X	/
Trogoderma parabile	-	-	X	-	X	X
Tribolium confusum	X	X	X	X	X	X
Tribolium destructor	X	X	X	X	X	X
Cryptolestes ferrugineus	X	X	X	X	X	X
Oryzaephilus surinamensis	X	X	X	X	X	X
Gibbium psylloides	/	/	/	/	X	X
Mezium affine	-	-	X	-	X	X
Niptus hololeucus	X	/	/	X	X	X
Anobium punctatum	X	4; 11	X	X	X	X
Prostephanus truncatus	X	X	X	X	X	X
Lyctus brunneus	X	12; 3	X	X	X	X
Lasioderma serricorne	X	X	X	nn; 2K	X	X
Stegobium paniceum	X	X	X	X	X	X
Hylotrupes bajulus	4; 2	0; 6	X	4; 2	X	X
Plodia interpunctella	X	X	X	X	X	X
Tinea pellionella	X	X	X	X	X	X
Tineola bisselliella	X	X	X	X	X	X

X - Alle eingesetzten Individuen sind während der Behandlung verstorben.

\- - Individuen haben die Behandlung überlebt.

19; 6 - Individuen wurden gezählt, die erste Zahl gibt die Verstorbenen, die Zweite die Überlebenden.

/ - Art wurde nicht getestet.

Einfluss der Temperatur auf den Behandlungserfolg

Im Zuge der Auswertung konnte erwartungsgemäß der Einfluss der Temperatur auf den Behandlungserfolg oder die notwendige Behandlungszeit festgestellt werden. Der Metabolismus der poikilothermen Insekten ist temperaturabhängig. Ein Anstieg der Temperatur führt somit normalerweise zu einem höheren Stoffumsatz in Insekten, welcher wiederum unter sauerstoffarmen Konditionen nicht aufrechterhalten werden kann. Ein Temperaturanstieg beschleunigt somit alle Prozesse, sofern sie im physiologischen Rahmen liegen. Wie in Abb. 26 am Beispiel des Hausbockkäfers (*H. bajulus*) gezeigt, hat eine hohe Temperatur einen verkürzenden Effekt auf die Behandlungsdauer. Eine 21-tägige Behandlung bei 27 °C und 1,0 % Restsauerstoff erwies sich für alle eingesetzten Larven als letal und ist somit ausreichend. Bei 24 °C ist die Behandlungsdauer von 21 Tagen bereits nicht mehr annehmbar, da zwei von sechs Larven überlebten. Bei 20 °C überlebten sogar alle sechs behandelten Larven. Die in der Abbildung nicht dargestellten, unter Normalatmosphäre gehaltenen Kontrolltiere zeigten keine Auffälligkeiten und überlebten alle bis auf eine. Diese wurde vermutlich beim Einsetzen in die Prüfhölzer verletzt, hatte keinen Fraßgang angelegt und wurde als weiche, schwarze Larve vorgefunden.

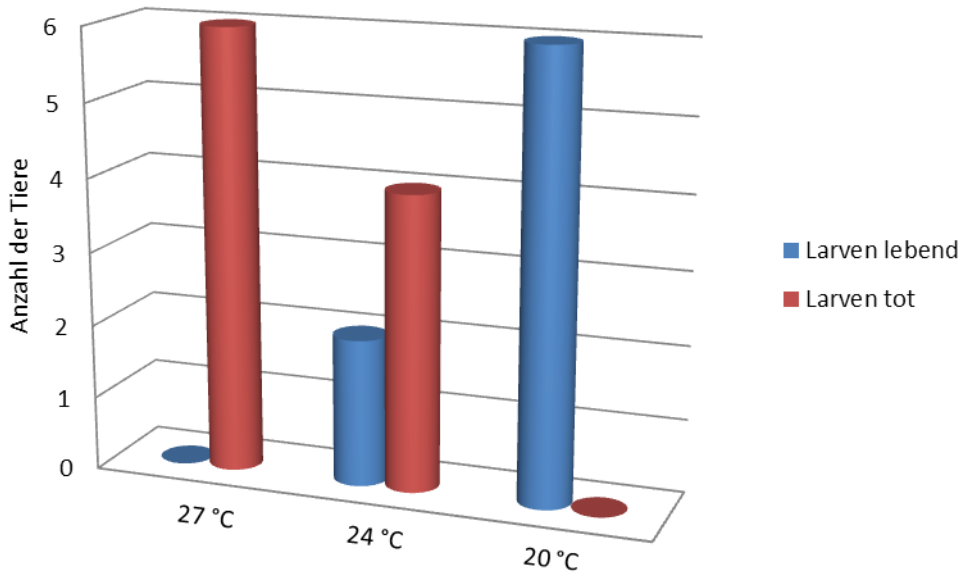


Abb. 26: Einfluss der Temperatur auf die Mortalität von *H. bajulus* bei 21-tägigen Behandlungen bei 1,0 % Restsauerstoff und 50 % rF und unterschiedlicher Temperatur. Während der 21-tägigen Begasungszeit wurden jeweils 6 Larven des Hausbockkäfers (*H. bajulus*) untersucht. Deutlich zeigte sich der Einfluss der Temperatur auf den Behandlungserfolg. Die Behandlung bei 27 °C töte alle 6 eingesetzten Larven ab, während bei 24 °C lediglich 4 von 6 eingesetzten Larven abgetötet wurden und bei 20 °C keine der 6 Larven abstarb.

Erhöhter Feuchtigkeitsverlust bei Insekten unter sauerstoffarmen Bedingungen

Verschiedene Mechanismen sind für die Mortalität unter hypoxischen oder anoxischen Bedingungen verantwortlich. Erhöhte Temperatur führt zu einer erhöhten Stoffwechselrate bei Insekten, während der Metabolismus durch den Sauerstoffmangel zeitgleich nur noch einen Bruchteil der Energie erzeugen und zur Verfügung stellen kann. Dies führt einerseits zu Akkumulation von giftigen Stoffwechselprodukten und andererseits zu zügigem Verbrauch aller Reservestoffe. Weiterhin verlieren die Insekten in der sauerstoffarmen Atmosphäre über ihre weitgeöffneten Stigmata große Mengen an Flüssigkeit (Adler 1994b). Dieser Wasserverlust lässt sich bei Hausbocklarven auch messen. Wie in Abb. 27 verdeutlicht, verloren alle Larven bei 1 % Restsauerstoff deutlich an Gewicht,

was überwiegend auf den hohen Wasserverlust zurückzuführen ist, da lediglich Wasser in so hohen Gewichtsanteilen vorhanden ist, dass sich dies so schnell und massiv im Eigengewicht widerspiegelt. Durchschnittlich verloren Larven, die 21 Tage bei 1,0 % Restsauerstoff und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit ausdauern mussten, mehr als 50 % ihres Ausgangsgewichts. Im Vergleich dazu reduzierte sich das Anfangsgewicht der Tiere unter Normalatmosphäre um weniger als 10 %. Der Gewichtsverlust der Kontrolltiere lässt sich auf den Stress der Tiere beim Umsetzen und auf den Wechsel der Nahrung zurückführen. So wurden die Tiere an der BAM in mit Zusatznahrung aufgewerteten Hölzern gezogen, während die Tiere danach in reine Holzklötzchen eingesetzt wurden. Der Wechsel der Diät und der Stress beim Umsetzen führte offensichtlich zu verringertem Körpergewicht bei Hausbocklarven, während die Behandlung mit sauerstoffreduzierter Atmosphäre zu starkem morbiden Gewichtsverlust führte. Das augenscheinliche Vertrocknen der Tiere hat also einen maßgeblichen Anteil am Behandlungserfolg. Eine weitere Verifikation dieser Annahme könnte durch Variation der relativen Luftfeuchtigkeit während der Behandlung erfolgen. Dies wurde allerdings innerhalb dieses zeitlich eingeschränkten Projektes nicht durchgeführt, da die theoretischen Grundlagen zwar wissenschaftlich interessant sind, im Museumsbetrieb aber keine größere Rolle spielen.

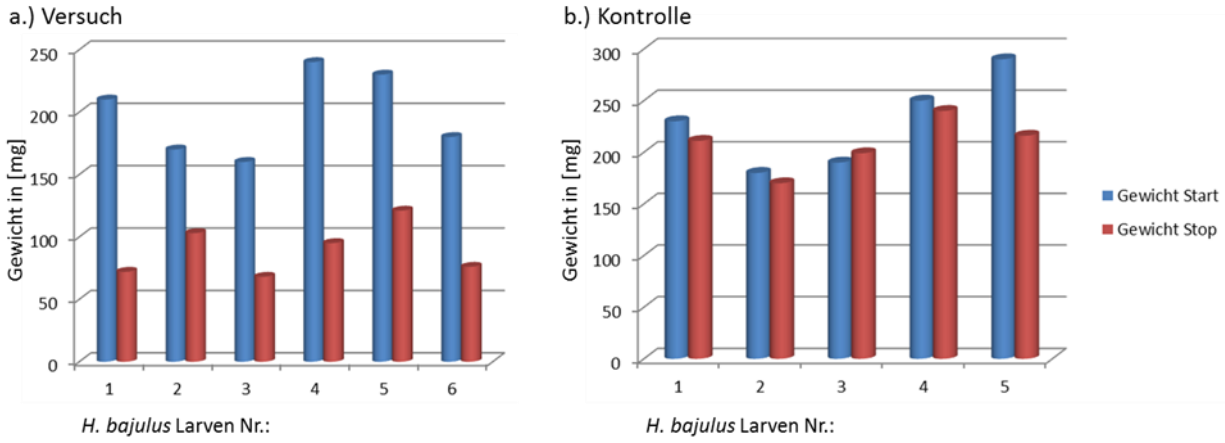


Abb. 27: a) Gewichtsveränderung von Hausbocklarven (*H. bajulus*) unter sauerstoffreduzierten Bedingungen und b) Normalatmosphäre. Jede Säule repräsentiert ein einzelnes Individuum. Blau ist dabei das Ausgangsgewicht, also das Gewicht als die Larve in die Prüfhölzchen gesetzt wurde, rot zeigt das Gewicht nach Abschluss der Stickstoffbehandlung bzw. der korrespondierenden Kontrolle in Normalatmosphäre. Versuchsbedingungen waren 1,0 % Restsauerstoff, bei 50 % rF für 21 Tage.

Einfluss des Restsauerstoffgehalts auf den Behandlungserfolg

Neben der Temperatur wurde ebenfalls der Einfluss des Restsauerstoffgehalts auf den Behandlungserfolg getestet. Niedrigere Sauerstoffkonzentrationen sollten die Behandlungsdauer weiter reduzieren, sind allerdings schwer realisierbar, während eine höhere Sauerstoffkonzentration die Behandlungsdauer mutmaßlich unnötig verlängert hätte. Möglich wäre allerdings auch, dass es einen regelrechten Schwellwert gibt, also eine Konzentration ab der es zu einem Zusammenbruch des aeroben Metabolismus kommt. In diesem Fall müsste dann nur dieser Grenzwert ermittelt werden. Alle Konzentrationen unter diesem Grenzwert sollten dann den gleichen Behandlungserfolg nach sich ziehen. Allerdings scheint die Biologie auch hier nicht ganz eindeutig zu sein. Niedrige Sauerstoffkonzentrationen müssen sich mutmaßlich nicht zwingend vorteilhaft auf den Behandlungserfolg auswirken. In der Literatur finden sich Beispiele, in denen sehr niedrige Sauerstoffkonzentrationen verlängerte Behandlungszeiten mit Stickstoffgas nach sich ziehen, wenn

mit Hilfe der Milchsäuregärung Energie erzeugt werden kann (Adler 1994a). Zusätzlich lässt sich spekulieren, dass Tiere durch den sehr niedrigen Restsauerstoffgehalt schnell sämtliche Bewegungen einstellen, während sie bei höherem Restsauerstoffgehalt versuchen, den sauerstoffarmen Bedingungen zu entkommen. Diese höhere Aktivität kann dann zu einem schnelleren Abbau aller Reservestoffe und der Ansammlung schädlicher Metaboliten führen. In diesem Projekt konnten lediglich zwei Bedingungen, die in musealen Einrichtungen in der Regel realisierbar sind, 0,5 % und 1,0 % Restsauerstoff ausreichend getestet werden. In Abb. 28 wird der Einfluss des Restsauerstoffgehalts deutlich. Dargestellt werden die Tiere, die von jeweils sechs eingesetzten Hausbocklarven (*H. bajulus*), eine 21-tägige Behandlungszeit bei der jeweils angegebenen Temperatur und der Sauerstoffkonzentration von 0,5 % oder 1,0 % Restsauerstoff überlebten. Jeder der dargestellten Balken symbolisiert folglich einen eigenständigen Versuch. Unmissverständlich zeigt sich wiederum der Einfluss der Temperatur. So konnten bei 27 °C jeweils alle eingesetzten Tiere bei jeder getesteten Sauerstoffkonzentration abgetötet werden, während bei 20 °C bei beiden Gaskonzentrationen Tiere überlebten. Anschaulich ist der Effekt unterschiedlicher Sauerstoffkonzentrationen bei 20 °C und 24 °C erkennbar, während dieser bei einer 21-tägigen Behandlung bei 27 °C nicht nachweisbar ist, da bei dieser Behandlungsdauer jeweils alle Tiere starben. Die Behandlung bei 24 °C war nur noch bei einer Restsauerstoffkonzentration von 0,5 % erfolgreich, während eine Restsauerstoffkonzentration von 1,0 % nicht mehr zu 100 % Mortalität führte und somit nicht erfolgreich war. Die Behandlung bei 20 °C war bei beiden Sauerstoffkonzentrationen nicht mehr erfolgreich, jedoch konnten bei 0,5 % bereits vier von sechs Larven abgetötet werden, während eine Behandlung mit 1,0 % Sauerstoff bei 20 °C wirkungslos war und zu keiner Mortalität führte. Offenkundig sind Hausbocklarven selbst bei diesen niedrigen Sauerstoffkonzentrationen in der Lage, ihren Stoffwechsel wenigstens partiell aerob zu betreiben. Es scheint, dass es keinen klaren Sauerstoff-Schwellwert gibt, der zum vollständigen Zusammenbruch des aeroben Metabolismus führt. Mutmaßlich können *H. bajulus*-Larven bei 1 % Restsauerstoff mehr Energie für Ihren Stoffwechsel aufbringen, als bei 0,5 %, da sie andernfalls die gleiche Mortalität aufweisen müssten. Da lediglich die Sauerstoffkonzentration zwischen den Versuchen variierte, sollte die Differenz von 0,5 % Sauerstoff für die erhöhte Überlebensrate verantwortlich sein. Sollten Folgeversuche dies bestätigen, hätte dies zur Folge, dass eine geringere Sauerstoffkonzentration immer zu kürzeren Behandlungszeiten führt. Es gibt also keine Sauerstoffgrenzkonzentration, die zum kompletten Zusammenbruch des aeroben Stoffwechsels führt, sondern lediglich eine graduelle Reduktion der Energieverfügbarkeit. Der einzige Schwellwert, der zu finden wäre, ist somit der Punkt, an dem die Sauerstoffkonzentration nicht mehr ausreicht, um den Stoffwechsel vollständig zu betreiben. Da dies aber mutmaßlich sukzessiv vonstattengeht, ist dieser Wert bei Stadien mit viel Reservestoffen oder niedrigen Stoffwechselraten nur mit hohem Zeitaufwand zu ermitteln, zumal ein hoher Zeitaufwand die Stickstoffbehandlung insgesamt nicht attraktiv darstellt. Der Effekt, dass ein höherer Restsauerstoffgehalt durch eintretendes Fluchtverhalten der Tiere die Behandlungsdauer verkürzt, kann hier zusätzlich nicht bestätigt werden. Allerdings wurden in diesem Fall Larvenstadien untersucht. Holzbohrende Larven sind an sich nicht sehr mobil und verzichten daher auf Fluchtverhalten. Ausweichbewegungen werden überwiegend von mobilen Stadien, wie frei beweglichen Larven oder Imagines ausgeführt. Im Gegensatz zu diesen, verharren Puppen oder wenig bewegliche Larven an Ort und Stelle und zehren von ihren Reservestoffen. Ein Nachweis dieses mutmaßlichen Effektes muss also über andere Arten und Stadien erfolgen. Allerdings kann bisher kein Indiz in den durchgeführten Experimenten hierfür gefunden werden (siehe Tabelle 1).

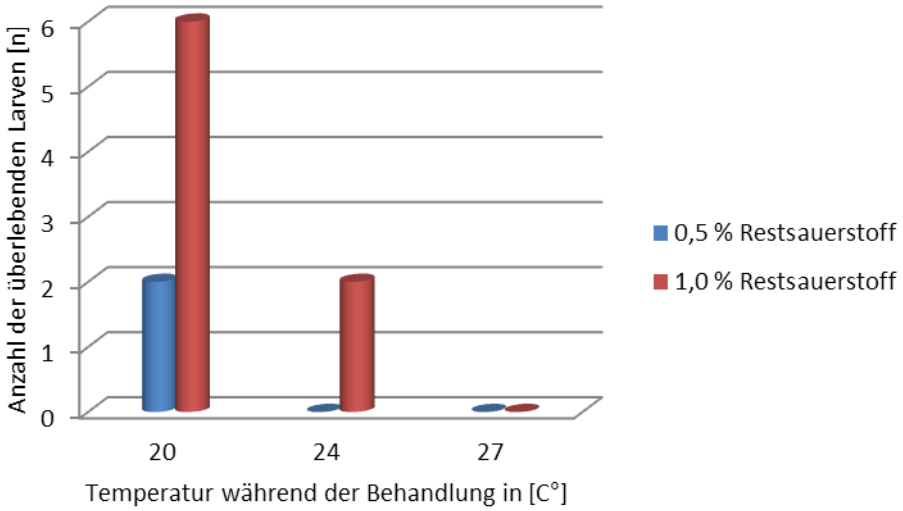


Abb. 28: Einfluss des Restsauerstoffgehalts auf die Überlebensrate von *H. bajulus*-Larven bei der Stickstoffbegasung. Je 6 *H. bajulus*-Larven (n = 6) wurden für 21 Tage und 50 % RH bei den angegebenen Temperatur und Restsauerstoffbedingungen (0,5 % O2 – blau; 1,0 % O2 – rot) gehältert. Dargestellt werden die Larven, die Stickstoffbegasung überlebt haben. Anschaulich zeigt sich hier der Einfluss von lediglich 0,5 % Unterschied über die Behandlungsdauer auf den Behandlungserfolg.

5. Schlussfolgerungen

In einer Zusammenfassung der Ergebnisse aus allen durchgeführten Versuchen lassen sich hinsichtlich einer Behandlungsdauer von 21 Tagen einige tolerante Arten aufzeigen, die in Tabelle 2 wiedergegeben sind.

Hingegen ist eine abgesicherte Wirksamkeit der anoxischen Behandlung gegen Schädlingsbefall an Museumsobjekten für alle untersuchten Arten über 21 Tage bei 0,5 % Restsauerstoffgehalt sowie mindestens 24 °C und bei 50 % rF gegeben.

Ein erfolgreicher Einsatz der UWB-Sensorik beim Aufspüren von Schadinsekten in Museumsobjekten ist stark von der Art und Häufigkeit von Körperbewegungen der Individuen abhängig. Mit dem entwickelten Radarsystem lassen sich Insektenarten detektieren, deren Larven und Imagines sich regelmäßig in Materialzwischenräumen bewegen, wie es für Termiten spezifisch ist. Einzeltiere anderer Insektenarten, die sich eingenagt im Substrat kaum fortbewegen, können damit nicht sicher erfasst werden.

Tabelle 2: Tolerante Arten bei einer Behandlungsdauer von 21 Tagen und 50 % rF

Temperatur	Restsauerstoffgehalt	
	1,0 %	0,5 %
20 °C	*Anobium punctatum* *Anthrenocerus australis* *Hylotrupes bajulus* *Kalotermes flavicollis* *Lyctus brunneus* *Mezium affine* *Sitophilus granarius* *Sitophilus zeamais* *Thermobia domestica* *Trogoderma parabile* *Thermobia domestica*	*Anthrenocerus australis* *Hylotrupes bajulus* *Mezium affine* *Sitophilus granarius* *Sitophilus zeamais* *Trogoderma parabile*
24 °C	*Hylotrupes bajulus* *Lasioderma serricorne* *Mezium affine* *Trogoderma parabile*	keine
27 °C	keine	keine

6. Veröffentlichungen

Inhalte und Ergebnisse des Forschungsprojekts konnten bisher auf folgenden Konferenzen und bei Veranstaltungen in Vorträgen und Posterpräsentationen veröffentlicht werden:

- 1. SPK-Forschungsworkshop, Berlin 2015 (Vortrag und Poster)
- 2. SPK-Forschungsworkshop, Berlin 2016 (Vortrag und Poster)
- 3rd International IPM Conference, Paris 2016 (Vortrag und Poster)
- Konservierungswissenschaft im Dialog, Berlin 2017 (Vortrag)

Literaturverzeichnis

Adler C (1993) Zur Wirkung modifizierter Atmosphären auf Vorratsschädlinge in Getreide am Beispiel des Kornkäfers *Sitophilus granarius* (L.) (Col., Curculionidae). (Effects of modified atmospheres on stored product pests in grain as represented by the granary weevil *Sitophilus granarius* (L.) (Col.: Curculionidae)). Ph.D. Thesis, Dept. of Biology, Freie Universität Berlin, ISBN 3-86111-401-1, Shaker Verlag Aachen, 146 pp.

Adler C (1994a): Carbon dioxide - more rapidly impairing the glycolytic energy production than nitrogen? Proceedings of the 6th International Working Conference on stored Product Protection, Canberra, 7-10.

Adler C (1994b): A comparison of the efficacy of N2 and CO2 fumigations against the granary weevil Sitophilus granarius (L.) (Coleoptera: Curculionidae). In: Highley E, Wright E J, Banks H J and Champ B R (Eds.), Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-Product Protection, Canberra, 11-15.

Bergh J-E, Stengard Hansen L, Vagn Jensen K-M, Nielsen P V (2003): The effect of anoxic treatment on the larvae of six species of dermestids (Coleoptera). J. Appl. Ent. 127, 317-321.

Biebl S, Lang U (2014): Treatment of wood boring beetles in oxygen free atmospheres. In: Müller G, Pospischil R, William H Robinson W H (eds.) Proceedings of the Eighth International Conference on Urban Pests, Zürich, 324-327.

Frank A (1991): Möglichkeiten einer biozidfreien Bekämpfung *von Lyctus brunneus* – (Steph.) und anderer materialzerstörender Käfer in Kunstwerken – Einfluß inerter Gase auf Entwicklung und Überleben. Diplomarbeit, Freie Universität Berlin, Fachbereich Biologie, 113 pp.

Gialdi E, Ratto L (2002): The SAVE ART project and its outcome: VELOXY®. Cultural Heritage Research: a pan-European Challenge, 207-209.

Gilberg M (1989): Inert atmospheres for the fumigation of museum objects. Studies in Conservation 34, 80-84.

Gilberg M (1991): The effects of low oxygen atmospheres on museum pests. Studies in Conservation 36, 93-98.

Gunn M (2008): Désinsectiser les collections. La Lettre de l'OCIM 115, 15-22.

Petty J A (1973): Diffusion of Non-Swelling Gases through Dry Conifer Wood. Wood Science and Technology 7, 297-307.

Reichmuth C, Unger A, Unger W, Blasum G, Piening H, Rohde-Hehr P, Plarre R, Pöschko M, Wudtke A (1993): Nitrogen-flow fumigation for the preservation of wood, textiles and other organic material from insect damage. In: Navarro S, Donahaye E (eds.), Proceedings of the International Conference of Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages. Winnipeg, 121-128.

Rust M K, Kennedy J M (1993): The Feasibility of Using Modified Atmospheres to Control Insect Pests in Museums. Getty Conservation Institute, Marina del Rey, California.

Sachs J, Helbig M, Renhak K (2008): Unsichtbares wird sichtbar – Mit Radar den Insekten auf der Spur. Dokumentation zum Kongress des Deutschen Holz- und Bautenschutzverbandes in Kooperation mit der WTA 30. und 31. Oktober 2008, Landschaftspark Duisburg-Nord. Hrsg.: Deutscher Holz- und Bautenschutzverband e.V., Köln, 45-48.

Selwitz C, Maekawa S (1998) Inert Gases in the Control of Museum Insect Pests. Getty Conservation Institute.

Sorz J, Hietz P (2006): Gas diffusion through wood: implications for oxygen supply. Trees 20, 34-41.

Valentin N (1990): Insect eradication in museums and archives by oxygen replacement, a pilot project. In: Proceedings of the ICOM Committee for Conservation. 9th triennial meeting, Dresden, 26-31 August 1990, Vol. II, 821-823.

Valentin N (1991): Controlled Atmosphere for Insect Eradication in Library and Museum Collections. International Seminar on Research in Preservation and Conservation. Arden House, 13 pp.

Valentin N (1993): Comparative analysis of insect control by nitrogen, argon and carbon dioxide in museum, archive and herbarium collections. International Biodeterioration and Biodegradation 32, 263-278.

Anhang

Tabelle 3: Zusammenfassung publizierter Daten zur Wirksamkeit anoxischer Behandlungen

Artname	Stadien	O_2 (%)	T (°C)	rF (%)	Zeit (d)	Mortalität (%)	Quelle
Anobium punctatum	alle	0,9	30	35	10	100	Valentin 1990
Anobium punctatum	alle	0,05	20	40	7	100	Valentin 1991
Anobium punctatum	alle	0,05	30	40	5	100	Valentin 1991
Anobium punctatum	alle	0,03	20	40	7	100	Valentin 1993
Anobium punctatum	alle	0,03	30	40	5	100	Valentin 1993
Anobium punctatum	Larven	0	16	?	35	95	Reichmuth et al. 1993
Anobium punctatum	Larven	0	20	?	30	95	Frank 1991
Anobium punctatum	Larven	< 1	23	51	43	100	Biebl und Lang 2014
Anobium punctatum	Eier	< 1	22	51	12	100	Biebl und Lang 2014
Anthrenus flavipes	alle	0,1	25,5	55	2	100	Rust und Kennedy 1993
Anthrenus museorum	Larven	0,3	25	55	1	100	Bergh 2003
Anthrenus verbasci	Larven	0,3	25	55	2	100	Bergh 2003
Anthrenus vorax	alle	0,4	30	70	21	100	Gilberg 1991
Attagenus smirnovi	Larven	0,3	25	55	3	100	Bergh 2003
Attagenus woodroffei	Larven	0,3	25	55	2	50	Bergh 2003
Attagenus unicolor	alle	0,03	20	40	4	100	Valentin 1993
Attagenus unicolor	alle	0,03	30	40	3	100	Valentin 1993
Dermestes lardarius	alle	0,1	25,5	55	2	100	Rust und Kennedy 1993
Hylotrupes bajulus	alle	0,05	20	40	20	100	Valentin 1991
Hylotrupes bajulus	alle	0,05	30	40	10	100	Valentin 1991
Hylotrupes bajulus	alle	0,03	20	50	14-20	100	Valentin 1993
Hylotrupes bajulus	alle	0,03	30	50	7	100	Valentin 1993
Hylotrupes bajulus	alle	0,03	20	40	20	100	Valentin 1993
Hylotrupes bajulus	alle	0,03	30	40	10	100	Valentin 1993
Hylotrupes bajulus	Larven	0,05	25	50	14	100	Gunn 2008
Hylotrupes bajulus	?	0,2	25	?	21	100	Gialdi und Ratto 2002
Hylotrupes bajulus	?	0,2	20	?	35	100	Gialdi und Ratto 2002
Hylotrupes bajulus	Larven	< 0,1	23	51	43	100	Biebl und Lang 2014
Incisitermes minor	Nymphen	0,1	25,5	55	3	100	Rust und Kennedy 1993

Lasioderma serricorne	alle	0,1	25,5	55	8	100	Rust und Kennedy 1993
Lasioderma serricorne	alle	0,03	20	40	9	100	Valentin 1993
Lasioderma serricorne	alle	0,03	30	40	6	100	Valentin 1993
Lasioderma serricorne	alle	0,03	40	35	14	100	Valentin 1993
Lasioderma serricorne	alle	0,4	30	70	21	100	Gilberg 1991
Lasioderma serricorne	alle	0,42	30	65-70	7-21	100	Gilberg 1989
Lyctus brunneus	alle	0	20	?	22	95	Frank 1991
Lyctus brunneus	alle	0	25	?	19	95	Frank 1991
Lyctus brunneus	alle	0	28	?	12	95	Frank 1991
Lyctus brunneus	Larven	0	20	?	22	95	Frank 1991
Lyctus brunneus	Larven	0	28	?	12	95	Frank 1991
Lyctus brunneus	Adulte	0	28	?	1,4	95	Frank 1991
Lyctus brunneus	Larven	< 1	23	51	43	100	Biebl und Lang 2014
Lyctus brunneus	Eier	< 1	22	51	11	100	Biebl und Lang 2014
Lyctus spp.	alle	0,1	25,5	55	5	100	Rust und Kennedy 1993
Nicobium castaneum	alle	0,03	20	40	6	100	Valentin 1993
Nicobium castaneum	alle	0,03	30	40	4	100	Valentin 1993
Reesa vespulae	Larven	0,3	25	55	2	96	Bergh 2003
Sitophilus granarius	alle	1	20	75	28,8	99	Adler 1993
Stegobium paniceum	alle	0,4	30	70	21	100	Gilberg 1991
Stegobium paniceum	alle	0,03	20	40	6	100	Valentin 1993
Stegobium paniceum	alle	0,03	30	30	4	100	Valentin 1993
Thermobia domestica	alle	0,1	25,5	55	2	100	Rust und Kennedy 1993
Tineola bisselliella	alle	0,4	30	60	21	100	Gilberg 1991
Tineola bisselliella	alle	0,1	25,5	55	2	100	Rust und Kennedy 1993
Tribolium confusum	alle	0,1	25,5	55	3	100	Rust und Kennedy 1993
Trogoderma angustum	Larven	0,3	25	55	3	100	Bergh 2003
Trogoderma inclusum	alle	0,1	25,5	55	5	100	Rust und Kennedy 1993
Xestobium rufovillosum	alle	0,03	20	40	7	100	Valentin 1993
Xestobium rufovillosum	alle	0,03	30	40	5	100	Valentin 1993