

Benthien, Jan; Gäckler, Susanne; Ohlmeyer, Martin

Research Report

Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen

Thünen Report, No. 74

Provided in Cooperation with:

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries

Suggested Citation: Benthien, Jan; Gäckler, Susanne; Ohlmeyer, Martin (2019) : Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen, Thünen Report, No. 74, ISBN 978-3-86576-200-9, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig,
<https://doi.org/10.3220/REP1575877850000>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/209663>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen

Jan T. Benthien, Susanne Gäckler, Martin Ohlmeyer

Thünen Report 74

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.thuenen.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Benthien JT, Gäckler S, Ohlmeyer M (2019) Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 138 p, Thünen Rep 74, DOI: 10.3220/REP1575877850000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



THÜNEN

Thünen Report 74

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-report@thuenen.de
www.thuenen.de

ISSN 2196-2324

ISBN 978-3-86576-204-7

DOI: 10.3220/REP1575877850000

urn:nbn:de:gbv:253-201912-dn061749-1

Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen

Jan T. Benthien, Susanne Gäckler, Martin Ohlmeyer

Thünen Report 74

VERANTWORTLICHE AUTOREN:

Jan T. Benthien und Martin Ohlmeyer
Thünen-Institut für Holzforschung
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg
Telefon: +49 40 73962 -652, -635
Fax: +49 40 73962 -699
Email: jan.benthien@thuenen.de, martin.ohlmeyer@thuenen.de

Susanne Gäckler
DLG TestService GmbH
Max-Exth-Weg 1
64823 Groß-Umstadt
Telefon: +49 69 24788 -638
Fax: +49 69 24788 -690
Email: s.gaeckler@dlg.org

Thünen Report 74

Braunschweig/Deutschland, Dezember 2019

Schlussbericht

„Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen“ – „PferdeTritt“

[Development of a method for determining the kick resistance of horse stable infill planks and development of alternatives to currently used infill plank materials - HorseKick]

Förderkennzeichen

28RZ3023

Laufzeit

1. August 2015 bis 31. August 2018



rentenbank

Die Förderung erfolgte aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank

Vorwort

Beim vorliegenden Dokument handelt es sich um den Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

„Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen“,

das unter dem Kurztitel „**PferdeTritt**“ und Förderkennzeichen 28RZ3023 vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin/Bonn, über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bonn, aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank im Zeitraum vom 1. August 2015 bis 31. August 2018 gefördert wurde.

Das Forschungsvorhaben war eine Zusammenarbeit des Thünen-Instituts für Holzforschung, Hamburg, mit der Röwer & Rüb GmbH, Thedinghausen, und der KS Schlüter Im- & Export GmbH, Riede. In enger Kooperation war die DLG TestService GmbH, Groß-Umstadt, als Unterauftragnehmer am Verbundvorhaben beteiligt. Im Unterauftrag wurden weitere Leistungen vom Fraunhofer-Institut für Holzforschung – Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Braunschweig, eingebracht. Über Materiallieferungen wurde das Projekt von der Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, Creuzburg, unterstützt. Maßgeblich zum Gelingen des Projektes hat das Gestüt Samarra Shagya Arab Stud, Rotenburg an der Fulda, beigetragen.

Danksagung

Für die Mitarbeit und Unterstützung an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön

- Herrn Rüdiger Deckert, Röwer & Rüb GmbH
- Herrn Dirk Schlüter und Herrn Heinrich Kahle, KS Schlüter Im- & Export GmbH
- Herrn Jürgen Katzameyer, Herrn Steffen Schudt und Herrn Bernd Appel, DLG TestService GmbH
- Frau Klaudia und Herrn Ahmed Al Samarraie, Samarra Shagya Arab Stud
- Herrn Prof. Dr. Andreas Krause, Herrn Nick Engehausen und Herrn Dennis Möck, Universität Hamburg, Institut für Holzwissenschaften, Hamburg
- Herrn M.Sc. Sascha Bicke, Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Göttingen
- Herrn Dr. Markus Hauptmann, Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG
- Herrn Klaus Böckmann, Böckmann Fahrzeugwerke GmbH, Lastrup, bzw. Böckmann Pferde GmbH, Lastrup
- Herrn Dr. Dirk Berthold, Fraunhofer-Institut für Holzforschung
- Frau Dörte Bielenberg, Frau Sabrina Heldner, Frau Bettina Steffen und Frau Stefanie Warsaw, Thünen-Institut für Holzforschung, sowie Frau Christina Waitkus, Fachinformationszentrum des Thünen-Instituts

Kurzzusammenfassung

Pferde werden in Deutschland überwiegend in Einzelboxen gehalten. Die Umstände der Haltung haben den Anforderungen des Tierschutzgesetzes (TierSchG) zu entsprechen. Wie diese Anforderungen zu verstehen sind, ist in den „Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutz Gesichtspunkten“ präzisiert. Hiernach müssen Boxenabtrennungen u. a. so ausgeführt werden, dass keinesfalls ein Einklemmen der Hufe möglich ist; Trennwände müssen durchtrittfest sein. Diese Forderungen sind grundsätzlich opportun und in der Sache als richtig zu bewerten, jedoch zu unkonkret, als dass sie in der Praxis direkt umgesetzt werden könnten. Grund für das Fehlen konkreter Gestaltungsempfehlungen sind fehlende Informationen über die Energie, die beim Auskeilen von Pferden wirkt, sowie fehlende Methoden, mit denen die Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit von Stallbohlen berechnet und praktisch überprüft werden kann. In der Praxis reagieren die Stallbauer auf diese Unsicherheiten, indem sie Bambusbohlen mit hohen Phenolharzanteilen oder traditionell bewährte Tropenhölzer aus Übersee verwenden. Dies ist jedoch keine nachhaltige Lösung, da die öffentliche Meinung zur Verwendung von Tropenholz kontrovers ist und der kurzfristige Bezug von Bambusbohlen in verlässlicher Qualität eine Herausforderung darstellt. Eine Erprobung aussichtsreicher, regional verfügbarer Alternativmaterialien *in situ* verbietet sich aufgrund des Verletzungsrisikos der Tiere. Ziel des Vorhabens war es daher, die beim Auskeilen von Pferden wirksam werdenden Energie zu bestimmen, eine Methode zur Berechnung von Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit von Stallbohlen zu entwickeln und heimische Hölzer sowie verschiedene Werkstoffe auf ihre Tauglichkeit für den Stallbau zu untersuchen. In einem ersten Schritt wurde die beim Auskeilen von Pferden wirksam werdende Energie bestimmt. So wurde die Grundlage für die Entwicklung einer Methode zur Berechnung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit geschaffen. Für die Validierung der Berechnungsergebnisse wurde ein Pendelschlagwerk gestaltet und entsprechend dimensionierte Stallbohlen getestet. Neben Stallbohlen aus etablierten Materialien wurden auch solche aus heimischen Hölzern sowie aussichtsreich erscheinenden Holzwerkstoffen (Furnierschichtholz und Scrimber) untersucht. Im Rahmen der Trittversuche im Gestüt Samarra in Rotenburg an der Fulda wurde ein statistisch abgesicherter Wert von 70,4 Joule als typische Trittenenergie bestimmt. Unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages (Faktor 1,5) ist für die Bemessung somit ein Wert von 106 Joule zu veranschlagen. Mit Hilfe der entwickelten Berechnungsmethode wurde festgestellt, dass ein Pferd in einer herkömmlich gestalteten Box aus Eiche, Bongossi oder Bambus sicher untergebracht ist. Aber auch die heimische Buche erfüllt die erforderlichen Festigkeitseigenschaften. Auf Basis der erzielten Projektergebnisse lassen sich die Abmessungen von Stallbohlen so festlegen, dass sie für den Bau sicherer Pferdeboxen geeignet sind. Weiterhin ist es nun möglich, neuartige Holzwerkstoffbohlen für den Stallbau zu entwickeln und die Abmessungen von Stallbohlen ressourcenschonend zu optimieren.

Schlüsselwörter

Pferdebox, Trittenenergie, Durchtrittbeständig, Einklemmsicher

Abstract

In Germany, horses are mainly kept in individual stalls. The circumstances under which the horses are kept must comply with the requirements of the Animal Protection Law (TierSchG). An exact explanation of the requirements is specified in the "Guidelines for the Evaluation of Horse Keeping under Animal Protection Aspects." The requirements state that stall partitions must be designed, among other things, in such a way that the hooves cannot be trapped under any circumstances and the partitions have to be kick-resistant. These requirements are in principle correct and should be assessed as appropriate in intent, but are too vague for direct practical implementation. The reason for the lack of concrete design recommendations is a lack of information about the energy that is effectively released when horses kick. Also, a lack of methods with which the kick-resistance and entrapment-safety of stable planks can be calculated and tested in practice is apparent. In practice, stable-builders react to this uncertainty by using bamboo planks with high phenolic resin content or traditionally proven tropical woods from overseas. This, however, is not a sustainable solution as public opinion on the use of tropical wood is controversial and the short-term purchase of reliable quality bamboo planks is a challenge. The testing of promising, regionally available alternative materials *in situ* is not practical due to the risk of injury to the animals. The aim of the project was therefore to determine the effective energy when horses kick, to develop a method for calculating the kick-resistance and entrapment-safety of stable planks, and to test the suitability of local wood species and various materials for stable construction. In a first step, the effective kick energy was determined. Thus the basis for the development of a method for the calculation of the kick-resistance and entrapment-safety was created. A pendulum impact tester was designed for the validation of the calculation results and appropriately dimensioned stable planks were tested. In addition to stable planks made of established materials, those made of local wood species as well as promising wood-based materials (laminated veneer timber and scrimber) were also tested. In the course of the kick tests at the Samarra stud farm in *Rotenburg an der Fulda*, a statistically verified value of 70.4 joules was determined as the typical kick energy. Taking into account a safety margin (factor 1.5), a value of 106 joules is to be estimated for the design. Using the calculation method developed, it was established that a horse is safely accommodated in a conventionally designed box made of oak, azobé or bamboo. But the local wood species beech also fulfils the required strength properties. On the basis of the project results achieved, the dimensions of stable planks can be determined in such a way that they are suitable for the construction of safe horse boxes. Furthermore, it is now possible to develop new types of wood-based planks for stable construction and to optimize the dimensions of stable planks in a resource-saving way.

Keywords

internal horse stables, kick energy, kick-resistance, entrapment-safety

Inhaltsverzeichnis

1	Übersicht	1
1.1	Aufgabenstellung und Lösungsansatz	1
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	4
1.4.1	Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden	4
1.4.2	Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2	Eingehende Darstellung	7
2.1	Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Last.....	7
2.1.1	Eigene Experimente	8
2.1.2	Exkurs: Bestimmung der Trittlast auf Basis von Messdaten aus der Literatur	15
2.1.3	Diskussion der Ergebnisse der Trittlastbestimmung und Trittlastneuberechnung	22
2.1.4	Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen	24
2.2	Buchen-Scrimber-Bohlen.....	25
2.2.1	Herstellung	25
2.2.2	Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen	25
2.3	Bestimmung der Materialkennwerte	25
2.3.1	Einrichtung von Prüfvorrichtungen	25
2.3.2	Materialien	27
2.3.3	Materialkennwerte	29
2.3.4	Prüfkörperabmessungen	30
2.3.5	Bestimmungsmethoden	30
2.3.6	Statistische Datenanalyse	32
2.3.7	Rohdichte	33
2.3.8	Statische Biegeeigenschaften.....	34
2.3.9	Dynamische Biegeeigenschaften.....	40

2.3.10	Vergleich von statischen und dynamischen Biegeeigenschaften	55
2.3.11	Diskussion der Ergebnisse	58
2.3.12	Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen.....	60
2.4	Dimensionierung von Stallbohlen.....	60
2.4.1	Ansatz.....	60
2.4.2	Vorgehen bei der Berechnung	62
2.4.3	Bauteilabmessungen	65
2.4.4	Einwirkung.....	65
2.4.5	Beanspruchung der Einwirkung: Biegespannung.....	66
2.4.6	Auswirkung der Einwirkung: Durchbiegung	67
2.4.7	Maximale Beanspruchbarkeit (Biegespannung).....	67
2.4.8	Maximal tolerierbarer Nennwert der Durchbiegung	67
2.4.9	Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit	67
2.4.10	Prüfung auf Einklemmsicherheit	68
2.4.11	Beispielhafte Berechnung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit für Stallbohlen aus Bongossi	68
2.4.12	Berechnung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit von Stallbohlen aus ausgesuchten Hölzern.....	72
2.4.13	Diskussion der Berechnungsergebnisse	89
2.4.14	Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen.....	92
2.5	Verifizierung der Methode zur Dimensionierung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen: Schlagversuche mit künstlichem Huf	92
2.5.1	Prüfvorrichtung	92
2.5.2	Versuchsaufbau.....	94
2.5.3	Ergebnisse	96
2.5.4	Diskussion.....	98
2.5.5	Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen	98
2.6	Alternative Hölzer.....	98
2.6.1	Gründe für die Suche nach Alternativen, Vorschläge für Alternativen, Informationen zur Robinie	98
2.6.2	Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen	101
2.7	Ansätze zur Entwicklung energieabsorbierender oder flexibler Stallbohlen.....	101
2.7.1	Hintergründe, Ideen, Diskussion	101
2.7.2	Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen	103

3	Diskussion der Projektergebnisse	104
3.1	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	104
3.2	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	105
3.3	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	105
3.4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	105
4	Zusammenfassung	107
	Quellenverzeichnis	109
	Abbildungsverzeichnis	112
	Tabellenverzeichnis	114

1 Übersicht

1.1 Aufgabenstellung und Lösungsansatz

Aufgabe des mit dem vorliegenden Bericht dokumentierten Forschungsprojektes war es, die Grundlagen zu erarbeiten, auf deren Basis die Beständigkeit von Stallbohlen gegen Pferdetritte beurteilt bzw. durchtrittbeständige Stallbohlen – insbesondere aus alternativen Materialien – hergestellt werden können. Experimentell wurde hierfür zunächst die zu erwartende Last ermittelt, der Stallbohlen im Fall eines Trittes widerstehen müssen. Mit dem Ziel einer möglichst realitätsnahen Dimensionierung bzw. Überprüfung aktueller Abmessungen von Stallbohlen, wurden die relevanten Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften gängiger und aussichtsreich erscheinender Materialien als Ergänzung zu Literaturangaben an u.a. Proben praxisnaher Abmessungen bestimmt. Für das hierfür angepasste Pendelschlagwerk wurde darüberhinaus ein Hammer mit künstlichem Huf als Pinne angefertigt, mit dem die Beständigkeit entsprechend dimensionierter Stallbohlen überprüft werden kann. Ergänzend zu Massivhölzern heimischen Ursprungs wurden weiter die Holzwerkstoffe „BauBuche Paneel“ (Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG) und Buchen-Scrimber auf ihr Potenzial für den Einsatz als Stallbohlenholz untersucht. Buchen-Scrimber wurde allein für diese Untersuchung auf einer Laboranlage hergestellt. Neben der Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung wurde im Laufe des Projektes die Beständigkeit gegen biologische Zersetzung als weitere Anforderung an Stallbohlen formuliert und im Rahmen einer separaten Abhandlung (Benthien et al. 2018) betrachtet. Das Projekt hatte abschließend zur Aufgabe, Ansätze zur Entwicklung energieabsorbierenden oder flexiblen Stallbohlen zu erarbeiten.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Kontext der Tierhaltung schreibt das Tierschutzgesetz (TierSchG), neben der angemessenen Ernährung und Pflege, der artgemäßen Bewegung sowie der Qualifikation des Halters oder Betreuers, eine verhaltensgerechte Unterbringung vor (TierSchG, 2. Abschnitt, §2, 2006). Als Orientierungs- und Auslegungshilfe dieser Rechtsvorschrift hat das zuständige Bundesministerium 2009 „Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutzgesichtspunkten“ (BMELV 2009) herausgegeben. Demnach sind Boxenabtrennungen so auszuführen, dass keinesfalls ein Einklemmen der Hufe möglich ist. Weiter heißt es, dass Trennwände durchtrittfest sein müssen. Diese Forderung ist grundsätzlich opportun und in der Sache als richtig zu bewerten, jedoch zu unkonkret, als dass sie in der Praxis direkt umgesetzt werden könnte. Weder ein konkreter Wert für die zu erwartende Last (Pferdetritt), noch eine vollständige Angabe der erforderlichen Stallbohlenabmessungen werden angegeben. Die alleinige Information eines Orientierungsmaßes (4 cm) für die Dicke von Bohlen aus Eiche ist zur Zielerreichung ungenügend, da auch die Bohlen-

länge und -breite entscheidend die aus der Einwirkung resultierende Biegespannung und Durchbiegung bestimmen. In der einschlägigen Fachliteratur (z.B. Hoffmann 2009 und Steinmetz und Fuchs 2012) werden die Forderungen nach Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit lediglich rezipiert, ohne jedoch Hilfestellung für die Umsetzung zu geben.

Versuche zur Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Last wurden von v. Wachenfelt et al. (2011, 2013) sowie Gäckler (2012) und Schattner (2012) durchgeführt. Nähere Ausführungen hierzu sind in Kapitel 1.4.1 und Kapitel 2.1.2 zu finden.

Experimente, bei denen das Auskeilen eines Pferdes mit Hilfe einer Vorrichtung simuliert wird, wurden von

- v. Wachenfelt et al. (2011) mit einer Fallgewichtsanlage durchgeführt, um die Sicherheit von Aufsatzgittern in Pferdeboxen zu testen,
- der DLG TestService GmbH in Form von Kugelschlagtests durchgeführt, um die Auswirkungen von Tritten gegen Stalleinrichtungsgegenstände abschätzen zu können (Glaser 2012),
- Maikowski (2011) und Benthien et al. (2012) unter Verwendung der oben genannten Fallgewichtsanlage zur Untersuchung der Trittfestigkeit von Stallbohlen durchgeführt und
- dem Hersteller für Pferdesportsysteme Röwer & Rüb GmbH im Vorfeld des Projektes mit einem Schlagpendel durchgeführt, um die Trittfestigkeit verschiedener Materialien abzuschätzen.

Weiter wurden Trittsimulationen im Zuge der oben erwähnten Versuche zur Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Belastung zur Kalibrierung der Messvorrichtung genutzt. V. Wachenfelt et al. (2011, 2013) verwendeten hierfür die bereits genannt Fallgewichtsanlage, Gäckler (2012) und Schattner (2012) ein Pendelschlagwerk, bei dem die Pinne des Pendelhammers als künstlicher Huf ausgeführt ist.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Arbeiten lassen sich in sieben Themenblöcke aufteilen:

- (1) Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Energie
 - Bau einer Prüfvorrichtung
 - Messung der Trittenergie
- (2) Herstellung oder Beschaffung von besonders schlagzähen Holzwerkstoffbohlen
 - Scrimber: Herstellung durch Fraunhofer-Institut für Holzforschung
 - BauBuche: Bereitstellung durch Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG
- (3) Beschaffung und/ oder vergleichende Bestimmung der relevanten Eigenschaftskennwerte gängiger und aussichtsreicher Materialien zur Herstellung von Stallbohlen
 - Bau bzw. Umbau von Prüfvorrichtungen
 - Recherche von Kennwerten
 - Vergleichende Bestimmung von Kennwerten auf Basis verschiedener Methoden
- (4) Beispielhafte Dimensionierung von Stallbohlen
- (5) Erarbeitung von Vorschlägen zur Konstruktion funktionsoptimierter Verbundwerkstoffe (energieabsorbierend/ flexibel)
- (6) Prüfung der Durchtrittbeständigkeit von Stallbohlen
 - Bau einer Prüfvorrichtung
 - Prüfung von Stallbohlen
- (7) Veröffentlichung der Projektergebnisse

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

1.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden

Bestimmung der Trittenenergie

Erste Versuche zur Bestimmung der beim Auskeilen auf Stallbohlen wirksam werdenden Last führten v. Wachenfelt et al. (2011) an einer mit Kraftsensoren ausgestatteten Schlagplatte durch. Dabei wurde eine maximale Schlagkraft von 8.722 N ermittelt. In Kombination mit der Schlagdauer wurde ein Impuls von 131 Ns berechnet. Hieraus wurde eine Schlagenergie von 300 bis 400 J abgeleitet. Im Rahmen einer späteren Dateninterpretation (v. Wachenfelt et al. 2013) wurde die Schlagenergie auf bis zu 750 J geschätzt.

Mit einem ähnlichen Versuchsaufbau bestimmten Gäckler (2012) und Schattner (2012) die „Trittkraft“ des Pferdes auf einen Wert von 1.980 kg (entspricht ca. 19,8 kN). Hierbei wurden die durch das Heranführen eines Hengstes provozierten Tritte in einem Bereich zwischen 35 und 109 cm über dem Boden registriert.

Die von v. Wachenfelt et al. (2011, 2013) sowie Gäckler (2012) und Schattner (2012) durchgeführten Versuche fanden für die Durchführung des vorliegend beschriebenen Vorhabens eingehende Beachtung.

Schlagzähe Holzwerkstoffbohlen

Für den Bau von Pferdeboxen haben sich seit einiger Zeit Werkstoffbohlen aus Bambus etabliert. Als Gründe hierfür sind geringe feuchtebedingten Dimensionsänderungen (Quellen und Schwinden) sowie gute Erfahrungen im Bezug auf die Festigkeitseigenschaften anzunehmen.

Der Holzwerkstoff BauBuche wird vom Hersteller damit beworben, dass aufgrund dessen hoher Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften schlankere Bauteile als bei Ausführung mit herkömmlichen Holzbauträgern realisiert werden können. Anders als herkömmliche Brett- oder Furnierschichtholzträger wird BauBuche aus dem schweren, heimischen Laubholz Buche hergestellt und könnte somit eine geeignete Alternative für Stallbohlen aus Tropenholz darstellen.

Der derzeit nicht kommerziell hergestellte Holzwerkstoff Scrimber hat eine große Ähnlichkeit zu Bambus-Werkstoffbohlen, unterscheidet sich hierzu aber dadurch, dass zu seiner Herstellung heimisches Holz und nicht Bambus aus Fernost eingesetzt wird. Insbesondere beim Einsatz schwerer Laubhölzer für die Herstellung von Stallbohlen könnte Scrimber somit eine geeignete Alternative zur Herstellung von Stallbohlen sein. Erfahrungen zur Herstellung von Scrimber liegen derzeit am Fraunhofer-Institut für Holzforschung vor (Berthold 2014).

Neben gängigen Stallbauhölzern und hierzu alternativen Holzarten nicht-tropischen Ursprungs wurden im Projekt Stallbohlen aus den eben aufgeführten Holzwerkstoffen (Bambus, BauBuche und Scrimber) untersucht.

Beschaffung und/ oder Bestimmung der Eigenschaftskennwerte

Die Schlagzähigkeit von Holz wird über den Kennwert der Bruchschlagarbeit charakterisiert. Bestimmt wird die Bruchschlagarbeit in Anlehnung an DIN 52189-1:1981-12 mit Hilfe eines Schlagpendelwerkes. Die Prüfkörperabmessungen betragen 300 x 20 x 20 mm³ (Auflagerabstand 240 mm). Nach dem Grundprinzip dieser Methode wurden im Projekt zahlreiche Versuche durchgeführt.

Der als Unterauftragnehmer eingebundene Partner DLG TestService GmbH verfügt über ein großformatiges Pendelschlagwerk, mit dem die Effekte des Auskeilens von Pferden reproduziert werden sollten. Dieses Schlagpendel wurde nach einem Umbau zur Bestimmung materialspezifischer Kennwerte an großformatigen Prüfkörpern eingesetzt.

Materialspezifische Kennwerte von Hölzern sind in der Fachliteratur zu finden und wurden als Referenzwerte herangezogen. Eine übersichtliche Zusammenstellung einer Vielzahl von Eigenschaften verschiedener Hölzer ist in Sell (1997) oder Gérard et al. (2011) zu finden.

Simulation eines Pferdetrtritts, Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit und Dimensionierung von Stallbohlen

Im Projekt wurde an das Vorgehen von Gäckler (2012) und Schattner (2012) zur Simulation von Pferdetrritten mittels eines Pendelschlagwerkes angeknüpft, wobei zuvor umfangreiche Anpassungen vorgenommen wurden.

In Bezug auf die Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit wurde im weiteren Sinne an Versuche von Maikowski (2011) und Benthien et al. (2012) angeknüpft, die im Kalenderjahr 2011 durchgeführt wurden. Angeknüpft wurde weiter an Ansätze, die beim Projektpartner Röwer & Rüb im Vorfeld des Forschungsprojektes zur Abschätzung der Trittfestigkeit verschiedener Materialien durchgeführt wurden.

Für die Berechnung von Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit wurde auf die europaweit vereinheitlichten Regeln zur Bemessung von Tragwerken im Bauwesen (Eurocodes¹) zurückgegriffen.

¹ EC 0 bis EC 9 in den Normen EN 1990 bis EN 1999

1.4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Eine Auflistung der verwendeten Fachliteratur ist im Abschnitt „Quellenverzeichnis“ zu finden.

Neben den gängigen Internet-Suchmaschinen, deren spezialisierten Varianten (z.B. Google Scholar), wurden projektbezogene Informationen vornehmlich über das „Zentrum für Informationsmanagement“, Bereich Fachinformation, Thünen-Institut, Braunschweig, sowie die „Wissenschaftliche Spezialbibliothek“ des Thünen-Instituts, Braunschweig, bezogen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens arbeiteten als Projektpartner zusammen:

- Thünen-Institut für Holzforschung (Projektkoordinator/ ausführende Stelle)
- DLG TestService GmbH (Unterauftragnehmer)
- Röwer & Rüb GmbH (Industriepartner)
- KS Schlüter Im- & Export GmbH (Industriepartner)

Das Unternehmen Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG engagierte sich über Materiallieferungen am Projekt. Das Fraunhofer-Institut für Holzforschung lieferte im Unterauftrag Bohlen aus Buchen-Scrimber. Das Holzwerk Keck, B. Keck GmbH, Ehningen/Böblingen, stellte Buchenholz zur Verfügung.

Auf dem Gestüt Samarra Shagya Arab Stud wurde die Trittenenergie von Pferden beim Auskeilen gemessen. Das Unternehmen Böckmann Fahrzeugwerke GmbH bzw. Böckmann Pferde GmbH bemühte sich intensiv, die Messung der Trittenenergie zu unterstützen.

An der Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, wurde ein instrumentiertes Schlagpendel für Versuchsdurchführungen zur Verfügung gestellt.

Von der Universität Hamburg, Institut für Holzwissenschaften, beteiligte sich Prof. Dr. Andreas Krause über fachliche Beratung und die Betreuung von Bachelorarbeiten sowie die Bacheloranden Herrn Nick Engehausen und Herrn Dennis Möck am Forschungsvorhaben.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Last

Anders als die Mehrzahl mechanischer Lasten, die sich über Masse und Beschleunigung oder Masse und Geschwindigkeit quantifizieren lassen, handelt es sich bei einem Pferdetritt um eine aktive kontrollierte und wohl dosierte Bewegung eines Lebewesens, mit der mechanische Energie übertragen bzw. physikalische Arbeit an einem Gegenstand verrichtet wird. Keilt ein Pferd gegen eine Stallbohle aus, so biegt sich diese unter Aufnahme mechanischer Energie. An der Bohle wird physikalische Arbeit verrichtet, da über die Strecke der Durchbiegung eine Kraft wirkt.

Kraftmessungen werden für gewöhnlich unter Ausnutzung des linearen Zusammenhangs von Kraft und elastischer Verformung (Federkonstante, Elastizitätsmodul) vorgenommen. Im Fall eines Newtonmeters findet die Kraftmessung auf Basis der Auslenkung einer Feder mit bekannter Federkonstante und direkter Ablesung des Messwertes auf einer Skala statt. Im Fall von Dehnmessstreifen- oder piezoelektrisch-basierten Kraftsensoren wird die Deformation des Messkörpers zunächst in eine Veränderung des elektrischen Widerstandes oder der elektrischen Ladung umgewandelt und in einem zweiten Schritt für die Ablesung eines Messwertes aufbereitet.

Sollen Kraftmessgeräte zur Bestimmung der Masse eines Gegenstandes verwendet werden (wägen), so wird die gemessene Kraft auf die Erdbeschleunigung normiert. Hierdurch wird beispielsweise das Newtonmeter zur Federwaage und auf der Skala sind anstelle von „Newton“ dann „Gramm“ abzulesen.

Für die Messung der auf ein Objekt einwirkenden Kraft wird für gewöhnlich eine Kraftmessdose zwischen das kraftinduzierende und das kraftbeaufschlagte Objekt positioniert. Leicht nachvollzogen werden kann dies am Beispiel einer Universalprüfmaschine. Hier ist die Kraftmessdose zwischen der krafteinleitenden Traverse und dem Prüfkörper platziert. Da das Elastizitätsmodul der Kraftmessdose wesentlich größer als das des Prüfkörpers ist, kann die für einen jeweiligen Zustand der Verformung des Prüfkörpers die hierfür notwendige Kraft bestimmt werden.

Wird beabsichtigt die Kraft zu messen, die beim Auskeilen eines Pferdes gegen eine Stallbohle wirkt, so müsste eine Kraftmessdose zwischen Huf und Bohle platziert werden. Hierbei würde die Kraft gemessen werden, die im Fall dieser speziellen Stallbohle (gewählte Abmessungen und vorliegender Biege-Elastizitätsmodul) resultiert. Soll das Messergebnis auf andere Bohlen übertragen werden, so ist zunächst auf Basis von Kraft, Abmessungen und Biege-Elastizitätsmodul die theoretisch vorliegende Durchbiegung zu berechnen (oder parallel zur Kraftmessung bestimmt worden sein). Weiter ist die im Zuge der verrichteten physikalischen Arbeit übertragenen mecha-

nische Energie zu berechnen. Mit dieser Größe ließen sich dann für Bohlen anderer Abmessungen und anderen Biege-Elastizitätsmoduln resultierende Kraft und Durchbiegung berechnen.

Ein universellerer Ansatz wäre es, die Trittenenergie über einen Messgerätaufbau direkt zu bestimmen, wie er im Projekt entwickelt und angewendet wurde.

Im Rahmen bislang unternommener Versuche (v. Wachenfelt et al. 2011, Gäckler 2012, Schattner 2012 und v. Wachenfelt et al. 2013) zur Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdende Belastung kamen Messaufbauten zum Einsatz, bei denen an einem steifen Grundgerüst Kraftsensoren montiert waren. Als Messwert für derart aufgebaute Versuchsgeräte wird die Kraft gemessen, die aufgrund der Verformung des Kraftsensors (sowie des Grundgerüsts) und dessen Elastizitätsmoduls resultiert. Anders als bislang erfolgt lässt sich die beim Auskeilen auftretende Belastung quantifizieren, wenn der beim Auskeilen erhaltene Messwert in die beim Kalibrieren erhaltene Datenreihe aus Kraft- und Energiewerten eingeordnet wird, wie es in Kapitel 2.1.2 an verfügbaren Daten für bislang unternommene Versuche (Schattner 2012, v. Wachenfelt et al. 2013) vorgenommen wird.

2.1.1 Eigene Experimente

2.1.1.1 Bau des Probierstandes mit Schlagplatten-Messvorrichtung

Ausgehend von der in Abbildung 1 dargestellten Konstruktion (Schlagplatten-Messvorrichtung), mit der Gäckler (2012) und Schattner (2012) versuchten die beim Auskeilen wirksam werdende Last in einem bestehenden Probierstand zu bestimmen, wurde im Projekte ein Probierstand auf Basis einer freistehenden Messvorrichtung gebaut (Abbildung 2). Wesentliche Veränderungen an der Schlagplatten-Messvorrichtung wurden an der Messtechnik vorgenommen. Diese machte ihrerseits einen Austausch der unteren zwei Traversen notwendig. Anders als Gäckler (2012) und Schattner (2012), bei denen die Schlagplatte über Kraftsensoren mit den unteren zwei Traversen verbunden war, wird hier eine Kombination aus induktiven Wegaufnehmern und Federn zur Messwerterfassung eingesetzt. Über die Umgestaltung der Messwerterfassung soll es möglich werden, anstelle der Kraft die bei Auskeilen auf eine Stallbohle übertragene Energie zu messen.

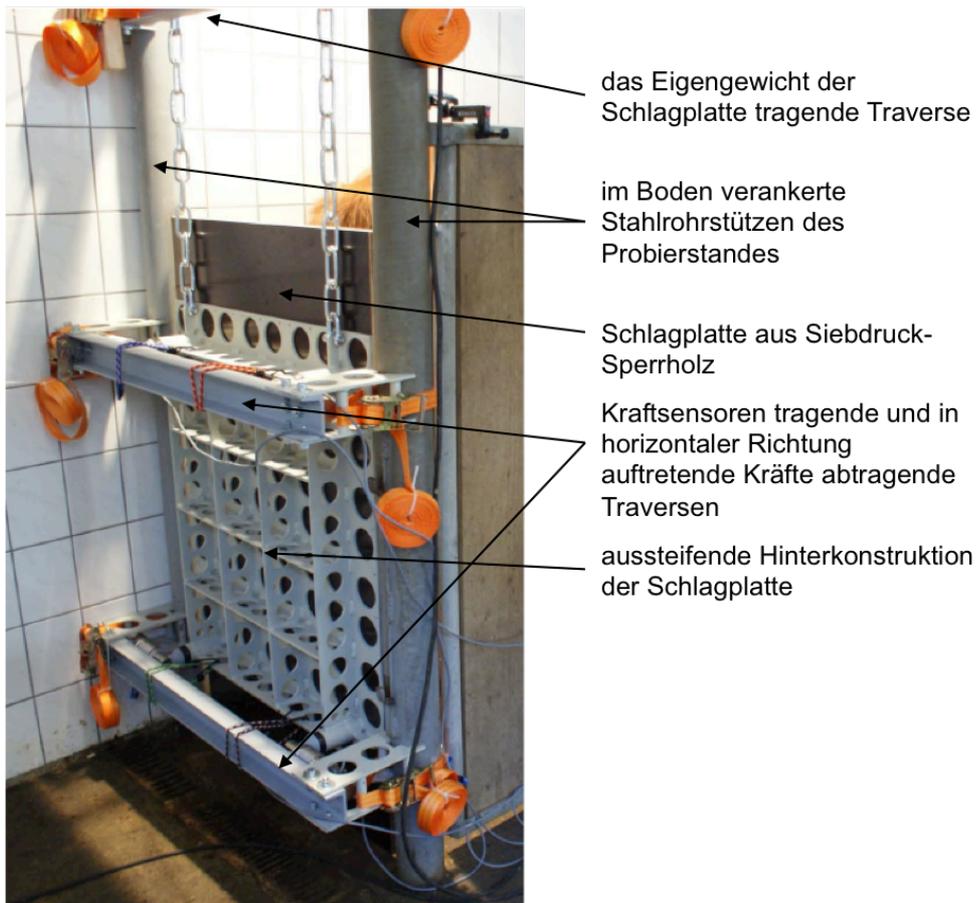


Abbildung 1: Ursprüngliche Konstruktion der Schlagplatten-Messvorrichtung zur Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Belastung in einem Proberstand (verändert nach Gäckler 2012).

Um aus der freistehenden Messvorrichtung, der Trennwand zur Nachbarbox und der Boxentür einen vollwertigen Proberstand zu erhalten, wurde vom Projektpartner Röwer & Rüb GmbH eine schwenkbare Seitenwand angefertigt. Diese wurde über Torbeschläge mit der freistehenden Messvorrichtung verbunden. Nach Einstellen des Deckhengstes und Schließen der Seitenwand war der Deckhengst in dem so aufgebauten Proberstand sicher zu kontrollieren (Abbildung 3). Die Messtechnik auf der Rückseite des Proberstandes wurde mit Siebdruck-Sperrholzplatten verkleidet, wie ebenfalls in Abbildung 3 zu sehen ist.

Ergänzend zur Verbindung der Schlagplatte mit der Rahmenkonstruktion über Federn und induktive Wegaufnehmer, wird das Eigengewicht der Schlagplatte über eine Kettenaufhängung von der obersten Traverse auf die Rahmenkonstruktion abgetragen. Die an einer jeden Ecke der Schlagplatte positionierte Kombination aus Feder und induktivem Wegaufnehmer ist so ausgeführt, dass durch Tritte verursachte Bewegungen der Schlagplatte (Federn werden gestaucht) aufgezeichnet (induktiver Wegaufnehmer misst Federweg). Die Schlagplatte besteht aus einer Siebdruck-Sperrholzplatte, die auf einer verwindungssteifen Hinterkonstruktion montiert ist.



Abbildung 2: Rückansicht (a) und Vorderansicht (b) des freistehenden Grundgerüsts des Proberstandes, mit dem die beim Auskeilen wirksam werdenden Schlagenergie gemessen werden kann (Foto: Benthien).

Die verwendeten induktiven Wegaufnehmer (WA-T) mit Tastspitze von Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM), Darmstadt, sind über einen Universal-Messverstärker (QuantumX, MX 840B, HBM) mit einem Computer verbunden, auf dem über die Software Catman Easy (HBM) die Messwertaufzeichnung durchgeführt wird. Über die Trigger-Funktion wird eine zweiminütige Messwertaufzeichnung gestartet, wenn ein definierter Schwellwert überschritten wird. Die Frequenz der Messwertaufzeichnung beträgt 20 kHz, d.h. alle 0,05 ms wird ein Messwert aufgezeichnet.



Abbildung 3: Probiertstand mit Möglichkeit zur Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Energie (Foto: Benthien).

2.1.1.2 Versuchsdurchführung

Die Messung der beim Auskeilen wirkenden Trittenenergie fand in dem Pferdezuchtbetrieb Gestüt Samarra Shagya Arab Stud, Grundmühle, Rotenburg an der Fulda, statt. Hier wurden dem Araber Hengst Olymp während der Decksaison rossige Stuten vorgeführt, um zu testen, ob der optimale Besamungszeitpunkt ist. Im Rahmen dieses routinemäßigen Ablaufs wurden die Messungen durchgeführt. Der Ablauf sah hierbei wie folgt aus:

- (1) Starten der triggergesteuerten Messwerterfassung
- (2) Hereinführen des Hengstes in den Probiertstand; schließen der Seitenwand
- (3) Heranführen einer Stute an den Probiertstand bzw. in die Nachbarbox, wie der Hengst es von vorherigen Deckvorgängen kennt

- (4) Der Hengst zeigt seine Erregung bzw. versucht der Stute durch geräuschintensives Auskeilen gegen die Rückwand des Probierstandes zu imponieren.
- (5) Sobald die erste Phase der Erregung sich gelegt hat (ca. 2 min), wird zunächst die Stute, anschließend der Hengst in die eigene Box zurückgeführt.

Während der Messung wurden jeweils Stute und Hengst durch die Eigner geführt.

2.1.1.3 Datenauswertung

Die aufgezeichneten Datensätze wurden in Sequenzen aufgeteilt, die jeweils einen einzelnen Tritt repräsentieren. Ein solcher Datensatz besteht aus Messwerten, die jeweils für eine Feder die Deformation zu den Abtastzeitpunkten erhoben wurden. Für eine jede Feder wurde die maximale Deformation herausgesucht und auf deren Basis in Kombination mit der Federkonstante die Maximalkraft (Gleichung 1) berechnet.

$$F = D \times \Delta l$$

Gleichung 1

mit

F Kraft in N

D Federkonstante in N/mm

Δl in mm

Die Bestimmung der Federkonstanten erfolgte vorab durch den Projektpartner DLG und lieferte folgendes Ergebnis:

- Feder 1 = 1295 N/mm
- Feder 2 = 1330 N/mm
- Feder 3 = 1337 N/mm
- Feder 4 = 1302 N/mm

Anhand der maximalen Deformation wurde über Gleichung 2 die beim Auskeilen von der Feder absorbierte Energie berechnet:

$$E = 0,5 \times D \times \Delta l^2$$

Gleichung 2

mit

E Energie in Nm oder J

D Federkonstante in N/m

Δl in mm

Für jeden Tritt wurden die berechneten Energien der Federn aufsummiert. Die so erhaltenen Daten wurden für die Auswertung

- (1) im vollen Umfang („Komplett“) berücksichtigt,
- (2) auf „Tritte größer-gleich 1 Joule“ reduziert,
- (3) auf „Tritte größer 10 Joule“ reduziert sowie
- (4) auf den Maximalwert begrenzt.

Mit Ausnahme der alleinigen Betrachtung des Maximalwertes wurde für jeden Datensatz Mittelwert, das 5 %-Quantil, der Median (50 %-Quantil) und das 95 %-Quantil sowie Minimal- und Maximalwert berechnet.

2.1.1.4 Verifikation der Schlagplatte

Zur Überprüfung der Plausibilität der im Feldexperiment ermittelten Daten wurde die Schlagplatten-Messvorrichtung im Labor vor dem Groß-Pendelschlagwerk montiert, das für die in Kapitel (3) und Kapitel (6) vorgestellten Versuche eingesetzt wurde. Als Pendelhammer wurde der in Kapitel (6) näher beschriebene künstliche Huf verwendet. Die Gewichte des modular aufgebauten Huf-Pendelhammers wurden so kombiniert, dass eine Gesamtmasse von 60 kg vorlag. Über die Wahl der Auslenkung des Pendelhammers gegenüber seiner Ruheposition um 45° (Anheben der Masse um 0,3 m), wurde so eine Energie von 170 J in horizontaler Richtung auf die Schlagplatte aufgebracht. Die Schlagplatte wurde mit jeweils 10 Schlägen an sechs Punkten belastet:

- Mitte-mitte (zentral auf die Schlagplatte)
- Mitte-unten (mittig zwischen Sensor 3 und Sensor 4)
- Sensor 1
- Sensor 2
- Sensor 3
- Sensor 4

Zusätzlich zur tatsächlich im Feldexperiment vorliegenden Befestigung der Traversen am Grundgerüst mit Gurtbändern, wurden bei der Verifikation im Labor die Traversen alternativ auch über Spanneisen (Pratzen) mit dem Grundgerüst verbunden, um mögliche Effekte der Gurtdehnung (Reck) zu erfassen.

Für den Fall der Gurtbefestigung wurde festgestellt, dass die Schlagplatten-Messvorrichtung die aufbrachte Energie zwischen 26 % unterschätzt (Sensor 3) und 19 % überschätzt (Sensor 2). Im Mittel (Sensor 2, Sensor 3, Sensor 4) wurde eine Unterschätzung um 5 % gefunden. Die von Sen-

sor 1 aufgezeichneten Daten wurden als offensichtliche Fehlmessung (Überschätzung um 221 %) bewertet und von der Datenauswertung ausgeschlossen. Im Fall der Prätzenbefestigung wurde die Streuung der Unter- bzw. Überschätzung als geringer festgestellt; die mittlere Unterschätzung blieb jedoch unverändert.

2.1.1.5 Messergebnisse

An sieben Tagen (10., 15. und 23. April sowie 23., 25., 27. und 30. Mai 2018) wurden bis zu zwei Messungen durchgeführt. Innerhalb jeder Messung wurden mehrere Tritte aufgezeichnet. Nach Unterteilung jeder Trittfolge in Einzeltritte standen am Ende 32 Tritt-Energiewerte zur Verfügung. Diese werden in Tabelle 5 aufgeführt.

Anhand der in Tabelle 5 aufgeführten Daten ist zu erkennen, dass die Messwerte links-schief verteilt sind (Mittelwert deutlich größer als Median). Es wurden viele Tritte geringer Energie und wenige Tritte hoher Energie detektiert. Mit dem Ziel der Unwissenheit Rechnung zu tragen, ab wann ein Tritt tatsächlich als Tritt zu behandeln ist und es sich nicht allein um ein Anlehnen des Körpergewichtes gegen die Messvorrichtung handelt, wurden die Daten in vier Datensätze unterteilt. In Abhängigkeit davon, wie viele Tritte geringer Energie auf der Betrachtung ausgeschlossen sind, werden als „Charakteristischer Wert der Einwirkung“ (E_k bzw. $E_{95\%}$) Energien von 39,7, 41,7 oder 70,4 J veranschlagt. Vornehmlich berücksichtigt werden soll in der folgenden Berechnung der Durchtrittbeständigkeit (Kapitel (4)) ein Wert von 70,4 J.

Tabelle 1: Im Rahmen der Messungen aufgenommene Energiewerte, sortiert nach Intensität, ausgewertet (Minimalwert, 5 %-Quantil, Median, 95 %-Quantil, Maximalwert und Mittelwert) für jeweils eine von drei unterschiedlich umfangreiche Datenauswahl.

Datensatz	Trittenergie (J)		
	Komplett	Tritte größer-gleich 1 Joule	Tritte größer 10 Joule
Tritte kleiner 1 Joule	0,5 ¹⁾	-	-
Tritte von 1 bis 10 Joule	4,2 ²⁾	4,2 ²⁾	-
Tritt 29	11,2	11,2	11,2
Tritt 5	11,5	11,5	11,5
Tritt 27	16,6	16,6	16,6
Tritt 24	16,8	16,8	16,8
Tritt 14	21,5	21,5	21,5
Tritt 31	39,9	39,9	39,9
Tritt 7	35,1	35,1	35,1
Tritt 3	37,5	37,5	37,5
Tritt 18	42,5	42,5	42,5
Tritt 8	93,2	93,2	93,2
Minimalwert	0,1	1,1	11,2
5 %-Quantil	0,2	1,6	11,4
50 %- Quantil	3,3	7,3	25,7
95 %- Quantil	39,7	41,7	70,4
Maximalwert	93,2	93,2	93,2
Mittelwert	11,8	15,6	31,6

¹⁾ Mittelwert von 8 Messwerten, ²⁾ Mittelwert von 14 Messwerten

2.1.2 Exkurs: Bestimmung der Trittlast auf Basis von Messdaten aus der Literatur

2.1.2.1 Neuauswertung von Literaturdaten (v. Wachenfelt et al. 2013)

Rohdaten

Die aus v. Wachenfelt et al. (2013) zur Neuauswertung entnommenen Rohdaten werden in Tabelle 2 aufgeführt. Dargestellt werden Daten, die im Zuge der Platzierung der Schlagplatten-Messvorrichtung unter der Fallgewichtsanlage und Beaufschlagung mit Gewichten unterschiedlicher Masse und Fallhöhe erzielt bzw. aus diesen berechnet wurden (Geschwindigkeit des Fallgewichtes beim Aufprall, kinetische Aufschlagenergie, Variationskoeffizient). Für die Neuauswer-

tung relevant sind hierbei die gemessene Kraft sowie die berechnete kinetische Aufschlagenergie, die bei gleichen Parametern der Fallgewichtsanlage gemessen wurde. Die sich hieraus ergebenden Datenpunkte werden in Abbildung 4 aufgetragen.

Als Maximalkraft aus insgesamt 472 gemessenen Pferdetritten geben v. Wachenfelt (2013) einen Wert von 8.722 N an.

In Abbildung 4 wird dieser Messwerte in Kombination mit der auf Basis des nachfolgend erarbeiteten Zusammenhangs von Kraft und Aufschlagenergie berechneten Trittenenergie als Datenpunkt aufgetragen (Symbol: Kreuz).

Tabelle 2: Für die Neuauswertung herangezogene Rohdaten aus v. Wachenfelt et al. (2013).

Parameter der Fallgewichts-anlage		Berechnete Werte der Fallgewichtsanlagen-parameter		Messergebnisse	
Masse des Fallgewichtes m	Fallhöhe h	Fallgewichtsgeschwindigkeit beim Aufschlag v	Kinetische Aufschlagenergie E_K	Kraft	Variationskoeffizient
(kg)	(m)	(m/s)	(J)	(N)	(%)
6,5	0,5	3,1	32	3.998	4,2
6,5	1,0	4,4	64	5.823	2,6
6,5	1,5	5,4	96	7.312	2,3
6,5	2,0	6,3	128	8.794	2,0
16,5	0,5	3,1	81	7.456	2,8
16,5	1,0	4,4	162	11.068	2,6
16,5	1,5	5,4	243	13.935	2,6
16,5	2,0	6,3	324	16.220	1,5
26,5	0,5	3,1	130	8.885	2,5
26,5	1,0	4,4	260	13.853	1,1
26,5	1,5	5,4	390	16.625	4,0
26,5	2,0	6,3	520	18.548	5,2
36,5	0,5	3,1	179	11.048	3,4
36,5	1,0	4,4	358	16.872	2,0
36,5	1,5	5,4	537	20.622	2,7
36,5	2,0	6,3	716	21.459	8,1

$$v = \sqrt{2gh}, E_K = 0,5 mv^2 (= mgh \text{ mit } g = 9,81 \text{ m/s}^2),$$

$$\text{Variationskoeffizient} = \text{Standardabweichung} / \text{Mittelwert} \times 100$$

Vorgehen bei der Neuauswertung

Mit dem Wissen der gemessenen Kraft für verschiedene Aufschlagenergien aus der Platzierung der Schlagplatten-Messvorrichtung unter der Fallgewichtsanlage sowie der gemessenen maximalen Trittkraft, wird die entsprechende Trittenergie nach folgender Vorgehensweise berechnet:

- (1) Grafische Darstellung von gemessener Kraft als abhängige Variable (y-Wert) und Aufschlagsenergie als abhängige Variable (x-Wert).
- (2) Bestimmung der funktionalen Abhängigkeit der gemessenen Kraft von der Aufschlagenergie (Regressionsanalyse) unter Berücksichtigung der benachbarten Wertepaare (x/y) zum maximalen Kraftwert von 8.722 N („benutzte Daten“) aus dem Feldexperiment
 - (81/7.456)
 - (96/7.312)
 - (128/8.794)
 - (130/8.885)
 - (162/11.068)
 - (179/11.048)
- (3) Berechnung der Trittenergie für den Kraftwert von 8.722 N auf Basis der linearen Regressionsgleichung (Gleichung 3), nachdem diese nach x aufgelöst wurde

$$f(x) = y = ax + b \Rightarrow x = (y - b) / a$$

Gleichung 3

mit

x = berechnete Trittenergie

y = gemessene Kraft

a = Steigung der Regressionsgeraden

b = Achsenabschnitt

Ergebnisse

Die grafische Darstellung (gemessene Kraft gegen berechnete Aufschlagenergie) der in Tabelle 2 aufgeführten Werte ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Daten, die zur Berechnung der Regressionsgeraden verwendet wurden, sind hierbei hervorgehoben. Ergänzend zur Regressionsgeraden werden deren Funktionsgleichung ($f[x] = y = 42,9x + 3.546$) sowie dessen Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,94$) angegeben. Weiter wird das Wertepaar aus gemessener Kraft und berechneter Trittenergie aufgetragen.

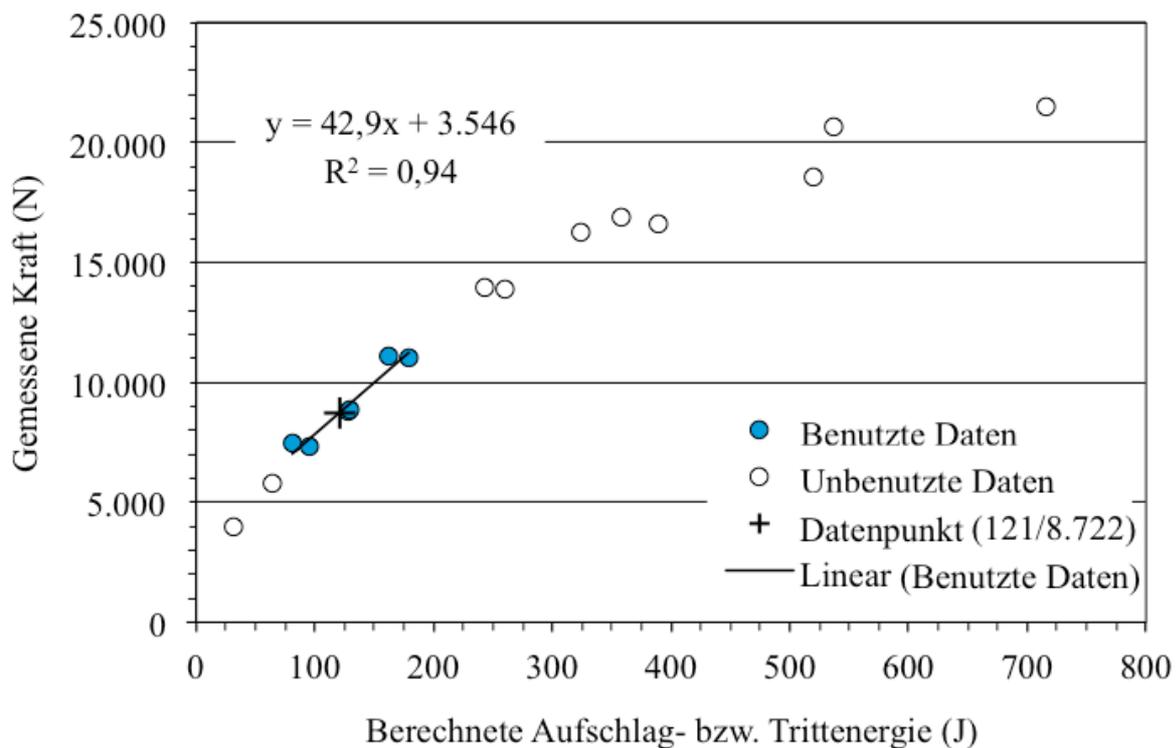


Abbildung 4: Grafische Darstellung der aus v. Wachenfelt et al. (2013) herangezogenen Wertepaare (für die Bestimmung der funktionalen Abhängigkeit von Kraft und Aufschlagenergie benutzte Daten farbig hinterlegt), des berechneten Wertepaars zur Maximalkraft sowie der Regressionsgeraden über die „Benutzten Daten“, deren Funktionsgleichung und Bestimmtheitsmaß.

Unter Berücksichtigung der Geradensteigung $a = 42,9$, des Achsenabschnitts $b = 3.546$ und der maximal gemessenen Trittkraft von 8.722 N in Gleichung 4, wird eine maximale Trittenergie von 121 J erhalten ($x = [8.722 \text{ N} - 3.546] / 42,9 = 121 \text{ J}$).

2.1.2.2 Neuauswertung von Literaturdaten (Schattner 2012)

Rohdaten

In Tabelle 3 werden die von Schattner (2012) angegebenen Rohdaten aufgeführt, bei deren Bestimmung der Messbereich der Kraftsensoren nicht überschritten wurde. Für die Neuauswertung relevant sind hierbei die gemessene „Kraft“ sowie die berechnete kinetische Aufschlagenergie, bei gleichen Parametern des Pendelschlagwerkes gemessen wurde. Die sich hieraus ergebenden Datenpunkte werden in Abbildung 5 nach dem Abstand des Pendelschlagwerkes zur Messvorrichtung unterschieden als „Daten (60 cm)“, „Daten (70 cm)“ und „Daten (80 cm)“ aufgetragen.

Als Ergebnis der Trittversuche gibt Schattner (2012) an, dass

- 17 der gemessenen Tritte in Bereich zwischen 250 und 499 kg,
- 16 der gemessenen Tritte im Bereich zwischen 500 und 999 kg und
- 7 der gemessenen Tritte über 1.000 kg liegen.

Als maximaler Messwert der Trittversuche wird 1.998 kg angegeben.

In Abbildung 5 werden diese Messwerte in Kombination mit den auf Basis des nachfolgend erarbeiteten Zusammenhangs von „Kraft“ und Aufschlagenergie berechneten Trittnergien als Datenpunkte aufgetragen (runde Symbole).

Tabelle 3: Für die Neuauswertung herangezogenen Rohdaten aus Schattner (2012).

Parameter des Pendelschlagwerkes (PSW)			Berechnete Werte aus PSW-Parameter		Messergebnis
Abstand des PSW zur Messvorrichtung (cm)	Masse des Pendelhammers m (kg)	Fallhöhe h (m)	Geschwindigkeit des Pendelhammers beim Aufschlag v (m/s)	Kinetische Aufschlagenergie E_k (J)	„Kraft“ (kg)
60	26,7	0,145	1,7	38	602
60	26,7	0,245	2,2	64	704
60	36,7	0,145	1,7	52	732
70	26,7	0,055	1,0	14	490
70	26,7	0,155	1,7	41	616
70	26,7	0,255	2,2	67	773
70	26,7	0,355	2,6	93	891
70	26,7	0,455	3,0	119	945
70	26,7	0,555	3,3	145	1.023
70	26,7	0,655	3,6	171	1.015
70	36,7	0,055	1,0	20	620
70	36,7	0,155	1,7	56	774
70	36,7	0,255	2,2	92	951
80	26,7	0,055	1,0	14	584
80	26,7	0,155	1,7	41	769
80	26,7	0,255	2,2	67	923
80	26,7	0,355	2,6	93	1.015
80	26,7	0,455	3,0	119	1.094
80	26,7	0,555	3,3	145	1.174
80	26,7	0,655	3,6	171	1.227
80	26,7	0,755	3,8	197	1.287
80	36,7	0,055	1,0	20	829
80	36,7	0,155	1,7	56	1.019
80	36,7	0,255	2,2	92	1.160
80	36,7	0,355	2,6	128	1.265

Vorgehen bei der Neuauswertung

Mit dem Wissen der gemessenen „Kraft“ für unterschiedliche Aufschlagenergien aus der Platzierung der Schlagplatten-Messvorrichtung vor dem Pendelschlagwerk sowie den gemessenen „Trittkräften“, wird nach folgender Vorgehensweise versucht, die entsprechende Trittenenergie zu berechnen:

- (1) Grafische Darstellung von gemessener „Kraft“ als abhängige Variable (y-Wert) und Aufschlagsenergie als unabhängige Variable (x-Wert).
- (2) Bestimmung der funktionalen Abhängigkeit der gemessenen „Kraft“ von der Aufschlagenergie (Regressionsanalyse) unter Berücksichtigung aller aus Tabelle 3 zu entnehmenden Wertepaare (Energie/Kraft).
- (3) Berechnung der Trittenenergie für „Kraftwerte“ von 250, 500, 1.000 und 1.998 kg auf Basis der linearen Regressionsgleichung (Gleichung 4), nachdem diese nach x aufgelöst wurde

$$f(x) = y = ax + b \Rightarrow x = (y - b) / a$$

Gleichung 4

wobei

x = berechnete Trittenenergie

y = gemessene Kraft

a = Steigung der Regressionsgeraden

b = Achsenabschnitt

Ergebnisse

Die grafische Darstellung (gemessene Kraft gegen berechnete Aufschlagenergie) der in Tabelle 3 aufgeführten Werte ist in Abbildung 5 zu sehen. Zur Berechnung der Regressionsgeraden wurden hierbei alle Werte herangezogen, wobei in der Darstellung eine Unterscheidung zwischen den Daten dahingehend vorgenommen wird, bei welchen Abständen zwischen Pendelschlagwerk und Messvorrichtung diese ermittelt wurden. Ergänzend zur Regressionsgeraden werden Funktionsgleichung ($f[x] = y = 3,7x + 586$) sowie Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,73$) angegeben. Weiter werden die Wertepaare aus gemessener Kraft und berechneter Trittenenergie aufgetragen.

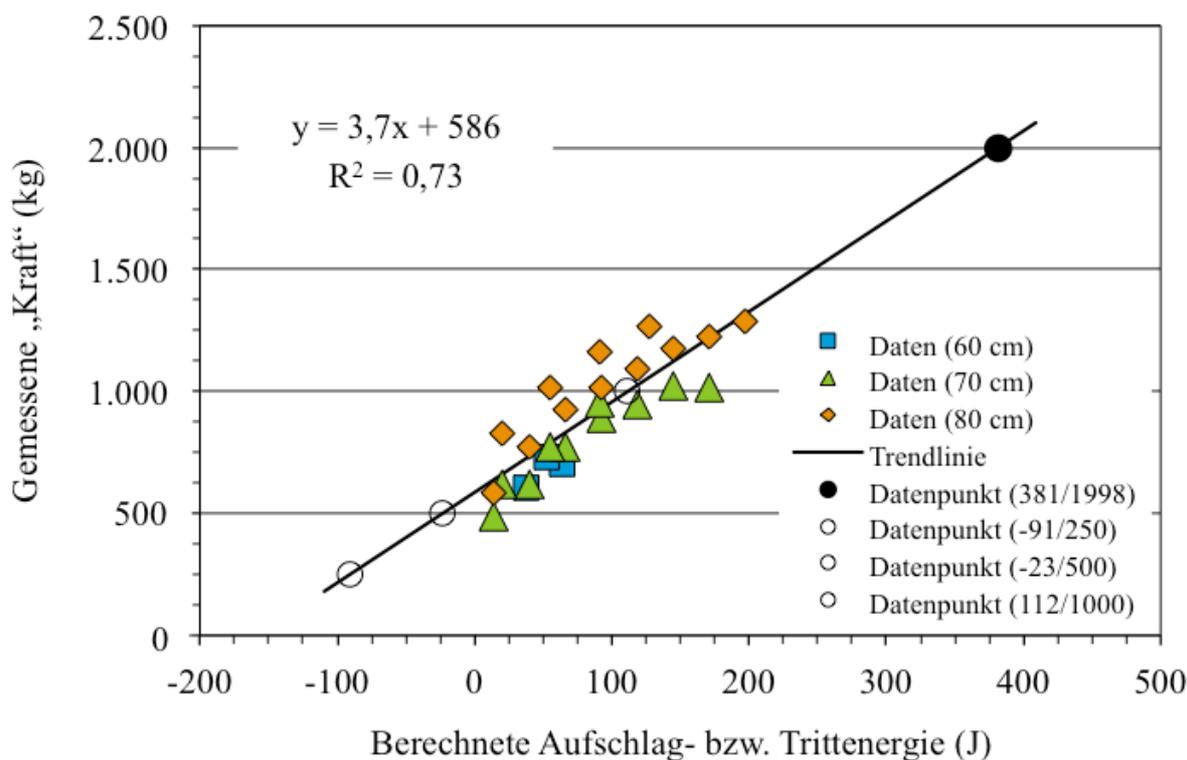


Abbildung 5: Grafische Darstellung der aus Schattner (2012) zusammengestellten Wertepaare (gemessene Kraft und Aufschlagenergie bei verschiedenen Abständen zwischen Pendelschlagwerk und Messvorrichtung), der Wertepaare aus gemessener Kraft und berechneter Trittenergie sowie der Regressionsgeraden, deren Funktionsgleichung und Bestimmtheitsmaß.

Unter Berücksichtigung der Geradensteigung $a = 3,7$, des Achsenabschnitts $b = 586$ und der verschiedenen „Trittkräfte“ (250, 500, 1.000 und 1.998 kg) in Gleichung 4, wurden folgende Trittnergien berechnet:

- 250 kg = -91 J
- 500 kg = -23 J
- 1.000 kg = 112 J
- 1.998 kg = 381 J

2.1.3 Diskussion der Ergebnisse der Trittlastbestimmung und Trittlastneuberechnung

Im Zuge der Neuauswertung der Daten aus v. Wachenfelt et al. (2013) wurde mit 121 J eine wesentlich geringere als die von den Autoren der Studie abgeleiteten Trittenergie von bis zu 750 J

berechnet. Unter Berücksichtigung des in der Praxis verwendeten Ansatzes zur Prüfung der Eignung unbekannter Materialien für den Bau von Pferdeboxen - eine Bohle gleicher Abmessungen aus dem unbekanntem Material muss mindestens der gleichen Schlagbelastung wie eine Bohle aus Bongossi standhalten - erscheint der neuberechnete Wert deutlich plausibler. Unter Annahme von Querschnittsabmessungen von 40 mm x 125 mm und einer Bruchschlagarbeit für Bongossi von 90...150 kJ/m² (Mittelwert = 120 kJ/m²) (Sell 1997) muss die Trittenenergie geringer als 450 J sein, da bei der gegebenen Querschnittsfläche (0,04 m x 0,125 m = 0,005 m²) die Bohle versagen würde (90 kJ/m² x 0,005 m² = 450 J). Entsprechend des in den „Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutz Gesichtspunkten“ (BMELV 2009) angegebenen Orientierungsmaßes für die Dicke von Stallbohlen in Eiche von 4 cm, müsste die Trittenenergie als noch geringer angenommen werden. Wird für Eiche eine Bruchschlagarbeit von 50 kJ/m² (von Sell [1997] angegebener Bereich: 50...74 kJ/m²) und eine Bohlenbreite von 125 mm angenommen, so muss die Trittenenergie geringer als 250 J sein. Dass die Daten aus v. Wachenfelt et al. (2013) grundsätzlich einem methodischen Fehler unterliegen, ist aufgrund des nicht-linearen Zusammenhangs von Messwerten und Aufschlagenergien im Fall der Laborversuche zu vermuten. Eine begrenzte Übertragbarkeit der Messwerte aus dem Feldexperiment auf die Ergebnisse der Laborversuche ist aus dem Grund zu vermuten, dass im ersten Fall eine Boxentrennwand und im zweiten Fall der Laborfußboden als Widerlager (unterschiedliche Elastizitätsmodule) für die Messwand gedient hat.

Die analoge Neuauswertung der von Schattner (2012) angegebenen Daten liefert gänzlich unplausible Ergebnisse. Wird ein linearer Zusammenhang zwischen von Messwerten und Aufschlagenergie im Fall der Laborversuche angenommen, so werden für die Feldexperimente negative Trittenenergien erhalten. Auch hier sind unterschiedliche Widerlager zwischen Feldexperiment und Laborversuch als mögliche Fehlerursache zu vermuten. Denkbar ist auch, dass der Abstand zwischen Pendelschlagwerk und Messvorrichtung eine Fehlerquelle ist, da hierdurch die Schlagbelastung nicht allein in Belastungsrichtung des Kraftsensors (horizontal) erfolgte, sondern mit zunehmendem Abstand vertikale Lasten auf die Messvorrichtung aufgebracht wurden.

Die im eigenen Feldexperiment gemessenen Trittenenergien passen von Ihrer Struktur zu den in 2011 von v. Wachenfelt et al. ermittelten Daten. Die meisten Tritte waren von niedriger und nur wenige von hoher Intensität (linksschiefe Häufigkeitsverteilung). Der für spätere Berechnungen heranzuziehende beabsichtigte Wert für die Trittenenergie von 71 J passt in den Bereich der Energiewerte, die vorab im Kontext der Diskussion der Neuauswertung der Daten von v. Wachenfelt et al. (2013) genannt wurden. Für die eigenen Feldexperimente musste im Zuge der Verifizierung der Messvorrichtung festgestellt werden, dass am Ort der Aufstellung stets eine gewissenhafte Kalibrierung erfolgen muss oder die Messvorrichtung als transportables, vorab kalibrierbares Modul zu gestalten ist. Das Unterlassen einer finalen Kalibrierung hat während der Feldexperimente dazu geführt, dass ein Sensor von der Auswertung ausgeschlossen werden musste, da dieser offensichtlich falsche Ergebnisse geliefert hat. Die insgesamt gefundene Unterschätzung der gemessenen Trittenenergie von 5 % ist als vernachlässigbar anzusehen und lässt sich mit Reibungs- und Deformationsverlusten erklären.

2.1.4 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen

Formuliertes Projektziel war es, die beim Auskeilen zu erwartende Last zu quantifizieren. Dies konnte mit kleinen Einschränkungen realisiert werden:

- Es wurde Proberstand gebaut, mit dem die Trittenenergie gemessen werden kann;
- es konnte ein Partner gefunden werden, der bereit war, mit seinen Pferden die Messungen zu begleiten;
- es wurden zahlreiche Trittenenergiemessungen durchgeführt und ausgewertet, sodass eine Vorstellung davon gewonnen werden konnte,
 - wie entsprechende Versuche zu realisieren sind (praktikable Durchführung) und
 - mit welcher Trittenenergie zu rechnen ist.

Für das Erlangen einer umfangreichen Vorstellung der beim Auskeilen zu erwartenden Last wäre es sinnvoll, die Messungen mit verschiedenen Pferden durchzuführen. Dies ist jedoch eine große Herausforderung, da

- der Kreis an Personen, die bereit sind mit ihrem Pferd Messungen zu begleiten, sehr überschaubar erscheint und darüber hinaus
- Pferde gefunden werden müssen, die im Proberstand das gewünschte Verhalten zeigen.

Mit den nun vorliegenden Erfahrungen sollte es zukünftig aber eher möglich sein, Personen zu finden, die mit ihrem Pferd Messungen begleiten. Für die Findung von Versuchsteilnehmern sowie Durchführung von Versuchen mit verschiedenen Pferden wäre es sinnvoll, ein Messstand-Modul zu bauen, mit dem verschiedene Gestüte angefahren werden können. Ein Messstand-Modul wäre auch für die Kalibrierung der Messtechnik vorteilhaft.

Weiter wäre zu prüfen, ob induktive Wegaufnehmer die bestgeeignetste Technik sind, um im Bereich der Dynamik eine Messaufgabe zu erfüllen. Aufgrund der Notwendigkeit der Anwendung eines Trägerfrequenz-Messverstärkers ist die Messwerterfassung recht langsam. Beschleunigungsaufnehmer auf Basis der ICP- bzw. IEPE-Technik wären hier um ein Vielfaches schneller, sodass die Dämpfung des Signals wesentlich geringer ausfallen würde. Mit dem Ziel diesbezüglich eine langfristig sinnvolle Lösung zu finden, wurde Kontakt zur Firma Gantner Instruments Test & Measurement GmbH, Darmstadt, aufgebaut.

Insgesamt konnten die durchgeführten Versuche einen wichtigen Beitrag auf dem Gebiet der Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Energie liefern und so zum Wohl der in menschlicher Obhut lebenden Pferde beitragen.

2.2 Buchen-Scrimber-Bohlen

2.2.1 Herstellung

Die Bohlen aus Buchen-Scrimber wurden am Fraunhofer-Institut für Holzforschung im Unterauftrag angefertigt. Hierbei wurde zunächst Buchenholz zwischen zwei Walzen zerquetscht. Das so aufgefaserete Material wurde mit Hilfe einer Sprühpistole mit Phenol-Formaldehyd-Klebstoff (PF Prefere 4976, Prefere Resins Holding GmbH, Erkner) beaufschlagt. Das so vorbereitete Material wurde in einen Pressrahmen (1500 x 450 mm²) platziert und bei einer Temperatur von 130 °C zu Bohlen mit einer Ziel-Dicke von gut 40 mm und eine Ziel-Dichte von 1000 kg/m³ verpresst. Der Ziel-Klebstoffanteil betrug 12 %. Vor der Auslieferung wurden die Rohbohlen mit einem Bandschleifautomaten (80ger Körnung) auf eine einheitliche Dicke von 40 mm kalibriert.

2.2.2 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen

Projektziel war es, Stallbohlen aus Scrimber herstellen zu lassen und deren Eignung für den Stallbau zu prüfen. Dies wurde für Bohlen aus Buchen-Scrimber vorgenommen. Auf die Herstellung und Prüfung von Scrimber-Bohlen aus weiteren Holzarten wurde zum einen aus Kostengründen verzichtet. Zum anderen aber auch aus dem Grund, dass keine weiterführenden Erkenntnisse zu erwarten waren. Das wesentliche Eigenschaftsprofil ließ sich auch an Buchen-Scrimber-Bohlen erkennen und beschreiben.

2.3 Bestimmung der Materialkennwerte

2.3.1 Einrichtung von Prüfvorrichtungen

Das am Thünen-Institut für Holzforschung vorhandene 150-Joule-Pendelschlagwerk wurde im Zuge des Projektes dahingehend umgebaut, dass deutlich größere Auflagerabstände eingestellt werden konnten, als es im Fall der Prüfung von Standardprüfkörpern notwendig ist (Abbildung 6).



Abbildung 6: Zur Prüfung deutlich größerer Auflagerabstände, als es für Standardprüfkörper notwendig wäre, umgebautes Pendelschlagwerk.

Das beim Projektpartner DLG TestService GmbH vorhandene Groß-Pendelschlagwerk mit künstlichem Huf mit vertikaler Hufeisenmontage als Pendelhammer (Abbildung 7a) wurde im Zuge des Projektes so umgebaut, dass anstelle des künstlichen Hufes mit einem C-Hammer geprüft werden könnte. Die Herstellung und Montage eines C-Hammers wurde durchgeführt, um eine möglichst große Ähnlichkeit einem konventionellen Schlagpendel zu erreichen, wie es in Anlehnung an DIN 52189-1:1981-12 zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit verwendet wird, d.h. die Lasteinwirkung über einen halben Rundstab mit definiertem Durchmesser erfolgt. Kombiniert wurde das Groß-Pendelschlagwerk mit zwei Auflagerböcken (Abbildung 7b), die eine Variation der Auflagerhöhe und des Auflagerabstandes ermöglichen.

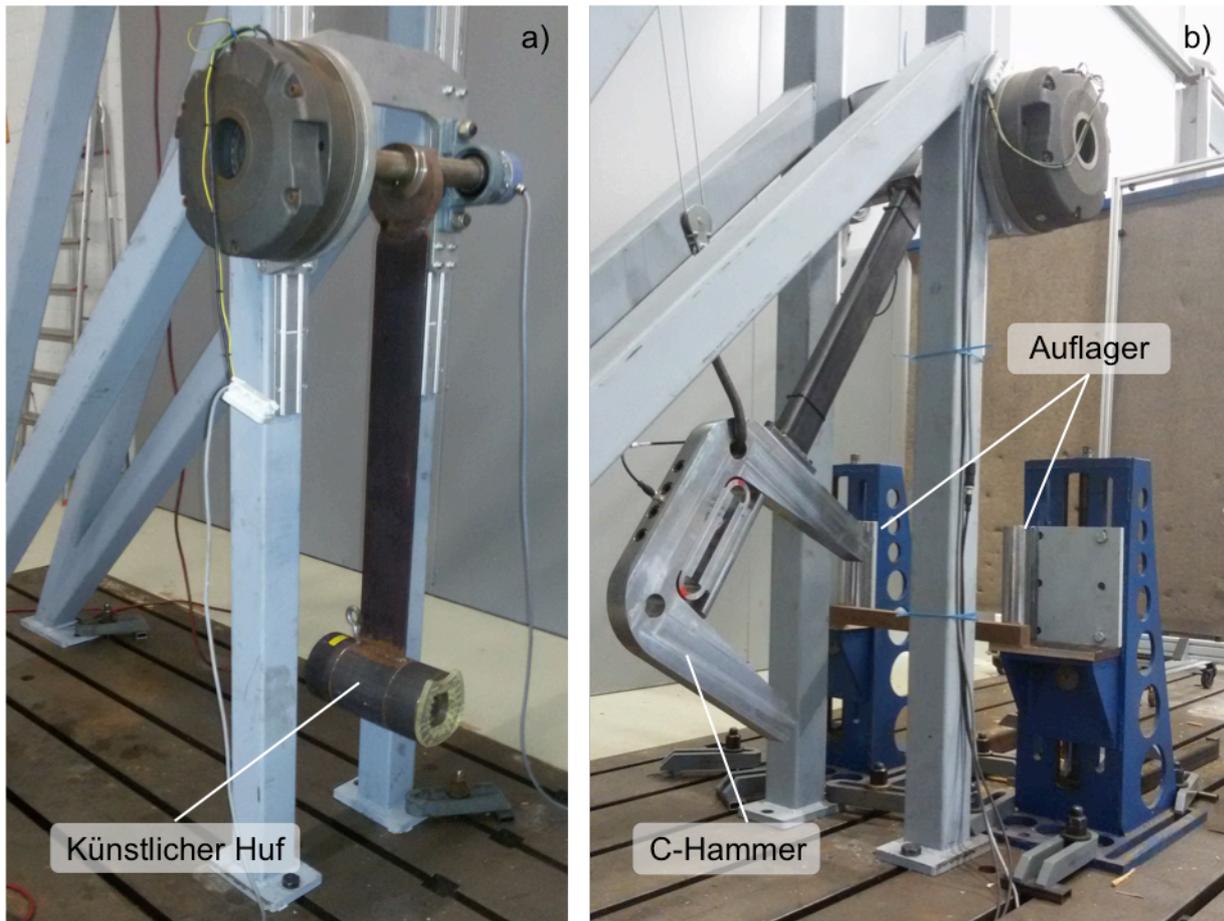


Abbildung 7: a) Beim Projektpartner DLG vorhandenes Groß-Pendelschlagwerk mit künstlichem Huf; b) zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit mit C-Hammer und Auflagerböcken umgerüstetes Groß-Pendelschlagwerk.

2.3.2 Materialien

Neben den in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Scrimber-Bohlen aus Buchenholz, wurde als weiterer derzeit nicht für den Bau von Pferdeboxen eingesetzter Holzwerkstoff BauBuche untersucht. Bei dem hier verwendeten Produkt „BauBuche Paneel“ handelt es sich um eine Leimholzplatte aus Buchenschäl furnierstreifen, die über Phenol-Formaldehyd-Klebstoff miteinander verbunden sind. Im Vergleich zu massivem Buchenholz oder Leimholzplatten aus Buchenholzleisten sind homogenere Materialeigenschaften zu erwarten, da Holzfehler wie Äste und Faserabweichungen über die Bohle verteilt werden und so weniger örtlich konzentriert vorliegen. Aufgrund der widerkehrenden Abwechslung von Furnier und dunkler Klebstofffuge hat die Fläche des Werkstoffes eine Textur, die an die Maserung eines gleichmäßig gewachsenen Massivholzes erinnert. Im Vergleich hierzu weisen die Scrimber-Bohlen eine wesentlich lebhaftere Oberflächentextur auf, in der die einzelnen, groben „Holzsplitter“ gut zu erkennen sind.

Als ein im weiteren Sinne als Holzwerkstoff zu klassifizierendes Material, das derzeit häufig im Stallbau eingesetzt wird, wurden Prüfkörper aus Bambus-Bohlen untersucht. Dieses Material wird - ähnlich wie Scrimber - über die Verklebung von Splittern bzw. Streifen von Bambushalmen mit Phenol-Formaldehyd-Klebstoff hergestellt. Die Textur dieser Bohlen ist zwischen der von BauBuche (streifig) und Scrimber (lebhaft) einzuordnen. Das Material „Bambus“ wurde aus Lagerbeständen der Röwer & Rüb GmbH zur Verfügung gestellt.



Abbildung 8: Oberflächenerscheinung der Werkstoffe (A) Buchen-Scrimber, (B) BauBuche und (C) Bambus.

Als Massivhölzer tropischen Ursprungs wurden Billinga (*Nauclea diderrichii*), Bongossi (*Lophira alata*), Denya (*Cylicodiscus gabunensis*) und Movingui (*Distemonanthus benthamianus*) untersucht. Weiter wurden die heimischen Hölzer Buche (*Fagus sylvatica*), Eiche (*Quercus spp.*), Lärche (*Larix spp.*) und Tanne (*Abies spp.*) untersucht. Neben den tropischen Holzarten finden für den Stallbau Eiche und Lärche Anwendung.

Das Tannenholz wurde in Form von unbesäumter Stammware des Mischsortiments Tanne/Fichte über den regionalen Holzhandel bezogen. Das im Projekt untersuchte Buchenholz wurde von verschiedenen Quellen bezogen:

Buche 1: Johann Hartkop e.K. (Schönberg), unbesäumte Bohlen

Buche 2: Holzwerk Keck, B. Keck GmbH (Ehningen/Böblingen), unbesäumte Bohlen

Buche 3: Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, besäumte und geschliffene Bohlen

Buche 4: KS Schlüter Im- und Export GmbH, Kanteln in ähnlichen Abmessungen wie Stallbohlen-Rohlinge

Im vorliegenden Bericht werden jedoch lediglich Versuchsergebnisse präsentiert, die an Prüfkörpern aus Holz des Baumes 1 des Lieferanten 1 (Buche 1.1) sowie Holz des Lieferanten 4 (Buche 4; ohne Unterscheidung von Bäumen, aus denen die Kanteln geschnitten wurden). Eine nähere Betrachtung der Bruchschlagarbeit von Buchenholz unterschiedlicher Bäume und Herkunftskollektive erfolgt in einem separaten Aufsatz (Benthien et al. 2019).

Alle übrigen Hölzer wurden in Form von Kanteln in ähnlichen Abmessungen wie Stallbohlen-Rohlinge von der KS Schlüter Im- und Export GmbH zur Verfügung gestellt. Eine Unterscheidung von Lieferchargen (z.B. Bongossi 1 und Bongossi 2) wird über eine dem Namen assoziierte Nummerierung angegeben.

2.3.3 Materialkennwerte

Als Materialkennwerte wurden die Rohdichte sowie die statischen und dynamischen Biegeeigenschaften bestimmt. Unter Biegeeigenschaften wird hier die Biegefestigkeit, der Biege-Elastizitätsmodul sowie die im Rahmen des Biegeversuches am Prüfkörper verrichtete und auf den Prüfkörperquerschnitt normierte Arbeit verstanden. Im Fall der statischen Prüfung wird die auf den Prüfkörperquerschnitt normierte Arbeit als Biegearbeit bezeichnet. Im Fall der dynamischen Prüfung wird von der Bruchschlagarbeit gesprochen. Für die Bruchschlagarbeit wird entsprechend der zu ihrer Berechnung berücksichtigten Datenbasis zwischen der Bruchschlagarbeit bis zum Erreichen der Bruchlast ($\text{Bruchschlagarbeit}_{F_{\max}}$) und der Bruchschlagarbeit bis zum Ende der Prüfung ($\text{Bruchschlagarbeit}_{\text{gesamt}}$) unterschieden:

- Rohdichte
- Statische Biegeeigenschaften
 - Statische Biegefestigkeit
 - Statischer Biege-Elastizitätsmodul
 - (Statische) Biegearbeit
- Dynamische Biegeeigenschaften
 - Dynamische Biegefestigkeit
 - Dynamische Biege-Elastizitätsmodul
 - (Dynamische) Bruchschlagarbeit
 - $\text{Bruchschlagarbeit}_{F_{\max}}$
 - $\text{Bruchschlagarbeit}_{\text{gesamt}}$

Die Unterscheidung zwischen $\text{Bruchschlagarbeit}_{F_{\max}}$ und $\text{Bruchschlagarbeit}_{\text{gesamt}}$ ist insbesondere dann wichtig, wenn Messwerte miteinander verglichen werden sollen, die mit unterschiedlichen Messvorrichtungen oder Messprinzipien ermittelt wurden (z.B. statische vs. dynamische Prüfung).

oder instrumentierter vs. nicht-instrumentierter Schlagbiegeversuch). Für die Berechnung der (statischen) Biegearbeit wurden ausschließlich die Daten bis zur Bruchlast berücksichtigt.

2.3.4 Prüfkörperabmessungen

Die statischen Biegeeigenschaften (Biegefestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul und Biegearbeit) wurden an Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ und $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ bestimmt. Zur Bestimmung der Biegeeigenschaften unter dynamischer Lasteinwirkung wurden Prüfkörper mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ verwendet. Darüber hinaus wurde an Prüfkörpern mit den Abmessungen $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ und $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ die Bruchschlagarbeit_{gesamt} bestimmt.

Für die Untersuchung des Einflusses des Auflagerabstandes auf die statischen Biegeeigenschaften sowie die (dynamische) Bruchschlagarbeit_{gesamt} wurde für Prüfkörper mit einer Kantenlänge der Querschnittsfläche von 40 mm die Prüfkörperlänge in der Weise angepasst, dass neben einem Auflagerabstand von 480 mm auch Auflagerabstände von 880 mm, 1.265 mm und 1.480 mm getestet werden konnten. Die entsprechenden Prüfkörperlängen betragen 600 mm, 1.100 mm, 1.580 mm und 1.850 mm. Für die Untersuchung des Einflusses der Prüfkörperdicke auf die (dynamische) Bruchschlagarbeit_{gesamt} wurde für Prüfkörper mit einer Länge von 1.581 mm (Auflagerabstand 1.265 mm) und Breite von 40 mm die Dicke variiert: 32 mm, 38 mm und 40 mm.

2.3.5 Bestimmungsmethoden

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte in Anlehnung an DIN EN 323:1993-08.

Die statischen Biegeeigenschaften an Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ wurden im Drei-Punkt-Biegebiegeversuch nach DIN 52186:1978-06 mit einem Auflagerabstand von 300 mm durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug entsprechend der Vorgabe zum Zeitraum in dem der Bruch zu erfolgen hat ($1,5 \pm 0,5 \text{ min}$) 7,2 ... 7,8 mm/min. Prüfkörper mit den Abmessungen $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ (sowie $1.100 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, $1.580 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ und $1.850 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) wurden mit einem Auflagerabstand von 480 mm (sowie 880 mm, 1.265 mm und 1.480 mm) und einer einheitlichen Prüfgeschwindigkeit von 7,2 mm/min (in Anlehnung an DIN EN 408:2012-10) geprüft. Der Durchmesser der Auflager sowie der Druckfinne betragen 30 mm. Die Biegearbeit wurde in beiden Fällen als die auf den Prüfkörperquerschnitt normierte Summe der aus den Rohdaten gebildeten Produkte von Prüfkraft und differenzieller Durchbiegung bis zum Erreichen der Bruchkraft (F_{max}) berechnet. Im Fall der Prüfkörper mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ wurden die Biegeenergie auch automatisch von der Software der Prüfmaschine berechnet. Die so erhaltenen Werte waren mit denen der oben beschriebenen Berechnung identisch.

Für die Bestimmung der Biegeeigenschaften unter dynamischer Lasteinwirkung (Schlagbiegung) an Prüfkörpern mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ kam ein instrumentiertes Pendelschlagwerk (CEAST Resil Impactor, Corporate Consulting, Service & Instruments, Inc. [CCSi], Akron, Ohio, USA) zur Anwendung. Der hier eingestellte Abstand der Widerlager betrug 105 mm, der Durchmesser der Widerlagerrollen 10 mm, der Durchmesser der gerundeten Hammerfinnen 5 mm. Es wurde ein 15-Joule-Hammer verwendet. Die Geschwindigkeit des Pendelhammers zum Zeitpunkt des Auftreffens auf den Prüfkörper betrug 3,7 m/s. Es wurden Messwerte mit einer Abtastrate von 2.000 kHz erfasst. Für die Berechnung des Biege-Elastizitätsmoduls wurde angenommen, dass sich der Prüfkörper im Bereich zwischen dem Minimalwert nach dem Peak des Beschleunigungsstoßes² im Kraft-Weg-Diagramm und 80 % der maximalen Bruchkraft (F_{max}) elastisch verformt. Die Bruchschlagarbeit wurde von der zur Prüfeinrichtung gehörenden Software „VisualImpact“ (Instron GmbH, Darmstadt) berechnet und zwar sowohl die auf den Prüfkörperquerschnitt normierte bis zum Bruch absorbierte Energie (Bruchschlagarbeit $_{F_{\text{max}}}$) als auch die bis zum Ende des Versuches auf den Prüfkörperquerschnitt normierte, vom Prüfkörper absorbierte Energie (Bruchschlagarbeit $_{\text{gesamt}}$). Prüfkörper mit den Abmessungen $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ wurden in Anlehnung an DIN 52189:1981-12 auf einem Pendelschlagwerk mit einem 150-Joule-Hammer (Masse = 12,3 kg, Fallhöhe = 1,24 m) und einem Widerlagerabstand von 240 mm geprüft. Die Geschwindigkeit des Pendelhammers zum Zeitpunkt des Auftreffens auf den Prüfkörper betrug 4,9 m/s. Prüfkörper mit den Abmessungen $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ (sowie $1.100 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, $1.580 \times 40 \times 32 \text{ mm}^3$, $1.580 \times 40 \times 38 \text{ mm}^3$, $1.580 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ und $1.850 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) wurden auf einem Pendelschlagwerk geprüft, dessen Pendelhammer infolge des Abstandes seines Schwerpunktes von der Drehachse von 1 m, einer Masse von 55 kg und einem Startwinkel von 103° (Fallhöhe 1,22 m) eine Schlagenergie von 658 Joule aufbringt. Die Geschwindigkeit des Pendelhammers zum Zeitpunkt des Auftreffens auf den Prüfkörper betrug 4,9 m/s. In Abhängigkeit der Prüfkörperlänge (600 mm, 1.100 mm, 1.580 mm und 1.850 mm) wurden Auflagerabstände von 480 mm, 880 mm, 1.265 mm und 1.480 mm eingestellt. Bei Anwendung der zwei zuletzt genannten Bestimmungsmethoden wurde die Bruchschlagarbeit über die Differenz der maximalen Auslenkwinkel vor und nach dem Durchschlagen der Prüfkörper (Differenz der potenziellen Energie) berechnet. Entsprechend handelt es sich hier um die auf den Probenquerschnitt normierte Gesamtenergie (inkl. Mitschleppen der Probe nach dem eigentlichen Bruchereignis), die im Zuge der Prüfung absorbiert wird (Bruchschlagarbeit $_{\text{gesamt}}$).

² Bröker und Salamon (1989) mit Verweis auf Kollmann (1951), Krech (1960), Müller-Roos und Richter (1979) und Helms et al. (1982)

2.3.6 Statistische Datenanalyse

Prüfung auf Normalverteilung

Alle Datensätze wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ auf Normalverteilung geprüft.

Eliminierung von Ausreißern

Die aufgenommenen Datensätze wurden mit Hilfe des Ausreißertests nach Grubbs oder der Quartilmethode von Ausreißern bzw. Extremwerten bereinigt. Im Fall der Quartilmethode wurden alle Messwerte aussortiert, die

- größer als die Summe von 75 %-Quantil und dem 1,5-fachen bzw.
- kleiner als die Differenz von 25 %-Quantil und dem 1,5-fachen

des Interquartilabstands waren. Als Interquartilsabstand (kurz IQR für engl. interquartile range) ist die Differenz zwischen dem 75 %-Quantil und dem 25 %-Quantil ($Q_{75\%} - Q_{25\%} = \text{IQR}$) zu verstehen.

Prüfung auf Mittelwertunterschiede

Die Prüfung, ob Mittelwerte sich signifikant voneinander unterscheiden, wurde mit Hilfe des Tukey-Kramer-HSD-Tests (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) durchgeführt.

Kennwerte für Literaturvergleich

Als Kennwerte der Materialeigenschaft für den Vergleich mit Literaturangaben wurden das 2,5 %- und 97,5 %-Quantil berechnet. Das Intervall zwischen diesen Quantilen umfasst 95 % aller Messwerte.

Verwendete Statistik-Software

Als Statistik-Software für die Prüfung auf Normalverteilung, für den Ausreißertest und den Mittelwertvergleich wurde JMP von SAS Institute (Cary, USA) verwendet. Die Berechnung von Mittelwert, Standardabweichung sowie Quantilen wurde mit Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, USA) durchgeführt. Zur Datenaufbereitung wurde die Software Matlab (MathWorks, Inc., Natick, USA) genutzt.

2.3.7 Rohdichte

Die Ergebnisse der Rohdichtebestimmung werden in Tabelle 4 aufgelistet. Die Angaben für das jeweilige Material werden hierbei neben der Liefercharge weiter nach der Prüfkörperserie aufgeschlüsselt, an der sie ermittelt wurden. Die Bezeichnung BS-20 steht hierbei für Bruchschlagarbeitsprüfkörper mit Querschnittsabmessungen von jeweils 20 mm. Die Bezeichnung BS-40 steht für Bruchschlagarbeitsprüfkörper mit Querschnittsabmessungen von jeweils 40 mm. Die Bezeichnung DIV steht für „diverse“, d.h. es handelt sich um einen gemittelten Wert über die Prüfkörper der statischen Biegeprüfung und Bruchschlagarbeitsprüfkörper mit den Querschnittsabmessungen von 10 mm. Ergänzend hierzu werden in Tabelle 4 weiter Literaturangaben zur Rohdichte der untersuchten Materialien aufgeführt.

Über den Vergleich der eigenen Versuchsergebnisse mit den jeweiligen Literaturangaben lässt sich erkennen, dass die Dichte von

- Bilinga leicht unter,
- Buche, Bongossi und Movingui im unteren Bereich,
- Denya im oberen Bereich,
- Eiche im unteren Bereich (Charge 1) bzw. unterhalb (Charge 2),
- Lärche und Bambus in der Mitte
- Tanne und BauBuche über

der angegebenen Spanne liegt. Da Scrimber eine Sonderanfertigung ist, können hierfür keine Literaturangaben angegeben werden.

Tabelle 4: Ergebnisse der Rohdichtebestimmung sowie für die untersuchten Materialien in der Literatur gemachte Angaben.

Material	Charge	Prüfkörperserie	Dichte (kg/m ³)		
			Eigene Messung ¹⁾	Spanne ²⁾	Literaturangabe Mittelwert
Bilinga	-	BS-20	707 (52)	730 - 870	-
		BS-40	726 (47)		
Buche	1.1	BS-20	716 (28)	700 - 900	-
	4	DIV	701 (37)		
Bongossi	1	BS-20	1.055 (33)	1.020 - 1.150	-
	1	BS-40	1.069 (25)		
	2	DIV	1.046 (41)		
Denya	-	BS-20	1.058 (29)	770 - 1.100 ³⁾	935 [960 ⁴⁾]
		BS-40	1.063 (19)		
Eiche	1	BS-20	678 (36)	650 - 760	-
	1	BS-40	650 (37)		
	2	DIV	579 (30)		
Lärche	-	BS-20	578 (26)	540 - 620	-
		BS-40	565 (38)		
Movingui	-	BS-20	680 (45)	660 - 820	-
		BS-40	694 (36)		
Tanne	-	DIV	576 (57)	430 - 480	-
Scrimber	-	DIV	949 (80)	-	-
BauBuche	1	BS-20	836 (34)		740 ⁵⁾ / 800 ⁶⁾
	1	BS-40	861 (20)		
	2	DIV	813 (32)		
Bambus	-	BS-20	1.163 (48)	1.070 - 1.240 ⁷⁾	1.160 (70) ¹⁾
		BS-40	1.197 (19)		

¹⁾ Mittelwert (Standardabweichung), ²⁾ Sell (1997) (lufttrocken), wenn nicht anders gekennzeichnet ³⁾ Wolters-Fahlenkamp (o.J.) (lufttrocken), ⁴⁾ von Wolters-Fahlenkamp (o.J.) hervorgehobener Wert, ⁵⁾ Blaß und Streib (2016), GL 70, ⁶⁾ Blaß und Streib (2016), Platte BauBuche S/Q, ⁷⁾ Benthien et al. (2012), Minimal und Maximalwerte, n = 10

2.3.8 Statische Biegeeigenschaften

Die Ergebnisse der Bestimmung der statischen Biegeeigenschaften werden in Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 9, Tabelle 10, Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgeführt. Für Prüfkörper mit den Abmessungen 360 x 20 x 20 mm³ werden für ausgewählte Materialien die statische Biegefestigkeit in Tabelle 5 und der statische Biege-Elastizitätsmodul in Tabelle 6 sowie, beide Eigenschaften kombiniert, in Tabelle 19 angegeben. Für Prüfkörper mit den Abmessungen 600 x 40 x 40 mm³ werden diese in Tabelle 19 aufgeführt. In Tabelle 20 wird die (statische) Biegearbeit für Prüfkörper beider Abmes-

sungen angegeben. In Tabelle 9 und Tabelle 10 werden die Biegeeigenschaften aufgeführt, die zur Bestimmung des Einflusses des Auflagerabstandes (Kapitel 2.3.8.4) untersucht wurden. Anhand der in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgeführten Biegeeigenschaften wird in einem der folgenden Unterkapitel der Einfluss der Prüfkörperabmessungen herausgearbeitet. Weiter werden die Eigenschaftsunterschiede zwischen den untersuchten Materialien sowie Abweichung der ermittelten Eigenschaften von Literaturangaben untersucht.

2.3.8.1 Eigenschaftsunterschiede zwischen den Materialien

Der Vergleich von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul ausgewählter Holzarten und Holzwerkstoffe untereinander wurde an Daten vorgenommen, die im Zuge der statischen Prüfung von Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ ermittelt wurden. Tabelle 5 listet hierzu die Biegefestigkeit, Tabelle 6 das ermittelte Biege-Elastizitätsmodul auf. In beiden Tabellen werden die jeweiligen Ergebnisse der statistischen Analyse, das Intervall, in dem 95 % aller Messwerte zu erwarten sind, sowie das 5 %-Quantil aufgeführt. Die ermittelte Biegearbeit wird in Tabelle 20 angegeben.

Tabelle 5: Statische Biegefestigkeit (Mittelwert und Variationskoeffizient), Ergebnis des Mittelwertvergleichs (homogene Gruppe), Intervallgrenzen innerhalb der 95 % aller Messwerte zu erwarten sind sowie 5 %-Quantil ausgewählter Materialien mit Prüfkörperabmessungen von $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$.

Material	Mittelwert (N/mm ²)	VarKoeff (%)	HG	5 %-Quantil (N/mm ²)	2,5 %-Quantil (N/mm ²)	97,5 %-Quantil (N/mm ²)
Buche 4	98,5	12,3	C	84,7	83,8	118,3
Bongossi 2	113,3	24,5	ABC	80,9	74,7	163,7
Eiche 2	61,4	9,6	D	55,4	51,5	71,5
Tanne	100,1	9,0	B	88,6	87,4	116,6
Scrimber	68,5	26,6	D	48,3	45,8	105,6
BauBuche 2	122,5	10,7	A	108,3	97,8	141,8

VarKoeff = Variationskoeffizient, HG = homogene Gruppe

Die Biegefestigkeit von Eiche und Scrimber wurde auf Basis der statistischen Datenanalyse als signifikant niedriger als die der anderen untersuchten Materialien identifiziert. Die Biegefestigkeiten von Buche, Tanne und BauBuche waren zwar signifikant unterschiedlich, liegen jedoch alle im Bereich von $110 \pm 13 \text{ N/mm}^2$. Die Biegefestigkeit von Bongossi lässt sich aufgrund der Streubreite der Messwerte statistisch nicht von der Biegefestigkeit der drei zuvor genannten Materialien unterscheiden. Die starke Streuung der Messwerte (Variationskoeffizient > 20 %) im Fall von Bongossi und Scrimber wird vom 5 %-Quantil der Biegefestigkeit widerspiegelt: der Wert von Scrimber liegt unter dem von Eiche; der von Bongossi liegt unter dem der Materialien Buche,

Tanne und BauBuche. Die größte Biegefestigkeit und – aufgrund der vergleichsweise niedrigen Variation der Messwerte – das größte 5 %-Quantil weist BauBuche auf.

Tabelle 6: Statischer Biege-Elastizitätsmodul (Mittelwert und Variationskoeffizient), Ergebnis des Mittelwertvergleichs (homogene Gruppe), Intervallgrenzen innerhalb der 95 % aller Messwerte zu erwarten sind sowie 5 %-Quantil ausgewählter Materialien mit Prüfkörperabmessungen von 360 x 20 x 20 mm³.

Material	Mittelwert (N/mm ²)	VarKoeff (%)	HG	5 %-Quantil (N/mm ²)	2,5 %-Quantil (N/mm ²)	97,5 %-Quantil (N/mm ²)
Buche 4	10.317	12,5	C	8.593	8.360	12.365
Bongossi 2	12.408	20,1	AB	9.275	9.040	16.557
Eiche 2	6.848	12,8	D	5.642	4.838	7.838
Tanne	11.841	18,2	BC	8.815	8.779	15.244
Scrimber	11.942	23,1	ABC	7.270	7.088	16.402
BauBuche 2	13.609	7,4	A	12.518	12.185	15.392

VarKoeff = Variationskoeffizient, HG = homogene Gruppe

Der Biege-Elastizitätsmodul von Eiche wurde auf Basis der statistischen Datenanalyse als signifikant niedriger als der Biege-Elastizitätsmodul der anderen Materialien identifiziert. Die Biege-Elastizitätsmodule der anderen Materialien lassen sich zwar gelegentlich voneinander unterscheiden, jedoch liegen alle im Bereich von 12.000 ± 1.700 N/mm². Ähnlich wie im Fall der Biegefestigkeit ist auch die Streubreite der Messwerte von Bongossi und Scrimber auffällig groß (Variationskoeffizient > 20 %). Die große Streuung (Bongossi und Scrimber) bzw. die geringe Streuung in Kombination mit ohnehin schon dem größten Biege-Elastizitätsmodul im Fall von BauBuche spiegelt sich auch im 5 %-Quantil wider: das 5 %-Quantil von BauBuche ist mit Abstand das Größte der untersuchten Materialien.

Die Biegearbeit von Eiche (17,3 kJ/m²) und Scrimber (17,0 kJ/m²) war signifikant niedriger als die der übrigen Materialien. Weiter lassen sich die Biegearbeit von BauBuche (31,7 kJ/m²) und Bongossi (31,0 kJ/m²) statistisch von der von Buche (42,4 kJ/m²) unterscheiden. Die Biegearbeit von Tanne (40,0 kJ/m²) ist weder von der von Buche, noch von der von BauBuche und Bongossi zu unterscheiden. Die 5 %-Quantile der Biegearbeit wurden für Buche auf 27,3 kJ/m², Bongossi auf 10,3 kJ/m², Eiche auf 11,1 kJ/m², Tanne auf 25,5 kJ/m², Scrimber auf 8,5 kJ/m² und BauBuche auf 24,2 kJ/m² berechnet.

2.3.8.2 Vergleich mit Literaturwerten

Für den Vergleich der an ausgewählten Materialien ermittelten Biegeeigenschaften mit Literaturangaben wurden Ergebnisse von Prüfkörpern mit den Abmessungen 360 x 20 x 20 mm³ herangezogen. Die für die Untersuchung auf Abweichungen vom Literaturwert relevanten Werte (Inter-

vallgrenzen, innerhalb der 95 % aller Messwerte zu erwarten sind) wurden in Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgeführt. Tabelle 7 listet Literaturangaben für die Mehrzahl der betrachteten Materialien auf.

Tabelle 7: Für ausgewählte Hölzer und Holzwerkstoffe in der Literatur angegebene Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul.

Material	Biegefestigkeit (N/mm ²)	Biege-Elastizitätsmodul (N/mm ²)
Buche	111 (9) ^{a)}	15.300 (1.050) ^{a)}
Bongossi	162 (21) ^{a)}	21.420 (3.539) ^{a)}
Eiche	105 (15) ^{a)}	13.300 (1.750) ^{a)}
Tanne	80 (9) ^{a)}	14.300 (3.000) ^{a)}
BauBuche ^{b)}	ca. 115 ^{c)}	16.700 ^{d)}

^{a)} Gérard et al. (2011), ^{b)} BauBuche GL 70, ^{c)} nach Ablesung aus Bild 1a in Dill-Langer und Aicher (2015), ^{d)} Blaß und Streib (2016) für GL 70 hochkant

In Tabelle 8 werden in Sell (1997) angegebene Bereiche für Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul ausgewählter Hölzer aufgeführt. Ein Abgleich der in Tabelle 7 aufgeführten Biegeeigenschaften (Literaturangaben) mit den in Tabelle 8 aufgeführten Bereichen von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul zeigt, dass mit Ausnahme der für Bongossi angegebenen Biegefestigkeit (liegt jedoch nur sehr knapp unterhalb der angegebenen Spanne) alle anderen Werte innerhalb der angegebenen Biegeeigenschaftsspanne liegen.

Tabelle 8: Für ausgewählte Hölzer von Sell (1997) angegebene Bereiche für Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul.

Material	Biegefestigkeit (N/mm ²)	Biege-Elastizitätsmodul (N/mm ²)
Buche	90 ... 125 N/mm ²	12.300 ... 16.400 N/mm ²
Bongossi	165 ... 240 N/mm ²	15.000 ... 21.600 N/mm ²
Eiche	86 ... 108 N/mm ²	10.500 ... 14.500 N/mm ²
Tanne	62 ... 74 N/mm ²	10.000 ... 14.500 N/mm ²

Beim Vergleich der ermittelten Biegefestigkeiten mit den in der Literatur angegebenen Werten (Tabelle 7) zeigt sich, dass die Biegefestigkeit des untersuchten Eichenholzes signifikant unter dem in der Literatur angegebenen Wert liegt. Ebenso liegt die ermittelte Biegefestigkeit des untersuchten Eichenholzes unterhalb des von Sell (1997) angegebenen Festigkeitsbereiches.

Im Fall des Biege-Elastizitätsmoduls passt allein der ermittelte Wert für Tanne mit den Literaturangaben zusammen; für alle anderen Hölzer liegen die ermittelten Werte signifikant unter den Literaturangaben.

2.3.8.3 Einfluss der Prüfkörpergröße

Der Einfluss der Prüfkörpergröße (gleichzeitige Variation von Länge, Breite und Dicke) auf die statischen Biegeeigenschaften wurde an Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ und $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ untersucht. Die Ergebnisse der Bestimmung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul sowie der statistischen Datenanalyse sind in Tabelle 19 aufgeführt. Die ermittelten Biegearbeiten sowie die Ergebnisse der statistischen Datenanalyse werden in Tabelle 20 angegeben.

Für die statische Biegefestigkeit wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messwerten an Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ und $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ gefunden. Die Prüfkörpergröße hatte somit keinen Einfluss auf die statische Biegefestigkeit. Im Fall des statischen Biege-Elastizitätsmoduls wurden für Tanne und BauBuche signifikante Unterschiede zwischen den Werten festgestellt, die an Prüfkörpern unterschiedlicher Größe ermittelt wurden. Hierbei war der Biege-Elastizitätsmodul von Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ signifikant größer als der von Prüfkörpern mit den Abmessungen $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ (Tanne: 11.841 N/mm^2 vs. 9.376 N/mm^2 , BauBuche 13.609 N/mm^2 vs. 11.860 N/mm^2).

Die Biegearbeit von Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ war für alle Materialien signifikant kleiner als die von Prüfkörpern mit den Abmessungen $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. Die Biegearbeit von Prüfkörpern mit den Abmessungen $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ überstieg die Biegearbeit von Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ um 32 % (Tanne) bis 89 % (BauBuche).

2.3.8.4 Einfluss des Auflagerabstands

Der Einfluss des Auflagerabstands (Variation der Prüfkörperlänge) auf die statischen Biegeeigenschaften wurde an Prüfkörpern aus BauBuche und Scrimber mit einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und Längen von 600 mm, 1.100 mm, 1.581 mm und 1.850 mm untersucht. Die Ergebnisse der Biegeeigenschaftsbestimmung und der statistischen Datenanalyse sind in Tabelle 9 (BauBuche) und Tabelle 10 (Scrimber) aufgeführt.

Tabelle 9: Statische Biegeeigenschaften von Prüfkörpern aus BauBuche mit einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und Längen von 600 mm, 1.100 mm, 1.581 mm und 1.850 mm für Auflagerabstände von 480 mm, 880 mm, 1.265 mm und 1.480 mm sowie Ergebnisse der statistischen Datenanalyse (Mittelwertvergleich).

Auflagerabstand	Biegefestigkeit (N/mm ²)	Biege-Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Biegearbeit (kJ/m ²)
480 mm	126,2 (7,8) A	11.860 (455) C	64,7 (6,9) C
880 mm	119,9 (8,8) AB	15.177 (582) B	76,2 (12,2) C
1.265 mm	117,3 (6,5) B	15.682 (501) AB	93,8 (12,8) B
1.480 mm	118,7 (9,7) B	16.097 (997) A	110,7 (17,5) A

angegebene Werte: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe

Für die statische Biegefestigkeit wurden im Fall von BauBuche signifikante Unterschiede festgestellt, wenn sich die Auflagerabstände stark voneinander unterschieden (480 mm vs. 1.265 mm bzw. 1.480 mm). Keine Unterschiede bestanden zwischen kleinen (480 mm und 880 mm) und großen (880 mm, 1.265 mm und 1.480 mm) Auflagerabständen. Gleiches gilt im Fall von Scrimber, jedoch war im Gegensatz zu BauBuche hier die Biegefestigkeit bei kleinem Auflagerabstand kleiner als die bei großem Auflagerabstand (gegenteiliger Zusammenhang). Der statische Biege-Elastizitätsmodul stieg sowohl für BauBuche als auch für Scrimber mit zunehmendem Auflagerabstand signifikant an.

Sowohl für die Biegearbeit von BauBuche als auch für die Biegearbeit von Scrimber stieg mit steigendem Auflagerabstand signifikant an.

Tabelle 10: Statische Biegeeigenschaften von Prüfkörpern aus Scrimber mit einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und Längen von 600 mm und 1.581 mm für Auflagerabstände von 480 mm und 1.265 mm sowie Ergebnisse der statistischen Datenanalyse (Mittelwertvergleich).

Auflagerabstand (mm)	Biegefestigkeit (N/mm ²)	Biege-Elastizitätsmodul (N/mm ²)	Biegearbeit (kJ/m ²)
480	72,7 (21,2) B	12.375 (2.284) B	72,1 (19,2) B
1.265	97,8 (23,6) A	17.116 (1.704) A	89,7 (38,4) A

angegebene Werte: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe

2.3.8.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der statischen Biegeeigenschaftsbestimmung

- Für die statische Biegefestigkeit und das statische Biege-Elastizitätsmodul von Bongossi und Scrimber wurde eine deutlich größere Streuung der Messwerte als für die übrigen untersuchten Materialien festgestellt. Dies spiegelt sich insbesondere in den 5 %-Quantilwerten wider: für Bongossi und Scrimber wurden hier deutlich niedrigere Werte gefunden, als es die Eigenschaftsmittelwerte erwarten lassen.
- Für Eiche wurde über alle untersuchten Materialien die geringsten statischen Biegeeigenschaftswerte ermittelt. Mit Blick auf die für Eiche in der Literatur angegebenen Eigenschaftswerte (signifikant höher) ist anzunehmen, dass das untersuchte Eichenholz ungewöhnlich schlechte Eigenschaften hatte und weit hinter seinen Möglichkeiten zurückgeblieben ist.
- Mit Ausnahme von Tanne war das statische Biege-Elastizitätsmodul aller Materialien kleiner als der in der Literatur angegebene Wert.
- Die Prüfkörpergröße wurde vornehmlich als einflusslos auf die statische Biegefestigkeit und den statischen Biege-Elastizitätsmodul gefunden. Hingegen war die (statische) Biegearbeit von der Prüfkörpergröße beeinflusst.

2.3.9 Dynamische Biegeeigenschaften

Die Ergebnisse der Bestimmung der dynamischen Biegeeigenschaften werden in Tabelle 11 bis Tabelle 20 aufgeführt. Die dynamische Biegefestigkeit (Schlagbiegefestigkeit) und der dynamische Biege-Elastizitätsmodul (Schlagbiege-Elastizitätsmodul) für Prüfkörper mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ werden in Tabelle 19 angegeben. Ergänzend hierzu werden in Tabelle 15 Biege-Elastizitätsmodule angegeben und miteinander verglichen, die zur Untersuchung des Einflusses der ausgewählten Datenbasis berechnet wurden (Kapitel 2.3.9.6). Eine Auflistung der 5 %-Quantile der dynamischen Biegefestigkeit und des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls erfolgt in Kapitel 2.3.9.1 (Tabelle 11).

In Tabelle 13 wird für ausgewählte Materialien die „Bruchschlagarbeit bis zum Ende der Prüfung“ (Bruchschlagarbeit_{gesamt}) von Prüfkörper mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ angegeben; in Tabelle 20 die „Bruchschlagarbeit bis zum Erreichen der Bruchlast“ (Bruchschlagarbeit_{Fmax}). In Tabelle 16 wird ein Vergleich der Bruchschlagarbeit_{gesamt} und Bruchschlagarbeit_{Fmax} vorgenommen (Kapitel 2.3.9.7).

Neben der Bruchschlagarbeit_{gesamt} von Prüfkörper mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ wird in Tabelle 13 auch die Bruchschlagarbeit_{gesamt} für Prüfkörper mit den Abmessungen $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ und $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ aufgeführt. Ein Vergleich der hier aufgeführten Daten mit dem Ziel

den Einfluss der Prüfkörperabmessungen herauszuarbeiten, wird in Kapitel 2.3.9.4 vorgenommen.

In Kapitel 2.3.9.2 wird jedoch zunächst noch überprüft, ob für gleiche Prüfkörperabmessungen signifikante Unterschiede zwischen den Materialien zu erkennen sind (Tabelle 12).

In Kapitel 2.3.9.5 wird die an Prüfkörpern mit den Abmessungen $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ ermittelte Bruchschlagarbeit_{gesamt} mit Literaturangaben abgeglichen.

Anhand der in Tabelle 17 aufgeführten Bruchschlagarbeit_{gesamt} für Prüfkörper aus BauBuche mit den Kantenlänge der Querschnittsfläche von 40 mm und Prüfkörperlängen von 600 mm, 1.100 mm, 1.580 mm und 1.850 mm wird in Kapitel 2.3.9.8 der Einfluss des Auflagerabstandes herauszuarbeitet. Anhand der in Tabelle 18 aufgeführten Bruchschlagarbeit_{gesamt} für Prüfkörper aus BauBuche mit einer Länge von 1.580 mm und variierender Prüfkörperdicke von 32 mm, 38 mm und 40 mm wird in Kapitel 2.3.9.9 der Einfluss der Prüfkörperdicke herauszuarbeitet.

2.3.9.1 Die 5 %-Quantile der dynamischen Biegefestigkeit und des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls

Während in Tabelle 19 Mittelwert und Standardabweichung für die dynamische Biegefestigkeit (Schlagbiegefestigkeit) und den dynamischen Biege-Elastizitätsmodul (Schlagbiege-Elastizitätsmodul) für Prüfkörper mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ angegeben sind, wird das entsprechende 5 %-Quantil der Vollständigkeit halber in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: 5 %-Quantile der dynamischen Biegefestigkeit (Schlagbiegefestigkeit) und des dynamische Biege-Elastizitätsmoduls (Schlagbiege-Elastizitätsmodul) von Prüfkörpern ausgewählter Materialien und Abmessungen von $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$.

Material	5 %-Quantil	
	(Schlag-) Biegefestigkeit (N/mm ²)	(Schlag-) Biege-Elastizitätsmodul (N/mm ²)
Buche 4	101,6	5.397
Bongossi 2	118,5	6.285
Eiche 2	53,2	3.702
Tanne	91,4	6.624
BauBuche 2	115,2	9.477

2.3.9.2 Unterschiede der Bruchschlagarbeit_{gesamt} zwischen den Materialien innerhalb einer Probengröße

Während in Tabelle 13 Mittelwert und Standardabweichung angegeben werden und ein Vergleich der Bruchschlagarbeit_{gesamt} für jeweils ein Material über die unterschiedlichen Prüfkörperabmessungen vorgenommen wird, so wird in diesem Kapitel zunächst überprüft, ob für gleiche Prüfkörperabmessungen Unterschiede zwischen den Materialien zu erkennen sind (Tabelle 12).

Tabelle 12: Ergebnisse der Prüfung auf Mittelwertunterschiede (homogene Gruppen) zwischen den untersuchten Materialien innerhalb gleicher Prüfkörperabmessungen.

Material	Charge	Prüfkörperabmessungen		
		300 x 20 x 20 mm ³	600 x 40 x 40 mm ³	180 x 10 x 10 mm ³
Bilinga	-	C	DE	-
Buche	1.1	BC	-	-
	4	-	ABC	B
Bongossi	1	AB	BC	
	2	-	AB	A
Denya	-	A	AB	-
Eiche	1	C	E	-
	2	-	E	D
Lärche	-	C	DE	-
Movingui	-	AB	AB	-
Tanne	-	-	CD	C
Scrimber	-	AB	AB	-
BauBuche	1	AB	AB	-
	2	-	BC	BC
Bambus	-	A	A	-

Aus den in Tabelle 12 aufgelisteten homogenen Gruppen der Mittelwertanalyse ist zu erkennen, dass innerhalb gleicher Prüfkörperabmessungen Unterschiede zwischen den Materialien bestehen.

Für Prüfkörperabmessungen von 300 x 20 x 20 mm³ lassen sich drei Materialgruppen ähnlicher Schlagzähigkeit finden:

- 1. Gruppe (höchste Schlagzähigkeit): Denya und Bambus
- 2. Gruppe: Buche, Bongossi, Movingui, Scrimber und BauBuche
- 3. Gruppe: Bilinga, Eiche, Lärche

Für Prüfkörperabmessungen von $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ lassen sich fünf Materialgruppen ähnlicher Schlagzähigkeit finden:

- 1. Gruppe (höchste Schlagzähigkeit): Bambus
- 2. Gruppe: Denya, Movingui, Scrimber und BauBuche
- 3. Gruppe: Buche und Bongossi
- 4. Gruppe: Tanne
- 5. Gruppe: Bilinga, Eiche und Lärche

Aufgrund der geringeren Anzahl geprüfter Materialien für die Prüfkörperabmessungen von $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ erscheint eine wie zuvor vorgenommene Gruppierung weniger aussagekräftig zu sein, soll der Vollständigkeit halber aber dennoch vorgenommen werden:

- 1. Gruppe (höchste Schlagzähigkeit): Bongossi
- 2. Gruppe: Buche, (Tanne) und BauBuche
- 3. Gruppe: Eiche und (Tanne)

Für die Ergebnisse der Zuordnung der Materialien in Gruppen ähnlicher Schlagzähigkeit lassen sich über die Prüfkörperabmessungen Gemeinsamkeiten erkennen: Bambus, die schweren Tropenhölzer sowie Buche und BauBuche sind stets den Materialien hoher Schlagzähigkeit zugeordnet, während die Schlagzähigkeit von Bilinga, Eiche, Lärche und Tanne darunter liegt.

2.3.9.3 Staffelnung der untersuchten Materialien nach dem 5 %-Quantil der Bruchschlagarbeit_{gesamt}

Die in Kapitel 2.3.9.2 vorgenommene, nach der Höhe des Wertes ihrer Schlagzähigkeit gestaffelte Gruppierung der untersuchten Materialien ist für einen Vergleich des Leistungsvermögens unter praktischen Gesichtspunkten nicht optimal. Anders als bei der Betrachtung von Mittelwerten (und Standardabweichung) wird die Streubreite der Materialeigenschaft bei der Betrachtung der 5 %-Quantile unter praxisnäheren Gesichtspunkten berücksichtigt. Das 5 %-Quantil gibt für eine normalverteilte Eigenschaft den Wert an, der in nur 5 % aller Fälle unterschritten, in 95 % aller Fälle jedoch erreicht wird. Werden für einen Vergleich der Materialeigenschaften die 5 %-Quantile herangezogen, so erfolgt der Vergleich auf Basis einer einheitlichen Ausfallwahrscheinlichkeit. Ein Material mit einer engen Eigenschaftsverteilung wird einen höheren 5 %-Quantilwert aufweisen, als ein Material mit breiter Eigenschaftsverteilung, auch wenn die Eigenschaft der Materialien über ihre Mittelwerte nicht unterscheiden lassen. Das bedeutet für die Praxis, dass die Leistungsfähigkeit eines Materials mit enger Eigenschaftsverteilung effektiv größer ist, als die Leistungsfähigkeit eines Materials mit breiter Eigenschaftsverteilung, auch wenn beide Materialien keinen Unterschied beim Vergleich des Eigenschaftsmittelwertes zeigen.

Auf Basis der in Tabelle 13 angegebenen 5 %-Quantilwerte für die Bruchschlagarbeit_{gesamt} von Prüfkörpern mit den Abmessungen 300 x 20 x 20 mm³ werden die untersuchten Materialien im Folgenden ihrer Schlagzähigkeit gruppiert gestaffelt aufgeführt:

- 1. Gruppe (höchste Schlagzähigkeit): Bambus, Scrimber und Baubuche; 57,3...60,3 kJ/m²
- 2. Gruppe: Buche, Bilinga, Movingui; 28,8... 34,8 kJ/m²
- 3. Gruppe: Bongossi, Denya, Lärche; 21,2... 19,0 kJ/m²
- 4. Gruppe: Eiche; 14,7 kJ/m²

Für Tanne wurde die Bruchschlagarbeit_{gesamt} an Prüfkörpern mit den Abmessungen 300 x 20 x 20 mm³ nicht bestimmt. Auf Basis der 5 %-Quantilwerte für die Bruchschlagarbeit_{gesamt} von Prüfkörpern mit den Abmessungen 600 x 40 x 40 mm³ wäre Tanne vermutlich in Gruppe 3 einzuordnen.

Offensichtlich bei der Gruppierung der Materialien nach dem 5 %-Quantilwert der Bruchschlagarbeit wird, dass insbesondere die Holzwerkstoffe die höchsten Schlagzähigkeiten aufweisen, Holzarten wie Bongossi und Denya aufgrund ihrer großen Eigenschaftsschwankungen im Vergleich zu den erzielten Mittelwerten verhältnismäßig schwach abschneiden.

2.3.9.4 Unterschiede in der Bruchschlagarbeit_{gesamt} zwischen den Prüfkörpern verschiedener Abmessungen innerhalb eines Materials

In Tabelle 13 werden die Bruchschlagarbeiten_{gesamt} ausgewählter Materialien angegeben, die für jedes Material an Prüfkörpern unterschiedlicher Abmessungen bestimmt wurden. Ein statistischer Mittelwertvergleich wurde jeweils innerhalb eines Materials über die Prüfkörperabmessungen durchgeführt, um so deren Einfluss auf die Bruchschlagarbeit erkennen zu können. Wenn verfügbar, wurden darüber hinaus innerhalb eines Materials Messwiederholungen (gleiche Prüfkörperabmessung) in den Mittelwertvergleich einbezogen, um so eine grobe Vorstellung von der Robustheit der Methode bzw. der Homogenität der Materialqualität über die Chargen (beide Einflussfaktoren lassen sich mit dem gewählten Versuchsaufbau nicht voneinander trennen) zu bekommen.

Tabelle 13: Bruchschlagarbeit_{gesamt} (Mittelwert, Standardabweichung und 5 %-Quantil) für Prüfkörper ausgewählter Materialien, verschiedener Abmessungen und Chargen sowie statistischer Mittelwertvergleich für jeweils ein Material über die Prüfkörperabmessungen.

Holzart bzw. Holzwerkstoff	Charge	Kantenlänge des Querschnitts (mm)	Prüfkörperlänge (bzw. Stützweite) (mm)	Bruchschlagarbeit _{gesamt} (kJ/m ²)	5 %-Quantil (kJ/m ²)
Bilinga	-	20	300 (240)	39,0 (8,2) B	29,1
	-	40	600 (480)	74,6 (16,9) A	48,6
Buche	4	10	180 (105)	38,2 (6,9) B	28,5
	1.1	20	300 (240)	52,2 (12,9) B	34,8
	4	40	600 (480)	140,0 (42,6) A	84,9
Bongossi	2	10	180 (105)	53,5 (18,6) B	24,5
	1	20	300 (240)	76,5 (51,8) B	19,5
	1	40	600 (480)	123,2 (62,0) A	58,4
	2	40	600 (480)	163,8 (81,5) A	72,5
Denya	-	20	300 (240)	80,3 (40,9) B	21,2
	-	40	600 (480)	153,4 (63,0) A	63,0
Eiche	2	10	180 (105)	16,0 (3,7) C	11,2
	1	20	300 (240)	29,4 (11,4) B	14,7
	1	40	600 (480)	58,2 (23,4) A	32,2
	2	40	600 (480)	38,4 (15,6) A	22,6
Lärche	-	20	300 (240)	35,7 (18,3) B	19,0
	-	40	600 (480)	68,3 (22,3) A	38,4
Movingui	-	20	300 (240)	75,6 (37,1) B	28,8
	-	40	600 (480)	159,4 (40,1) A	115,7
Tanne	-	10	180 (105)	27,2 (6,4) B	19,7
	-	40	600 (480)	102,7 (30,2) A	65,3
Scrimber	-	20	300 (240)	78,2 (16,7) B	57,3
	-	40	600 (480)	165,2 (19,6) A	137,4
BauBuche	2	10	180 (105)	31,9 (5,6) C	21,0
	1	20	300 (240)	67,0 (7,9) B	57,3
	1	40	600 (480)	147,1 (16,2) A	128,5
	2	40	600 (480)	131,7 (21,4) A	97,6
Bambus	-	20	300 (240)	91,7 (20,6) B	60,3
	-	40	600 (480)	180,2 (38,5) A	137,6

Bruchschlagarbeit: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe

Für alle Materialien wurde ein signifikanter Anstieg der Bruchschlagarbeit mit steigenden Prüfkörperabmessungen von 300 x 20 x 20 mm³ auf 600 x 40 x 40 mm³ gefunden. Kein signifikanter

Unterschied war für Buche und Bongossi erkennbar, wenn eine Reduktion der Prüfkörperabmessungen von $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ auf $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ vorlag; für Eiche und BauBuche hingegen schon. Zwischen den Materialchargen wurden im Rahmen des statistischen Mittelwertvergleichs keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

2.3.9.5 Vergleich der ermittelten Bruchschlagarbeit mit Literaturangaben

Ein Vergleich der ermittelten Bruchschlagarbeit mit Literaturangaben wird anhand der Bruchschlagarbeit_{gesamt} vorgenommen (Tabelle 14), die an Prüfkörpern mit den Abmessungen $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ ermittelt wurden. Als Literaturangaben werden von Sell (1997) zusammengestellte Werte herangezogen. Als Bereich der ermittelten Bruchschlagarbeit_{gesamt} wird als untere Grenze das 2,5 %-Quantil und als Obergrenze das 97,5 %-Quantil angenommen. Der Bereich zwischen dem 2,5 %-Quantil und dem 97,5 %-Quantil umfasst 95 % aller Messwerte. Überprüft wird, ob der Mittelwert der Bruchschlagarbeit_{gesamt} im Bereich der von Sell angegebenen Bereiche liegt.

Tabelle 14: Für Prüfkörper mit den Abmessungen $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ bestimmte Bruchschlagarbeit_{gesamt} (Mittelwert, 2,5 %-Quantil, 97,5 %-Quantil) sowie von Sell (1997) aufgeführte Bruchschlagarbeit.

Holzart	Bruchschlagarbeit _{gesamt}			Bruchschlagarbeit nach Sell (1997) (kJ/m ²)
	2,5 %-Quantil (kJ/m ²)	Mittelwert (kJ/m ²)	97,5 %-Quantil (kJ/m ²)	
Bilinga	28,1	39,0	52,9	30... 40
Buche	34,7	52,2	73,1	80... 120
Bongossi	18,3	76,5	161,7	90... 150
Denya	13,0	80,3	152,8	-
Eiche	13,5	29,4	47,6	50... 74
Lärche	13,2	35,7	74,8	50... 75
Movingui	24,2	75,6	150,3	(35)... 69

Für Bilinga und Bongossi liegt der Mittelwert für die Bruchschlagarbeit_{gesamt} in dem von Sell für die Holzarten angegebenen Bereich. Die Bruchschlagarbeiten_{gesamt} von Buche und Eiche liegen hingegen unter den von Sell angegebenen Bruchschlagarbeiten; nicht einmal die 97,5 %-Quantile erreichen die von Sell angegebenen Daten. Im Fall von Movingui liegt der Mittelwert für die Bruchschlagarbeit_{gesamt} oberhalb des von Sell angegebenen Bereichs der Bruchschlagarbeit. Eine Überschneidung der Eigenschaftsbereiche ist jedoch gegeben, da das 2,5 %-Quantil unterhalb des von Sell angegebenen Bereiches ist.

2.3.9.6 Einfluss der gewählten Datenbasis auf das Ergebnis der Berechnung des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls

Die Berechnung des Biege-Elastizitätsmoduls erfolgt auf Basis der Steigung einer Geraden, die im linear-elastischen Bereich der Biegekurve im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm angepasst wird. Für die Bestimmung des statischen Biege-Elastizitätsmoduls wird die Lage der Geraden so gewählt, dass sie die Biegekurve bei 10 % und 40 % der Bruchlast (F_{\max}) schneidet (Abbildung 9). Während im Zuge des statischen Biegeversuchs stets Kraft- und Durchbiegungsdaten generiert werden und somit zur Berechnung des Biege-Elastizitätsmoduls herangezogen werden, erfolgt dies im Fall der (dynamischen) Schlagbiegeprüfung nur bei Instrumentierung des Versuchsaufbaus. Aufgrund einer andersartigen Charakteristik des Kurvenverlaufes (Beschleunigungsstoß, gefolgt von der eigentlichen Durchbiegung unter Lasteinwirkung sowie einem insgesamt unruhigeren Verlauf der Biegekurve; Abbildung 10) ist das Anpassen einer Geraden nicht in gleicher Weise durchzuführen; für die Berechnung des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls ist es entscheidend, welcher Datenabschnitt als Berechnungsbasis herangezogen wird.

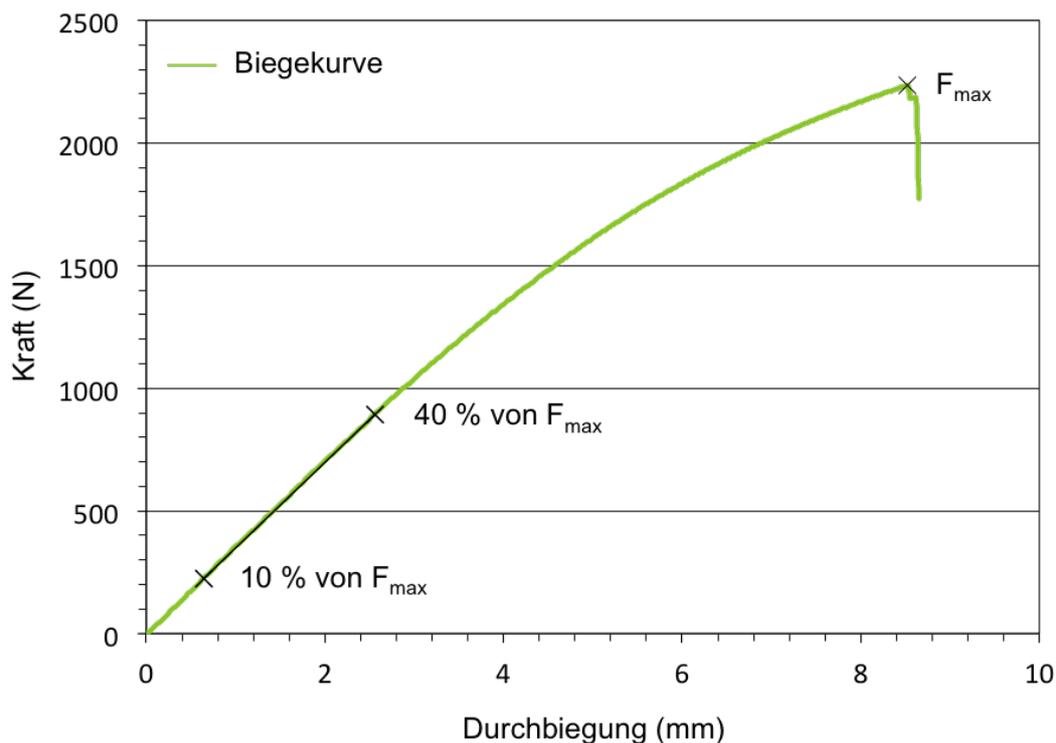


Abbildung 9: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit typischer Biegekurve eines statischen Biegeversuches.

Um eine fundierte Entscheidung treffen zu können, welcher Datenabschnitt für die Bestimmung des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls herangezogen werden soll, wurde in diesem Kapitel

die Berechnung des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls auf Basis vier verschiedener Datensätze durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Als erster Schnittpunkt mit der Biegekurve wurde hierfür entweder der Koordinatenursprung oder das Kraftminimum zwischen dem Kraftmaximum des Beschleunigungsstoßes und der eigentlichen Biegekurve ausgewählt. Der zweite Schnittpunkt mit der Biegekurve wurde auf 80 % von F_{\max} oder F_{\max} selbst festgelegt. Entsprechend lassen sich folgende Bereiche im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm definieren, die zur Berechnung des Biege-Elastizitätsmoduls herangezogen werden:

- Minimum nach Beschleunigungsstoß und 80 % von F_{\max}
- Minimum nach Beschleunigungsstoß und F_{\max}
- Koordinatenursprung und 80 % von F_{\max}
- Koordinatenursprung und F_{\max}

Die Ergebnisse des auf diese Weisen bestimmten Schlagbiege-Elastizitätsmoduls für Prüfkörper mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ werden in Tabelle 15 aufgelistet und für jedes Material miteinander verglichen.

Die statistische Analyse der ermittelten Schlagbiege-Elastizitätsmodule zeigt, dass zwischen den Ergebnissen der unterschiedlichen Ansätze vornehmlich signifikante Unterschiede bestehen. Für die weitere Verwendung in der vorliegenden Arbeit wurde der Biege-Elastizitätsmodul ausgewählt, der im Bereich des Kraft-Durchbiegungs-Diagramms von Minimum nach Beschleunigungsstoß bis 80 % von F_{\max} berechnet wurde. Zu begründen ist dies damit, dass die eigentliche Biegekurve erst nach dem ersten Beschleunigungsstoß beginnt und für gewöhnlich bei Kraftwerten über 80 % der Bruchlast ein deutlicher Anteil plastischer Verformung (stärkerer Anstieg der Durchbiegung bei vergleichbarer Kraftzunahme) vorliegt. Der Bereich zwischen dem Minimum nach dem Beschleunigungsstoß und 80 % von F_{\max} zeigt insgesamt die größtmögliche Ähnlichkeit zum Kurvenverlauf statischer Prüfungen. Das beschriebene Vorgehen kann in Abbildung 10 nachvollzogen werden.

Tabelle 15: Ergebnisse der Berechnung des Schlagbiege-Elastizitätsmoduls von Prüfkörpern mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ auf Basis vier verschiedener Datenabschnitte zur Bestimmung der Steigung der Biegekurve sowie deren Vergleiches auf Gleichheit.

Material	Datenbereich zur Bestimmung des dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls	Schlagbiege-Elastizitätsmodul (N/mm ²)
Buche 4	Min. nach Beschleunigungsstoß - 80 % F_{\max}	7.258 (1.442) A
	Min. nach Beschleunigungsstoß - F_{\max}	4.366 (512) C
	Koordinatenursprung - 80 % F_{\max}	5.543 (917) B
	Koordinatenursprung - F_{\max}	3.805 (394) C
Bongossi 2	Min. nach Beschleunigungsstoß - 80 % F_{\max}	10.044 (2.440) A
	Min. nach Beschleunigungsstoß - F_{\max}	7.420 (1.904) B
	Koordinatenursprung - 80 % F_{\max}	7.379 (1.358) B
	Koordinatenursprung - F_{\max}	6.069 (1.102) B
Eiche 2	Min. nach Beschleunigungsstoß - 80 % F_{\max}	4.885 (707) A
	Min. nach Beschleunigungsstoß - F_{\max}	3.649 (644) B
	Koordinatenursprung - 80 % F_{\max}	3.548 (641) BC
	Koordinatenursprung - F_{\max}	3.044 (728) C
Tanne	Min. nach Beschleunigungsstoß - 80 % F_{\max}	7.954 (1.022) A
	Min. nach Beschleunigungsstoß - F_{\max}	5.538 (897) B
	Koordinatenursprung - 80 % F_{\max}	6.102 (688) B
	Koordinatenursprung - F_{\max}	4.758 (719) C
BauBuche	Min. nach Beschleunigungsstoß - 80 % F_{\max}	10.521 (1.010) A
	Min. nach Beschleunigungsstoß - F_{\max}	8.350 (849) B
	Koordinatenursprung - 80 % F_{\max}	7.651 (720) C
	Koordinatenursprung - F_{\max}	6.721 (476) D

angegebene Werte: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe

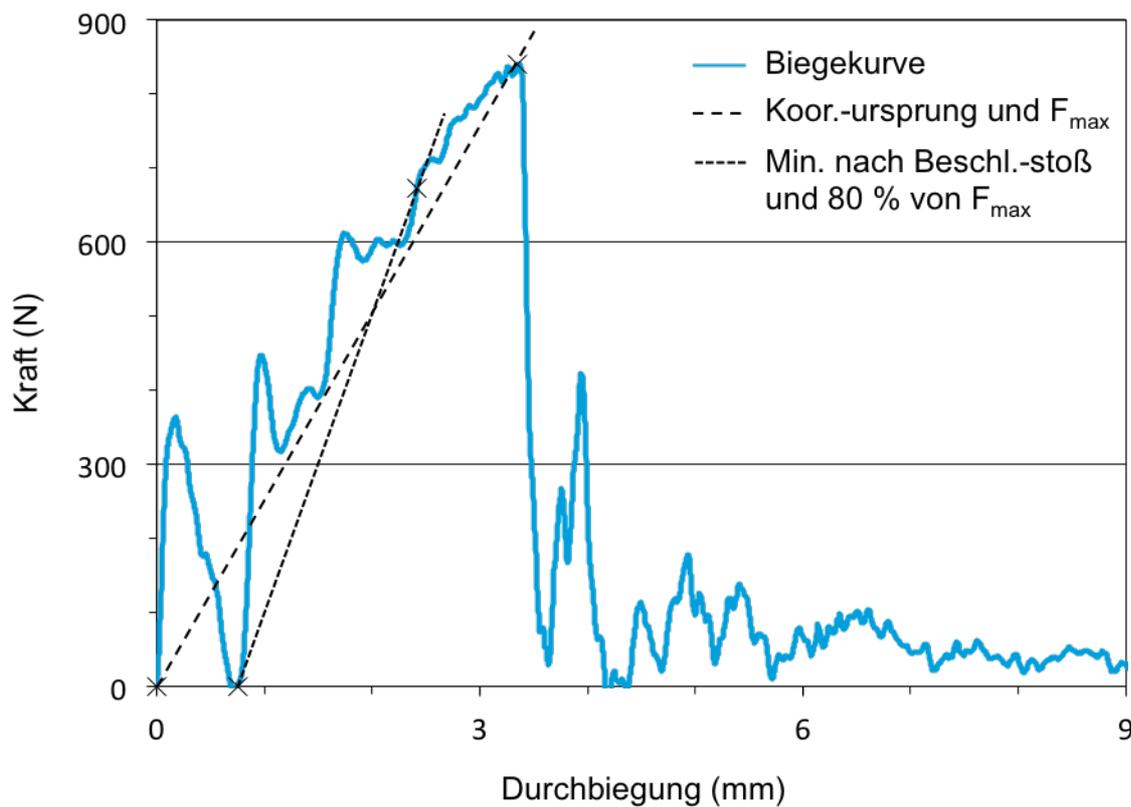


Abbildung 10: Exemplarische Darstellung einer Biegekurve im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit durch die Punkte „Koordinatenursprung“ und „ F_{max} “ sowie „Kraftminimum zwischen dem Kraftmaximum des Beschleunigungsstoßes und der eigentlichen Biegekurve“ und „80 % von F_{max} “ verlaufenden Geraden, auf Basis deren die Steigung der dynamische Biege-Elastizitätsmodul berechnet wird.

2.3.9.7 Einfluss der gewählten Datenbasis auf das Ergebnis der Bruchschlagarbeitberechnung

Im Fall der Schlagbiegeprüfung ermöglicht die Instrumentierung die Bestimmung der absorbierten Energie bis zum Bruch (bis F_{max}) sowie der insgesamt (inkl. Mitschleppen der Probe nach dem eigentlichen Bruch) absorbierten Energie. Im Fall der nicht-instrumentierten Schlagbiegeprüfung kann allein die insgesamt absorbierte Energie über die Differenz von Start- und Maximalhöhe des Pendelhammers nach dem Durchschlagen der Probe bestimmt werden. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie groß der Unterschied zwischen den so bestimmten Bruchschlagarbeiten ist, werden in Tabelle 16 die „Bruchschlagarbeit bis F_{max} “ mit der „Bruchschlagarbeit bis Ende Messung“ für verschiedene Materialien aufgeführt und statistisch miteinander verglichen, die an Prüfkörpern mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ermittelt wurden. Zusätzlich wird der Anteil der absorbierten Energie nach dem eigentlichen Bruchereignis bei F_{max} (Differenz von Bruch-

schlagarbeit bis F_{\max} und Bruchschlagarbeit bis Ende Messung dividiert durch die Bruchschlagarbeit bis Ende Messung mal einhundert) angegeben.

Tabelle 16: Vergleichende Angabe der „Bruchschlagarbeit bis F_{\max} “ und der „Bruchschlagarbeit bis Ende Messung“ sowie das Ergebnis deren statistischen Mittelwertanalyse auf Gleichheit für Prüfkörper mit den Abmessungen $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$; Angabe des Anteils der absorbierten Energie nach dem Bruchereignis.

Material	Bruchschlagarbeit bis		Anteil der abs. Energie nach Bruchereignis (%)
	F_{\max} (kJ/m ²)	Ende Messung (kJ/m ²)	
Buche 4	28,7 (5,6) B	38,2 (6,9) A	24,9
Bongossi 2	30,1 (12,0) B	53,5 (18,6) A	43,7
Eiche 2	9,7 (1,7) B	16,0 (3,7) A	39,4
Tanne	21,5 (4,9) B	27,2 (6,4) A	21,0
BauBuche	20,3 (5,4) B	31,9 (5,6) A	36,4

Die „Bruchschlagarbeit bis Ende Messung“ wurde stets als signifikant größer als die „Bruchschlagarbeit bis F_{\max} “ gefunden. Der Anteil des Mitschleppens der Probe nach dem eigentlichen Bruchereignis betrug zwischen 21 und 44 %. Das bedeutet, dass für den Vergleich von Bruchschlagarbeiten bzw. für den Vergleich von Bruchschlagarbeit und statischer Biegearbeit darauf geachtet werden muss, welche Art von Daten miteinander verglichen werden/ die verglichenen Daten die gleiche Basis haben müssen.

Über den Vergleich der in Abbildung 11 (Bruchschlagarbeit bis F_{\max}) und Abbildung 12 (Bruchschlagarbeit bis Ende Messung) farbige hinterlegten Flächen zwischen Biegekurve und x-Achse wird anschaulich, wie sich die Bruchschlagarbeiten unterscheiden, die anhand der zwei unterschiedlichen Datensätze berechnet wurden.

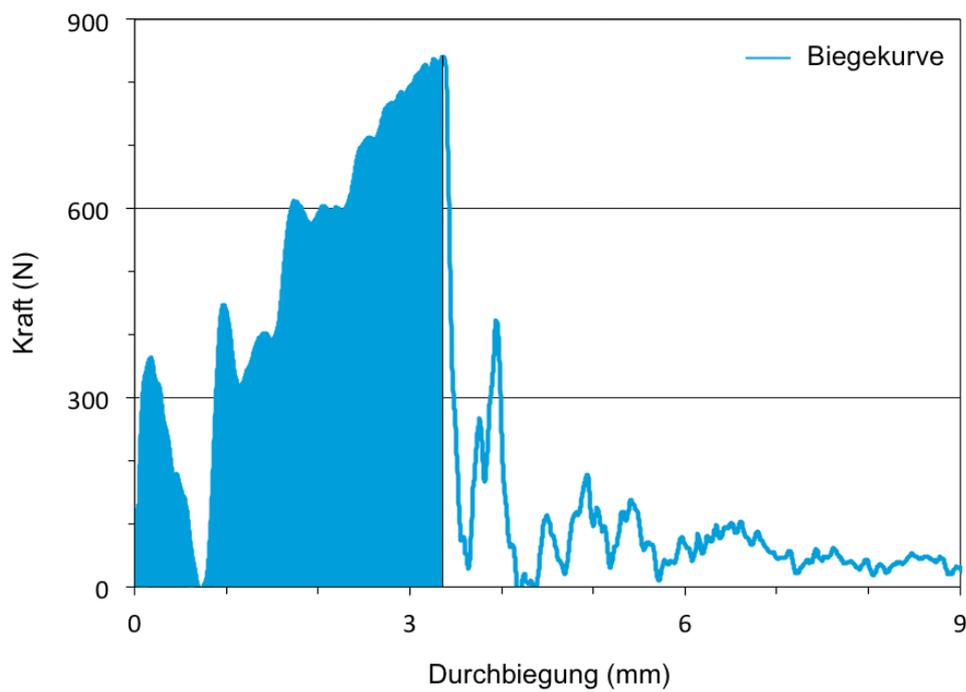


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung einer Biegekurve im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit bis zum Bruch der Probe zwischen Biegekurve und x-Achse farbig hinterlegter Fläche, die der „Bruchschlagarbeit bis F_{\max} “ entspricht.

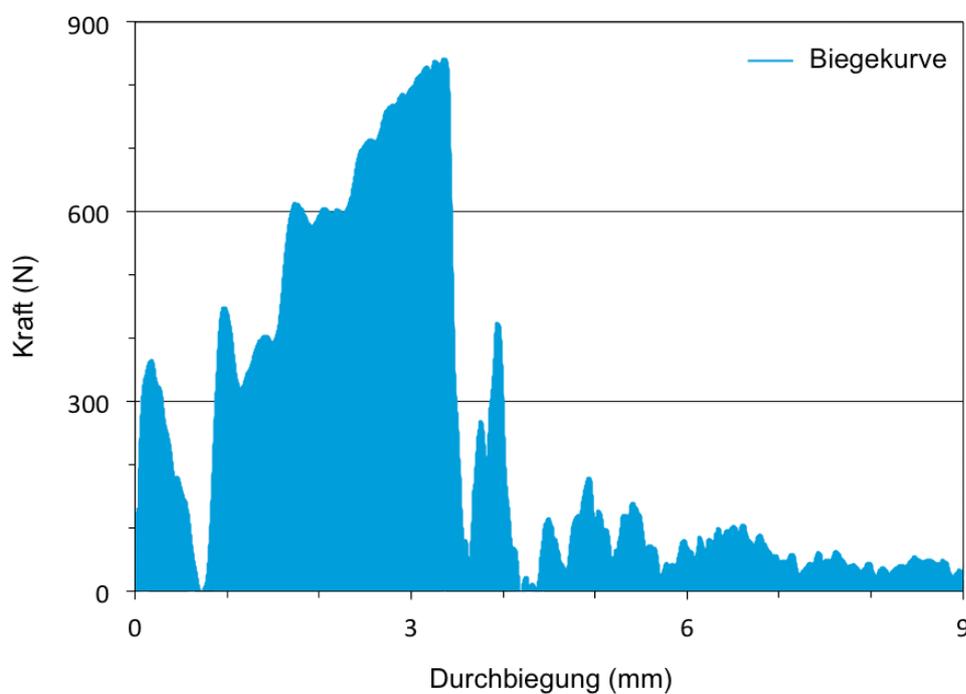


Abbildung 12: Exemplarische Darstellung einer Biegekurve im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit zwischen Biegekurve und x-Achse farbig hinterlegter Fläche, die der „Bruchschlagarbeit bis Ende Messung“ entspricht.

2.3.9.8 Einfluss des Auflagerabstandes auf die Bruchschlagarbeit

Der Einfluss des Auflagerabstandes (Variation der Prüfkörperlänge) auf die Bruchschlagarbeit_{gesamt} wurde an Prüfkörpern aus BauBuche mit einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und Längen von 600 mm, 1.100 mm, 1.581 mm und 1.850 mm untersucht. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung und der statistischen Datenanalyse sind Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Einfluss des Auflagerabstandes auf die Bruchschlagarbeit bei einer Prüfkörperdicke und Breite von 40 mm (BauBuche).

Auflagerabstand (Prüfkörperlänge) (mm)	Bruchschlagarbeit _{gesamt} (kJ/m ²)
480 (600)	131,7 (21,4) C
880 (1.100)	179,3 (22,2) B
1.265 (1.581)	198,5 (23,9) AB
1.480 (1.850)	214,2 (40,8) A

angegebene Werte: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe

Die Bruchschlagarbeit beim geringsten der untersuchten Auflagerabstände wurde als signifikant geringer als die der übrigen Prüfkörperabmessungen gefunden. Für größere Auflagerabstände unterschieden sich lediglich die Bruchschlagarbeiten von Prüfkörpern mit einer Länge von 1.100 mm und 1.850 mm. Über alle untersuchten Auflagerabstände hinweg ist festzustellen, dass mit zunehmendem Auflagerabstand die Bruchschlagarbeit ansteigt. Nachvollzogen werden kann dieses Ergebnis gut in Abbildung 13a.

2.3.9.9 Einfluss der Prüfkörperdicke auf die Bruchschlagarbeit

Der Einfluss der Prüfkörperdicke auf die Bruchschlagarbeit_{gesamt} wurde an Prüfkörpern aus BauBuche mit einer Länge von 1.581 mm (Auflagerabstand 1.265 mm) untersucht. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung und der statistischen Datenanalyse sind Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Einfluss des Prüfkörperdicke auf die Bruchschlagarbeit bei einem Auflagerabstand von 1.265 mm (Prüfkörperlänge 1581 mm) und Breite von 40 mm (Bau-Buche).

Prüfkörperdicke (mm)	Bruchschlagarbeit (kJ/m ²)
32	188,9 (29,8) A
38	193,4 (40,1) A
40	198,5 (23,9) A

angegebene Werte: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe

Anhand der in Tabelle 18 aufgeführten Ergebnisse der statistischen Datenanalyse konnte klar gezeigt werden, dass die Prüfkörperdicke keinen Einfluss auf die Bruchschlagarbeit hat. Nachvollzogen werden kann dieses Ergebnis gut in Abbildung 13b.

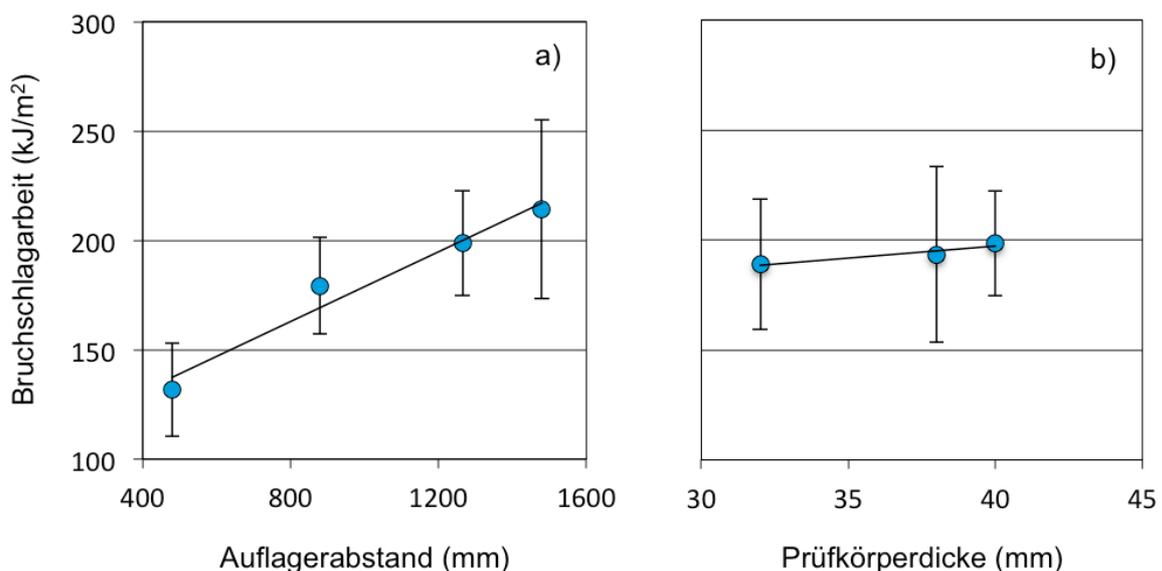


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Bruchschlagarbeit und a) Auflagerabstand bzw. b) Prüfkörperdicke von Prüfkörpern aus BauBuche mit a) einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und b) einer Länge von 1.581 mm (Auflagerabstand 1.265 mm).

2.3.9.10 Zusammenfassung der Ergebnisse der dynamischen Biegeeigen-schaftsbestimmung

- Anhand der Bruchschlagarbeit lassen sich Materialien voneinander unterscheiden, wenn diese an Prüfkörpern gleicher Abmessungen bestimmt wurde.

- Wird zur Beurteilung der Schlagzähigkeit der Mittelwert der Bruchschlagarbeit herangezogen, so sind Bambus, Denya und Bongossi als besonders schlagfest einzustufen. Wird die Schlagzähigkeit hingegen auf Basis des 5 %-Quantilwertes herangezogen, so sind die Holzwerkstoffe Bambus, Scrimber und BauBuche als besonders schlagzäh zu bewerten; während Denya und Bongossi weit weniger schlagzäh sind.
- Die Bruchschlagarbeit ist von den Prüfkörperabmessungen beeinflusst.
- Die ermittelten Bruchschlagarbeiten stimmten mit den Literaturangaben überein, unterschritten und überstiegen diese aber auch.
- Sowohl die Bruchschlagarbeit (bis F_{\max} vs. gesamt) als auch der dynamische Biege-Elastizitätsmodul sind von der gewählten Datenbasis zur Kennwertberechnung beeinflusst.
- Die Bruchschlagarbeit ist vom Auflagerabstand beeinflusst, von der Prüfkörperdicke jedoch nicht.

2.3.10 Vergleich von statischen und dynamischen Biegeeigenschaften

2.3.10.1 Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul: statisch vs. dynamisch

Ein Vergleich (statistische Analyse) von statischer und dynamischer Biegefestigkeit sowie statischem und dynamischem Biege-Elastizitätsmodul wird in Tabelle 19 auf Basis der Ergebnisse durchgeführt, die im Rahmen der Biegeprüfung von Prüfkörpern mit den Abmessungen $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$, $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ und $180 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ erzielt wurden. Der Mittelwertvergleich wurde hierbei jeweils innerhalb eines Materials durchgeführt. Auf Basis des Ergebnisses von Kapitel 2.3.8.3, nämlich dass die statische Biegefestigkeit nicht und der statische Biege-Elastizitätsmodul überwiegend nicht von den Prüfkörperabmessungen abhängig sind, wird für den vorliegenden Vergleich angenommen, dass dies auch für die dynamische Biegefestigkeit und den dynamischen Biege-Elastizitätsmodul gilt und somit ein Vergleich der statischen und dynamischen Biegefestigkeit sowie des statischen und dynamischen Biege-Elastizitätsmodul trotz unterschiedlichen Prüfkörperabmessungen zulässig ist.

Tabelle 19: Vergleich (statistische Analyse) von statischer und dynamischer Biegefestigkeit sowie statischem und dynamischem Biege-Elastizitätsmodul innerhalb eines Materials für Prüfkörper unterschiedlicher Größe.

Material	Art der Lasteinleitung	Kanten-länge des Querschnitts (mm)	Prüfkörper-länge (bzw. Stützweite) (mm)	Biegefestigkeit (N/mm ²)	Elastizitätsmodul (N/mm ²)
Buche 4	statisch	20	360 (300)	98,5 (12,2) B	10.317 (1.293) A
	statisch	40	600 (480)	103,4 (11,3) B	9.817 (1.190) A
	dynamisch	10	180 (105)	118,5 (8,5) A	7.258 (1.442) B
Bongossi 2	statisch	20	360 (300)	113,3 (27,8) B	12.408 (2.494) A
	statisch	40	600 (480)	110,8 (23,4) B	11.296 (1.591) AB
	dynamisch	10	180 (105)	154,0 (27,8) A	10.044 (2.440) B
Eiche 2	statisch	20	360 (300)	61,4 (5,9) A	6.848 (877) A
	statisch	40	600 (480)	61,9 (5,6) A	6.626 (511) A
	dynamisch	10	180 (105)	62,2 (7,8) A	4.885 (707) B
Tanne	statisch	20	360 (300)	100,1 (9,0) B	11.841 (2.152) A
	statisch	40	600 (480)	92,3 (10,9) B	9.376 (1.292) B
	dynamisch	10	180 (105)	118,4 (16,1) A	7.954 (1.022) C
Scrimber	statisch	20	360 (300)	68,5 (18,2) A	11.942 (2.757) A
	statisch	40	600 (480)	72,7 (21,2) A	12.375 (2.284) A
BauBuche	statisch	20	360 (300)	122,5 (13,1) B	13.609 (1.003) A
	statisch	40	600 (480)	126,2 (7,8) B	11.860 (455) B
	dynamisch	10	180 (105)	142,6 (17,1) A	10.521 (1.010) C

Festigkeits- und Elastizitätswerte: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe

Mit Ausnahme von Eiche (kein Unterschied) ist die dynamische Biegefestigkeit stets signifikant größer als die statische Biegefestigkeit. Gleichzeitig ist das dynamische Biege-Elastizitätsmodul kleiner als das statische Biege-Elastizitätsmodul. Das bedeutet, dass die untersuchten Materialien bei dynamischer Belastung zwar eine höhere Festigkeit (Bruch tritt erst bei größerer Kraft ein) aufweisen, gleichzeitig aber die Durchbiegung bis zum Bruchereignis größer ist (geringerer Biege-Elastizitätsmodul).

2.3.10.2 Vergleich von (statischer) Biege- und (dynamischer) Bruchschlagarbeit

Wie in Kapitel 2.3.9.7 gezeigt wurde, muss ein Vergleich der im Rahmen der Schlagbiegeprüfung absorbierten Energie (Bruchschlagarbeit) auf Grundlage einer einheitlichen Datenbasis erfolgen, also entweder ausschließlich auf Basis von Messwerten bis F_{\max} oder auf Basis aller Messwerte, die bis zum Ende der Prüfung (inklusive einem Mitschleppen des Prüfkörpers) aufgenommen

wurden. Dies sollte analog auch für die Bestimmung der Biegearbeit im statischen Biegeversuch zutreffen, jedoch hier nicht so deutlich auffallen, da der Druckstempel die gebrochene Probe nicht in dem Umfang mitschleppen kann, wie es im Fall eines Schlagpendels möglich ist (Anheben des Schlagpendels entgegen der Gravitation auf der Kreisflugbahn des Pendels). Der Vergleich der (statischen) Biegearbeit und der (dynamischen) Bruchschlagarbeit wird im Folgendem (Tabelle 20) an Eigenschaftswerten durchgeführt, die auf Basis der Messdaten bis F_{\max} berechnet wurden.

Tabelle 20: Vergleich (statistische Analyse) von (statischer) Biege- und (dynamischer) Bruchschlagarbeit, jeweils bis F_{\max} , innerhalb eines Materials für Prüfkörper unterschiedlicher Größe.

Holzart bzw. Holzwerkstoff	Charge	Art der Lasteinleitung	Kantenlänge des Querschnitts (mm)	Prüfkörperlänge (bzw. Stützweite) (mm)	Biege- bzw. Bruchschlagarbeit (kJ/m ²)	5 %-Quantil (kJ/m ²)
Buche	4	statisch	20	360 (300)	42,5 (10,7) B	27,3
	4	statisch	40	600 (480)	77,8 (19,4) A	49,2
	4	dynamisch	10	180 (105)	28,7 (5,6) C	19,9
Bongossi	2	statisch	20	360 (300)	31,1 (16,1) B	10,3
	2	statisch	40	600 (480)	46,1 (19,2) A	29,2
	2	dynamisch	10	180 (105)	30,1 (12,0) B	14,4
Eiche	2	statisch	20	360 (300)	17,3 (4,7) B	11,1
	2	statisch	40	600 (480)	27,6 (6,2) A	21,4
	2	dynamisch	10	180 (105)	9,7 (1,7) C	7,5
Tanne	-	statisch	20	360 (300)	40,0 (12,7) B	25,5
	-	statisch	40	600 (480)	52,7 (20,8) A	26,7
	-	dynamisch	10	180 (105)	21,5 (4,9) C	14,6
Scrimber	-	statisch	20	360 (300)	17,0 (5,8) B	8,5
	-	statisch	40	600 (480)	27,7 (12,6) A	12,5
BauBuche	2	statisch	20	360 (300)	31,7 (6,3) B	24,2
	2	statisch	40	600 (480)	59,9 (7,1) A	48,6
	2	dynamisch	10	180 (105)	20,3 (5,4) C	12,0

Biege- bzw. Bruchschlagarbeit: Mittelwert (\pm Standardabweichung) homogene Gruppe, 5 %-Quantil in separater Spalte

Mit Ausnahme des Materials Bongossi (kein signifikanter Unterschied zwischen der Biegearbeit von Prüfkörpern mit den Abmessungen 360 x 20 x 20 mm³ und der Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern mit den Abmessungen 180 x 10 x 10 mm³) wiesen alle Materialien signifikante Unterschiede zwischen den Eigenschaftswerten (Biegearbeit und Bruchschlagarbeit) der Prüfkörper unterschiedlicher Prüfkörperabmessungen auf. Da die bis zum Bruch eines Prüfkörpers absorbierte Energie für die zwei Arten der Biegeprüfung (statisch und dynamisch) nicht an Prüfkörpern gleicher Abmessungen bestimmt wurden, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob Unterschiede in der Art der Biegeprüfung oder allein die Unterschiede in den Prüfkörperabmessun-

gen für die Unterschiede der Eigenschaftswerten verantwortlich sind. Klar ist in jedem Fall (isolierter Vergleich der statischen Biegearbeit von Prüfkörpern unterschiedlicher Abmessungen; $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ vs. $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$), dass die auf den Prüfkörperquerschnitt normierte, im Zuge der Biegeprüfung vom Prüfkörper absorbierte Energie (Biegearbeit) signifikant von den Prüfkörperabmessungen beeinflusst ist. Zu erklären ist dies damit, dass für die Berechnung des Eigenschaftswertes allein der Prüfkörperquerschnitt, nicht aber – wie bei der Berechnung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul – die Prüfkörperlänge berücksichtigt wird. Neben den Querschnittsabmessungen muss aber auch Prüfkörperlänge einen starken Einfluss auf die im Zuge der Biegeprüfung vom Prüfkörper absorbierte Energie haben, da bis zum Erreichen der Bruchkraft im Fall langer Prüfkörper die Durchbiegung größer als bei kleinen Prüfkörpern ist und somit zur Biegung mehr Arbeit (Kraft x Weg) verrichtet werden muss.

2.3.11 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen der Bestimmung der statischen Biegeeigenschaften sowie der Bruchschlagarbeit wurde festgestellt, dass die Eigenschaften des untersuchten Eichenholzes geringer als in der Literatur angegebenen Werten sind. Die geringen Eigenschaften sind vermutlich auf die untersuchte Materialcharge begrenzt, führt aber vor Augen, dass Holz ein Naturprodukt und enormen Eigenschaftsschwankungen unterworfen ist. Gleiches lässt sich auch anhand der ermittelten Eigenschaften der übrigen Materialien beobachten: Die tatsächlich gemessenen Eigenschaften liegen zwar häufig im Bereich der Literaturangaben, können diese aber auch über- oder unterschreiten. Soll Holz für tragende Zwecke eingesetzt werden, so sind aufgrund der zum Teil großen Schwankungsbreite der Eigenschaften stets Sicherheiten einzukalkulieren, wie dies im Fall des Heranziehens von 5 %-Quantilwerten geschieht.

Zieht man für die Bewertung des Leistungsvermögens verschiedener Hölzer und Holzwerkstoffe (inklusive Bambus) die 5 %-Quantilwerte heran, so ergibt sich für deren Sortierung hiernach eine andere Reihenfolge, als es im Vergleich beim Heranziehen der Mittelwerte hierfür der Fall ist. Insbesondere die Holzwerkstoffe, bei denen aufgrund ihres strukturellen Aufbaus Holzfehler zuverlässig homogenisiert wurden, lösen dann die schweren Vollhölzer mit starken wachstumsbedingten Eigenschaftsschwankungen von ihren führenden Positionen in der Reihung ab. Dies zeigt die besondere Eignung von Holzwerkstoffen für tragende Zwecke; insbesondere dann, wenn trotz schlanker Bauteilabmessungen hohe Anforderungen an Festigkeit und Elastizität gestellt werden.

Im Rahmen der statischen und dynamischen Biegeversuche wurde herausgearbeitet, dass die Materialkennwerte Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul nicht, die bei Biegung verrichtete Arbeit (statische Biegearbeit und dynamische Bruchschlagarbeit) wohl von den Prüfkörperabmessungen abhängen. Dies liegt daran, dass im Fall der Berechnung der Biegefestigkeit sowie des Biege-Elastizitätsmoduls neben den Prüfkörperquerschnittsabmessungen auch die Prüfkörperlänge bzw. der Auflagerabstand Berücksichtigung findet, im Fall der bei Biegung verrichteten Arbeit jedoch nicht. Hier wird die bis zum Bruch absorbierte Energie allein auf den Prüfkörperquer-

schnitt bezogen. Ein Vergleich der statischer Biegearbeit bzw. Bruchschlagarbeit verschiedener Materialien kann folglich nur erfolgen, wenn diese an Prüfkörpern gleicher Abmessungen bestimmt wurden. Ob die statische Biegearbeit mit der Bruchschlagarbeit zu vergleichen ist, kann anhand der vorliegenden Versuche nicht beurteilt werden, da diese nicht an Prüfkörpern gleicher Abmessungen bestimmt wurden.

Die vergleichende Bestimmung der statischen und dynamischen Biegefestigkeit sowie des statischen und dynamischen Biege-Elastizitätsmoduls hat ergeben, dass bei dynamischer Belastung zwar mit einer höheren Festigkeit zu rechnen ist, gleichzeitig die Durchbiegung bis zum Bruchereignis jedoch größer ist. Eine Veränderung der Datenbasis (von statisch ermittelten hin zu dynamisch ermittelten Kennwerten) zur Dimensionierung von Stallbohlen erscheint hiernach nicht zwingend vorteilhaft zu sein.

Stellt man die in Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgeführten, in eigenen Versuchen ermittelten Biegeeigenschaften (5 %-Quantile) mit den für die Bauteildimensionierung (siehe Kapitel 2.4) relevanten charakteristischen Werten nach DIN EN 338:2016-07 (siehe Tabelle 22) wie in Tabelle 21 geschehen zusammen, so fällt auf, dass die ermittelten Biegefestigkeiten die charakteristischen Werte weit übersteigen, das Biege-Elastizitätsmodul jedoch vorwiegend überbewertet (Ergebnis der eigenen Messung > charakteristischer Wert) ist. Diese Betrachtung zeigt einmal mehr, wie groß die Spanne der Eigenschaftsvariation ist und wie wichtig die Berücksichtigung von Sicherheitszuschlägen ist. Weiter liefert dieses Ergebnis aber auch die Grundlage dafür, im weiteren Verlauf dieses Berichtes erzielte Ergebnisse der Durchtrittbeständigkeitsprüfung infrage zu stellen, wenn hier nur knapp das geforderte Festigkeitsniveau nicht erreicht wurde.

Tabelle 21: Gegenüberstellung von Ergebnissen der eigenen Bestimmung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul mit entsprechenden Angaben der charakteristischen Werte aus DIN EN 338:2016-07.

Holzart	Ergebnisse eigene Messungen (5 %-Quantil)		Angaben aus DIN EN 338:2016-07 (Charakteristische Werte/ 5 %-Quantil)		
	Biegefestigkeit	Biege-Elastizitäts- modul	Festig- keits- klasse	Biegefestigkeit	Biege-Elastizitäts- modul
	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²	N/mm ²
Tanne	88,6	8.815	C16	16	5.400
Eiche	55,4	5.642	D30	30	9.000
Buche	84,7	8.593	D40	40	10.900
Bongossi	80,9	9.275	D60	60	14.300

2.3.12 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen

Mit Blick auf eine möglichst realitätsnahe Dimensionierung bzw. Überprüfung aktueller Abmessungen von Stallbohlen war das Projektziel, die relevanten Biegefestigkeits- und Biege-Elastizitätseigenschaften gängiger und aussichtsreich erscheinender Materialien als Ergänzung zu Literaturangaben an u.a. Proben praxisnaher Abmessungen zu bestimmen. Entsprechend der gängigen Praxis bei der Dimensionierung von tragenden Bauteilen sind zum einen die statischen Biegeeigenschaften als relevant anzusehen, entsprechend der Art der tatsächlichen Belastung zum anderen die dynamischen Biegeeigenschaften als praxisnäher anzusehen. Im Rahmen des Projektes wurden daher sowohl die statischen als auch die dynamischen Biegeeigenschaften bestimmt und miteinander verglichen.

Mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen konnte ein gutes Verständnis der Eigenschaften und Zusammenhänge gewonnen werden, die für die für die Dimensionierung von Stallbohlen eine Rolle spielen. Über die Untersuchung verschiedener Materialien (Holzarten und Holzwerkstoffe) und deren Vergleich mit Literaturangaben konnte weiter eine Vorstellung davon gewonnen werden, welche Eigenschaftsunterschiede zwischen den Materialien bestehen, wie groß deren Variationsbreite ist und wie wichtig die Berücksichtigung von Sicherheitszuschlägen für die Praxis ist.

2.4 Dimensionierung von Stallbohlen

2.4.1 Ansatz

Stallbohlen können als sicherheitsrelevantes Bauteil im Sinne der europaweit vereinheitlichten Regeln des konstruktiven Ingenieurbaus - den Eurocodes (EC) - aufgefasst und dimensioniert werden. Im Zuge einer solchen Dimensionierung würde geprüft, gestaltet und letztendlich nachgewiesen werden, dass mit angemessener Zuverlässigkeit

- der bei Tritteinwirkung resultierenden Beanspruchung (Biegespannung) eine mindestens entsprechende Beanspruchbarkeit (Biegefestigkeit) entgegen steht
→ Ausschluss von Materialversagen = durchtrittbeständig
- die bei Tritteinwirkung resultierende Durchbiegung (Auswirkung) maximal einem maßgebenden und einzuhaltenden Nennwert entspricht
→ Ausschluss der Hufeinklemmung zwischen zwei Stallbohlen = einklemmsicher.

Ergäbe die Prüfung eines Ausführungsentwurfs für Stallbohlen einer Boxenabtrennung, dass die eben genannten Anforderungen nicht erfüllt werden, so wären diese durch Materialauswahl (z.B. der Holzart) und/oder Änderung der Abmessungen sicherzustellen. Wären anstelle eines Ausfüh-

rungsentwurfes nur bestimmte Eckpunkte der Ausführung festgeschrieben (z.B. Bohlendicke und -länge), so ließen sich im Zuge der Dimensionierung eine zielführende Auswahl des Materials und Festlegung der Bohlenbreite vornehmen.

Für die Prüfung und Umgestaltung bzw. die Gestaltung sowie letztendlich den Nachweis der Durchtrittbeständigkeit (Ausschluss von Materialversagen) und Einklemmsicherheit (Ausschluss einer übermäßigen Durchbiegung) nach dem eben skizzierten Ansatz ist es Voraussetzung, den Größenwert der relevanten Einwirkung (Pferdetritt) auf Stallbohlen und der Materialeigenschaften (z.B. Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul) zu kennen, sowie die aufgrund der Einwirkung resultierende Beanspruchung (z.B. Biegespannung) und Auswirkung (z.B. Durchbiegung) zu berechnen. Weiter müssen die Bauteilabmessungen bekannt sein, die für das gewünschte Erscheinungsbild bzw. Zweckerfüllung der Boxenabtrennung unverzichtbar sind. Voraussetzung ist ebenfalls, dass ein maximal tolerierbarer Wert für die Durchbiegung festgelegt wurde.

An dieser Stelle soll erneut darauf hingewiesen werden, dass die Anwendung von Eurocode 5 für Stallbohlen nicht zwingend ist (nachgeordnetes Bauteil), sondern als Hilfsmittel dafür benutzt wird, durchtrittbeständige und einklemmsichere Stallbohlen zu gestalten.

Für die im Zuge der Dimensionierung zu prüfenden Bedingungen

- Beanspruchung \leq Beanspruchbarkeit (z.B. Biegespannung \leq Biegefestigkeit)
- Auswirkung (z.B. Durchbiegung) \leq Nennwert

ist zu entscheiden, ob diese für die Sicherstellung von Leben und Gesundheit zwingend erfüllt werden müssen oder ob lediglich eine Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit (mit vornehmlich wirtschaftlich negativen Folgen) ausgeschlossen werden soll. Entsprechend dieser Entscheidung sind die „charakteristischen“ Werte für Einwirkungen und Baustoffeigenschaften so anzusetzen, dass diese entweder

- in nur 5 % aller Fälle (der Eigenschaftsverteilung) unterschreiten bzw. 95 % aller Fälle (der Einwirkungsverteilung) abdeckt oder
- dem Mittelwert ihrer statistischen Verteilung entsprechen.

Weiter gibt diese Entscheidung vor, ob bzw. mit welchen Sicherheitsbeiwerten der charakteristische Wert der Einwirkung und der Baustoffeigenschaft auf ein vorgesehenes Sicherheitsniveau gebracht werden.

Für die Baustoffeigenschaft ist darüber hinaus der Einfluss der Lasteinwirkungsdauer und der Nutzungsklasse zu berücksichtigen, in der das Bauteil eingesetzt ist. Dies erfolgt über den Modifikationsbeiwert k_{mod} , der auf Basis der kumulierten Dauer der Lasteinwirkung und der Nutzungsklasse festgelegt, der das Bauteil entsprechend seiner Umgebungsbedingungen eingeordnet wird. Als Ergebnis der so modifizierten charakteristischen Werte der Einwirkung und Baustoffeigen-

schaft werden der „Bemessungswert der Einwirkung“ und der „Bemessungswert der Baustoffeigenschaft“ erhalten.

2.4.2 Vorgehen bei der Berechnung

2.4.2.1 Baustoffeigenschaften

Eine wichtige Voraussetzung für die Dimensionierung von Bauteilen ist die Kenntnis der Eigenschaften des zu verwenden beabsichtigten Baustoffes. Auf Basis der Baustoffeigenschaften lässt eine Aussage zu dessen Beanspruchbarkeit treffen oder die Auswirkung der Einwirkung berechnen.

Die Bestimmung der Baustoffeigenschaften erfolgt auf Grundlage von genormten Prüfungen; im Fall von Holz vornehmlich anhand von DIN EN 408:2012-10. Unter bestimmten Voraussetzungen (siehe DIN EN 384:2016-12) können die Baustoffeigenschaft auf Basis der Ergebnisse der Prüfung von kleinen, fehlerfreien Probekörpern hergeleitet werden. Eine Methode zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von Vollholz an kleinen, fehlerfreien Probekörpern ist beispielsweise die DIN EN 52186:1978-06. Eine Voraussetzung für die Verwendung der an kleinen, fehlerfreien Probekörpern ermittelten Eigenschaften wäre es, deren charakteristischen Wert (5 %-Quantil) mit dem Faktor 0,8 zu multiplizieren.

Da Holz ein natürlicher Werkstoff ist, wird als Ergebnis der Eigenschaftsbestimmung stets eine Eigenschaftsverteilung erhalten. Die Schwankung der Eigenschaften ist in den gegebenen Wuchsunregelmäßigkeiten begründet. Wie die charakteristischen Werte (5 %-Quantil) für die Eigenschaften von Bauholz aus der Eigenschaftsverteilung zu bestimmen sind, wird in DIN EN 384:2016-12 festgelegt.

Da sowohl die Durchtrittbeständigkeit als auch die Einklemmsicherheit als sicherheitsrelevant angenommen werden muss, ist für deren Berechnung sowohl für die Biegefestigkeit als auch für den Biege-Elastizitätsmodul das 5 %-Quantil als charakteristischer Werte zu berücksichtigen. So wird sichergestellt, dass die jeweilige Eigenschaft in nur 5 % aller Fälle unterschritten wird und in 95 % aller Fälle die angenommene Eigenschaft mindestens erreicht ist.

Nach EC 5 muss Vollholz für tragende Bauteile visuell oder maschinell nach der Festigkeit sortiert sein. Auf Basis der Sortierung lassen sich Holzarten in Festigkeitsklassen einordnen, für die charakteristische Biegefestigkeiten (5 %-Quantil), Mittelwerte und 5 %-Quantile für das Biege-Elastizitätsmodul sowie charakteristische Rohdichten in DIN EN 338:2016-07 angegeben werden. Das jeweilige (charakteristische) 5 %-Quantil des Biege-Elastizitätsmoduls lässt sich für Laubhölzer auch durch Multiplikation des angegebenen Mittelwertes mit dem Faktor 0,84; für Nadelhöl-

zer durch Multiplikation mit dem Faktor 0,67 berechnen (DIN EN 338:2016-07). Eine Übersicht der Baustoffeigenschaften für die Festigkeitsklassen wird in Tabelle 22 gegeben.

Tabelle 22: Rechenwerte für die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte ausgewählter Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016-07.

Festigkeits- klasse	Charakteristische Biegefestigkeit (5 %-Quantil)	Biege- Elastizitätsmodul (Mittelwert)	Biege-Elastizitäts- modul (5 %-Quantil)	Charakteristische Rohdichte (5 %-Quantil)
	$f_{0,05}$ N/mm ²	E_{mean} N/mm ²	$E_{0,05}$ N/mm ²	ρ_k kg/m ³
C16	16	8.000	5.400	310
C24	24	11.000	7.400	350
C30	30	12.000	8.000	380
D30	30	11.000	9.000	530
D40	40	13.000	10.900	550
D60	60	17.000	14.300	700

Nach entsprechender Sortierung lassen sich beispielsweise Fichte und Tanne der Festigkeitsklasse C16, Kiefer und Lärche der Festigkeitsklasse C24, Douglasie der Festigkeitsklasse C30, Eiche der Festigkeitsklasse D30, Buche der Festigkeitsklasse D40 und Bongossi der Festigkeitsklasse D60 zuordnen.

Die Anwendung des EC 5 ist für die Dimensionierung von Stallbohlen nicht zwingend (nachgeordnete Bauteile), sondern soll lediglich als Hilfsmittel bzw. Orientierungshilfe für die Gestaltung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen herangezogen werden. Somit besteht kein Zwang zur Verwendung von festigkeitssortiertem Holz und entsprechend Anwendung der Festigkeits- und Steifigkeitswerte der Festigkeitsklassen.

Für die Berechnung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit lassen sich also auch Materialeigenschaften heranziehen, die im Rahmen von Versuchsreihen ermittelt bzw. der Literatur entnommen werden können. Unter Annahme von Normalverteilung lässt anhand von Mittelwert MW und Standardabweichung $Stabw$ das 5 %-Quantil über die Addition des Produktes aus Standardabweichung und dem z-Wert für eine Wahrscheinlichkeit von 0,05 (d.h. z-Wert = -1,645) zum Mittelwert berechnen:

$$5 \text{ \%}-\text{Quantil der Baustoffeigenschaft} = MW + Stabw \times -1,645$$

Auf Basis des so erhaltenen charakteristischen Wertes der Baustoffeigenschaft X_k kann weiter der Bemessungswert der Baustoffeigenschaft X_d berechnet werden. Erhalten wird dieser über die Multiplikation des charakteristischen Wertes der Baustoffeigenschaft X_k mit dem modifizierenden Faktor k_{mod} , und Division durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_M :

$$X_d [\text{N/mm}^2] = \frac{k_{mod} [-] \times X_k [\text{N/mm}^2]}{y_m [-]}$$

Über k_{mod} wird der Einfluss der Lasteinwirkungsdauer sowie der Holzfeuchte auf die Baustoffeigenschaft berücksichtigt.

Die Berücksichtigung der Holzfeuchte erfolgt hierbei über die Zuordnung der Bauteilexposition gegenüber dem Umgebungsklima in Nutzungsklassen (Tabelle 23). Die jeweiligen Nutzungsklassen sind gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur und einer relativen Luftfeuchte der umgebenen Luft entspricht.

Tabelle 23: Nutzungsklassen

Nutzungs- klasse	Holzfeuchte u	Umgebungsklima	Beispiel
1	$u \leq 12 \%$	20 °C und 65 % relative Luftfeuchte, die nur für einige Wochen pro Jahr überschritten wird	beheizte Innenräume
2	$u \leq 20 \%$	20 °C und 85 % relative Luftfeuchte, die nur für einige Wochen pro Jahr überschritten wird	überdachte Tragwerke
3	$u \geq 20 \%$	Klimabedingungen, die zu höheren Holzfeuchten führen	frei der Bewitterung ausgesetzte Bauteile

Für Stallbohlen im engeren Sinne ist Nutzungsklasse 2 anzunehmen. Im Fall der freien Bewitterung ist Nutzungsklasse 3 anzunehmen.

Der Einfluss der Lasteinwirkungsdauer erfolgt über die Zuordnung der Einwirkung in Klassen. Definiert sind diese darüber, welche Größenordnung die akkumulierte Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung umfasst (Tabelle 24).

Tabelle 24: Klassen der Lasteinwirkungsdauer

Klasse der Lasteinwirkungsdauer	Größenordnung der akkumulierten Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung
ständig	länger als 10 Jahre
lang	6 Monate – 10 Jahre
mittel	1 Woche – 6 Monate
kurz	kürzer als eine Woche
sehr kurz	weniger als eine Minute

Für die Einwirkung Pferdetritt wird als Klasse der Lasteinwirkungsdauer „sehr kurz“ angenommen.

Für die Klasse der Lasteinwirkungsdauer „sehr kurz“ und Nutzungsklassen 1 und 2 ist k_{mod} für Vollholz und Furnierschichtholz mit 1,1 anzusetzen. Im Fall des Vorliegens von Nutzungsklasse 3 ist für k_{mod} 0,9 anzunehmen.

Als Teilsicherheitsbeiwert γ_M ist der Wert 1,3 zu berücksichtigen, da sowohl Durchtrittbeständigkeit als auch Einklemmsicherheit als sicherheitsrelevant einzustufen sind.

2.4.3 Bauteilabmessungen

In der Praxis werden in Abhängigkeit der individuellen Boxengestaltung Bohlen unterschiedlicher Länge sowie in Abhängigkeit der verwendeten Holzart Bohlen unterschiedlicher Breite verbaut. Als mittlere Bohlenlänge soll für die beispielhafte Dimensionierung eine Bohlenlänge von 1.265 mm veranschlagt werden. Als Extremwerte besonders kurzer und besonders langer Bohlen sollen die Werte 880 mm und 1.480 mm.

Für die beispielhafte Dimensionierung werden als Breite einheitlich 120 mm verwendet, auch wenn dieser Wert über die verwendeten Holzarten stark variieren kann. Lediglich für Bohlen aus Bambus wird eine Breite von 160 mm angenommen. Im Fall der Bohlenbreite ist in der Praxis zu berücksichtigen, dass diese bei Boxentüren häufig auf einer gewissen Länge durch kantenparalleles Ausfräsen der Schmalfläche reduziert ist, wodurch beim Zusammenfügen der Bohlen in der Türfläche Schlitzte entstehen. Diese Schlitzte sollen für eine (verbesserte) Luftzirkulation in der Box sorgen, reduzieren aber die Bohlenbreite, die zur Berechnung der Durchtrittbeständigkeit herangezogen werden kann.

Die Dicke von Stallbohlen ist üblicherweise so gewählt, dass diese sich in handelsübliche Stahl-U- oder -C-Profile einschieben lassen (z.B. 38 oder 40 mm). Für Bohlen aus Bambus wird eine Dicke von 32 mm verwendet. Für die beispielhafte Berechnung wird als Bohlendicke 40 mm bzw. 32 mm im Fall von Bambus angenommen.

2.4.4 Einwirkung

Als für die Bemessung von Stallbohlen relevante Einwirkung ist das Auskeilen und die damit verbundene Schlagbelastung anzunehmen. Weder das Eigengewicht der Bohle (ständige Einwirkung $[G]$), noch andere veränderliche Lasten (Q) als die Tritteinwirkung (z.B. Schnee oder Wind) oder außergewöhnliche Einwirkungen (A) (z.B. Erdbeben oder Fahrzeuganprall) sind zu berücksichtigen. Bei der beim Auskeilen auf die Stallbohle einwirkende Schlagbelastung handelt es sich folglich um eine „veränderliche Einwirkung“. Damit ist für den Nachweises der Tragfähigkeit des als sicherheitsrelevanten Bauteils als Teilsicherheitsbeiwert (γ_Q) ein Wert von 1,5 zu veranschlagen.

Als charakteristischer Wert der Einwirkung wird hier das 95 %-Quantil der in Kapitel (1) bestimmten Trittenenergie $E_{95\%}$ bzw. E_k veranschlagt (70,4 J). Durch Multiplikation mit dem Sicherheitsbeiwert von 1,5 wird der Bemessungswert der Einwirkung E_d erhalten (105,6 J). Zum Vergleich: Eine gleichgroße Belastung würde entstehen, wenn eine Masse von 10,8 kg aus 1 m Höhe auf eine horizontal gelagerte Bohle fallen würde (Energie = Masse x Fallbeschleunigung x Höhe, d.h. 105,6 J = 10,8 kg x 9,81 m/s² x 1 m).

Bei der Dimensionierung nach den Regeln des konstruktiven Ingenieurbaus werden Einwirkungen in der Regel als statische Lasten veranschlagt. Während im Fall der Berechnung der Einklemmsicherheit die Durchbiegung auch direkt durch Einsetzen der Trittenenergie berechnet werden kann, so ist für die Berechnung der Biegespannung im Zuge der Betrachtung der Durchtrittbeständigkeit zunächst die statisch äquivalente Ersatzkraft zu berechnen.

Hierbei wird auf Basis der Zusammenhänge von Biegeenergie, Kraft und Durchbiegung

$$\text{Biegeenergie } E_B \text{ [J]} = (\text{Kraft } F \text{ [N]} \times \text{Durchbiegung } s \text{ [mm]}) / 2000$$

sowie den Bauteilabmessungen, des Biege-Elastizitätsmoduls sowie Kraft und Durchbiegung

$$\text{Durchbiegung } s \text{ [mm]} = \frac{\text{Kraft } F \text{ [N]} \times \text{Länge}^3 \text{ } l^3 \text{ [mm}^3\text{]}}{4 \times \text{Breite } b \text{ [mm]} \times \text{Dicke}^3 \text{ } d^3 \text{ [mm}^3\text{]} \times \text{E-Modul } EM \text{ [N/mm}^2\text{]}}$$

berechnet, für welche Biegeverformung des Bauteils die gleiche Energie notwendig ist, wie sie im Fall der dynamischen Belastung aufgebracht werden würde. Hierfür sind die Formeln jeweils nach der Durchbiegung umzustellen, einander gleichzusetzen und die der Trittenenergie statisch äquivalente Kraft zu berechnen:

$$F = \sqrt{\frac{2000 \times E_B \times 4 \times b \times d^3 \times EM}{l^3}}$$

Die so erhaltene statisch äquivalente Kraft wird dann für die Berechnung der Biegespannung herangezogen.

2.4.5 Beanspruchung der Einwirkung: Biegespannung

Die Biegespannung wird auf Basis der statisch äquivalenten Kraft und den Bohlenabmessungen (Länge l , Breite b , Dicke d) berechnet. Entsprechend des jeweils herangezogenen Energiewertes zur Berechnung der statisch äquivalenten Kraft (F_{EMW} bei Mittelwert der Einwirkung, F_{Ek} bei charakteristischem Wert der Einwirkung, F_{Ed} bei Bemessungswert der Einwirkung) lässt sich der Mittelwert der Biegespannung Q_{EMW} , der charakteristische Wert der Biegespannung Q_{Ek} sowie der Bemessungswert der Biegespannung Q_{Ed} nach folgender Formel berechnen:

$$Q_x [\text{N/mm}^2] = \frac{3 \times F_x [\text{N}] \times l [\text{mm}]}{2 \times b [\text{mm}] \times d^2 [\text{mm}^2]}$$

2.4.6 Auswirkung der Einwirkung: Durchbiegung

Die Durchbiegung lässt sich auf Basis der in Kapitel 2.4.4 aufgeführten Zusammenhänge von Biegeenergie, Kraft und Durchbiegung sowie Bauteilabmessungen, Biege-Elastizitätsmoduls, Kraft und Durchbiegung berechnen. Hierfür sind die dort aufgeführten Formeln nach Kraft umzustellen, einander gleichzusetzen und nach Einsetzen der jeweils relevanten Werte die Durchbiegung zu berechnen:

$$D = \sqrt{\frac{l^3 \times E_B \times 2000}{4 \times b \times d^3 \times EM}}$$

Letztendlich von Interesse ist die Durchbiegung, die unter Annahme des Bemessungswertes der Einwirkung sowie des Bemessungswertes des Biege-Elastizitätsmoduls (Bemessungswert der Baustoffeigenschaft) erhalten wird. Hier sind sowohl die Sicherheitszuschläge der Einwirkung als auch der Baustoffeigenschaften berücksichtigt.

2.4.7 Maximale Beanspruchbarkeit (Biegespannung)

Die maximale Biegespannung X_d , mit der Stallbohlen bestimmter Abmessungen und Holzart beansprucht werden dürfen, entspricht dem Wert des Bemessungswertes der Baustoffeigenschaft, der für die Biegefestigkeit berechnet wurde (BF_{Xd}).

2.4.8 Maximal tolerierbarer Nennwert der Durchbiegung

Als maximal tolerierbarer Nennwert der Durchbiegung D_n ist die Bohlendicke d anzunehmen. So kann verhindert werden, dass ein Spalt zwischen den Bohlen entsteht, der beim Zurückfedern der Bohle für eine Einklemmung von Körperteilen ursächlich wäre.

2.4.9 Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit

Stallbohlen bestimmter Abmessungen und Holzart sind dann als durchtrittbeständig anzunehmen, wenn die auf Basis des Bemessungswertes der Einwirkung berechnete Beanspruchung (Biegespannung) Q_d kleiner-gleich dem Bemessungswert der Baustoffeigenschaft X_d ist:

$$Q_d \leq X_d$$

2.4.10 Prüfung auf Einklemmsicherheit

Stallbohlen bestimmter Abmessungen und Holzart sind dann als einklemmsicher anzunehmen, wenn die Auswirkung (Durchbiegung) der Einwirkung D_X kleiner-gleich dem maximal tolerierbaren Nennwert der Durchbiegung D_n entspricht:

$$D_n \leq D_X$$

2.4.11 Beispielhafte Berechnung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit für Stallbohlen aus Bongossi

Baustoffeigenschaften³

Biegefestigkeit

$$MW(\text{Stabw}) = 162 \text{ (21) N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 162 \text{ N/mm}^2 + 21 \text{ N/mm}^2 \times -1,645 = 127 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = (1,1 \times 127 \text{ N/mm}^2) / 1,3 = 107 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 107 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(\text{Stabw}) = 21.420 \text{ (3.539) N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 21.420 \text{ N/mm}^2 + 3.539 \text{ N/mm}^2 \times -1,645 = 15.599 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = (1,1 \times 15.599 \text{ N/mm}^2) / 1,3 = 13.199 \text{ N/mm}^2$$

Bohlenabmessungen

Länge $l = 1265 \text{ mm}$

Breite $b = 120 \text{ mm}$

Dicke $d = 40 \text{ mm}$

³ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Gérard et al. (2011)

→ Maximal tolerierbares Nennmaß der Durchbiegung $D_n = d = 40 \text{ mm}$

Einwirkung

Trittenergie

$$MW(\text{Stabw}) = 31,6 \text{ (24,3) J}$$

$$E_{95\%} \text{ bzw. } E_k = 70,4 \text{ J}$$

$$E_d = 70,4 \text{ J} \times 1,5 = 105,6 \text{ J}$$

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = \sqrt{\frac{2000 \times 31,6 \text{ J} \times 4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 21.420 \text{ N/mm}^2}{1265^3 \text{ mm}^3}} = 4.532 \text{ N}$$

$$F_{Ek} = \sqrt{\frac{2000 \times 70,4 \text{ J} \times 4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 21.420 \text{ N/mm}^2}{1265^3 \text{ mm}^3}} = 6.765 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = \sqrt{\frac{2000 \times 105,6 \text{ J} \times 4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 21.420 \text{ N/mm}^2}{1265^3 \text{ mm}^3}} = 8.286 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegespannung)

$$Q_{EMW} = \frac{3 \times 4.532 \text{ N} \times 1.265 \text{ mm}}{2 \times 120 \text{ mm} \times 40^2 \text{ mm}^2} = 45 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ek} = \frac{3 \times 6.765 \text{ N} \times 1.265 \text{ mm}}{2 \times 120 \text{ mm} \times 40^2 \text{ mm}^2} = 67 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = \frac{3 \times 8.286 \text{ N} \times 1.265 \text{ mm}}{2 \times 120 \text{ mm} \times 40^2 \text{ mm}^2} = 82 \text{ N/mm}^2$$

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EM_{MW}} = \sqrt{\frac{1.265^3 \text{ mm}^3 \times 31,6 \text{ J} \times 2000}{4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 21.420 \text{ N/mm}^2}} = 13,9 \text{ mm}$$

$$D_{Ek, EM_{MW}} = \sqrt{\frac{1.265^3 \text{ mm}^3 \times 70,4 \text{ J} \times 2000}{4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 21.420 \text{ N/mm}^2}} = 20,8 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EM_{MW}} = \sqrt{\frac{1.265^3 \text{ mm}^3 \times 105,6 \text{ J} \times 2000}{4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 21.420 \text{ N/mm}^2}} = 25,5 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EM_k} = \sqrt{\frac{1.265^3 \text{ mm}^3 \times 105,6 \text{ J} \times 2000}{4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 15.599 \text{ N/mm}^2}} = 29,9 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EM_{Xd}} = D_X = \sqrt{\frac{1.265^3 \text{ mm}^3 \times 105,6 \text{ J} \times 2000}{4 \times 120 \text{ mm} \times 40^3 \text{ mm}^3 \times 13.199 \text{ N/mm}^2}} = 32,5 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit

Mit $Q_{Ed} = 82 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 107 \text{ N/mm}^2$ ist die Biegespannung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Stallbohlen aus Bongossi sind unter den gewählten Rahmenbedingungen somit als durchtrittbeständig zu bewerten. Die Gegenüberstellung dieser Werte sowie die zugehörigen Teilschritte der Berechnung lassen sich in Abbildung 14 nachvollziehen.

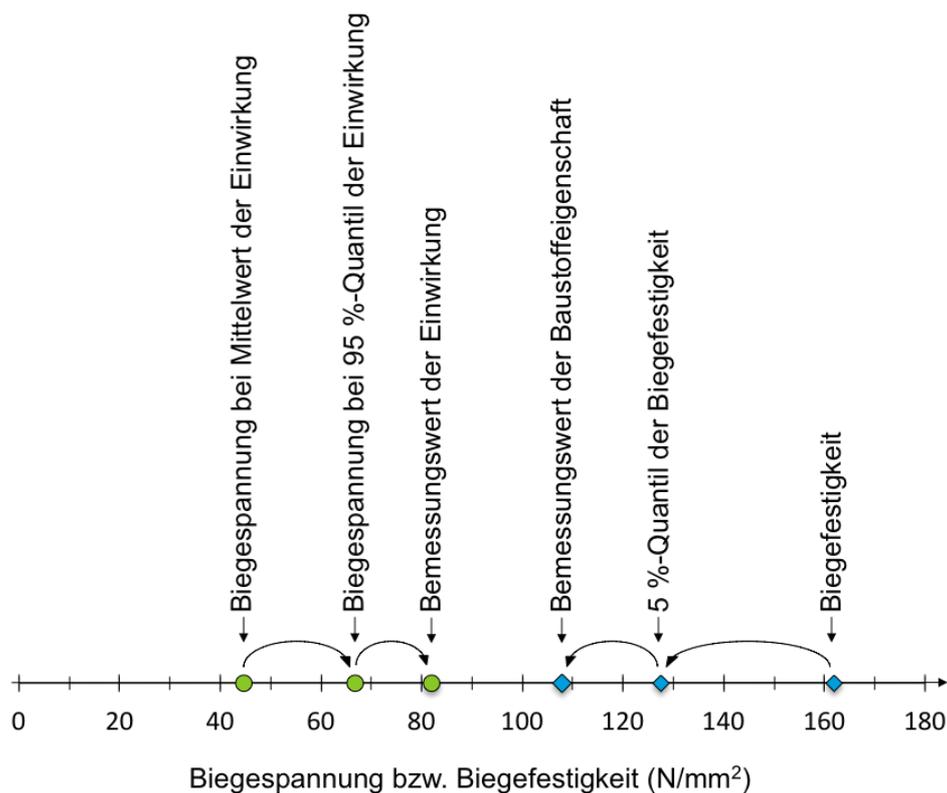


Abbildung 14: Veranschaulichung der Gegenüberstellung des Wertes der Biegespannungen unter Berücksichtigung des Bemessungswertes der Einwirkung und dem Bemessungswertes der Baustoffeigenschaft (Biegefestigkeit) sowie Teilschritte deren Berechnung.

Prüfung auf Einklemmsicherheit

Mit $D_x = 33$ mm (aufgerundet) und $D_n = 40$ mm ist die Durchbiegung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die maximal tolerierbare Durchbiegung des betrachteten Materials. Stallbohlen aus Bongossi sind unter den gewählten Rahmenbedingungen somit als einklemmsicher zu bewerten. Die Gegenüberstellung dieser Werte sowie die zugehörigen Teilschritte der Berechnung lassen sich in Abbildung 15 nachvollziehen.

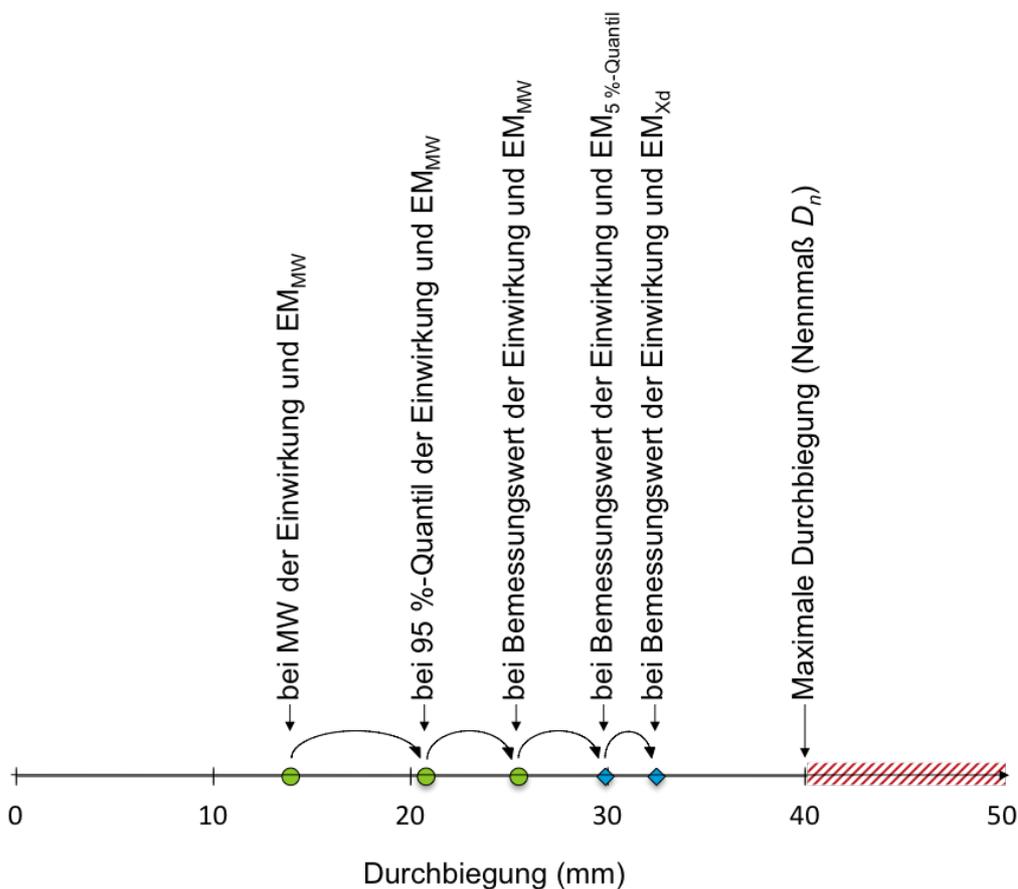


Abbildung 15: Veranschaulichung der Schritte zur Berechnung der Durchbiegung bei Veranschlagung des Bemessungswertes der Einwirkung und dem Biege-Elastizitätsmodul $_{Xd}$ (Bemessungswert der Baustoffeigenschaft) sowie des Nennwertes der maximalen Durchbiegung.

2.4.12 Berechnung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit von Stallbohlen aus ausgesuchten Hölzern

Die Berechnung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit von Stallbohlen aus ausgesuchten Hölzern wird unter folgenden Rahmenbedingungen durchgeführt:

Bohlenabmessungen

Länge $l = 1265$ mm

Breite $b = 120$ mm (160 mm im Fall von Bambus)

Dicke $d = 40$ mm (32 mm im Fall von Bambus)

→ Maximal tolerierbares Nennmaß der Durchbiegung $D_n = d = 40$ mm (32 mm)

Einwirkung

Trittenergie

$MW(Stabw) = 31,6$ (24,3) J

$E_{95\%}$ bzw. $E_k = 70,4$ J

$E_d = 70,4$ J \times 1,5 = 105,6 J

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit

$$Q_{Ed} \leq X_d$$

Prüfung auf Einklemmsicherheit

$$D_n \leq D_x$$

2.4.12.1 Bilina

Baustoffeigenschaften⁴

Biegefestigkeit

$$MW(\text{Stabw}) = 95 \text{ (11) N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 77 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 65 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 65 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(\text{Stabw}) = 14.660 \text{ (1.934) N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 11.479 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 9.712 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 3.750 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 5.597 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 6.855 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 37 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ek} = 55 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 68 \text{ N/mm}^2$$

⁴ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Gérard et al. (2011)

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 16,9 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 25,2 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 30,8 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 34,8 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = 37,9 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 68 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 65 \text{ N/mm}^2$ übersteigt die Biegespannung die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_x = 33 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 40 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die maximal tolerierbare Durchbiegung des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus Bilinga zwar als einklemmsicher, nicht aber als durchtrittbeständig zu bewerten.

2.4.12.2 Buche

Baustoffeigenschaften⁵

Biegefestigkeit

$$MW(Stabw) = 111 (9) \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 96 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 81 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 81 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(Stabw) = 15.300 (1.050) \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 13.573 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 11.484 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 3.831 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 5.718 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 7.003 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 38 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ek} = 57 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 70 \text{ N/mm}^2$$

⁵ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Gérard et al. (2011)

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 16,5 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 24,6 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 30,2 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 32,0 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = D_X = 34,8 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 70 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 81 \text{ N/mm}^2$ ist die Biegespannung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_X = 35 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 40 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die maximal tolerierbare Durchbiegung des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus Buche als durchtrittbeständig und einklemmsicher zu bewerten.

2.4.12.3 Denya

Baustoffeigenschaften⁶

Biegefestigkeit

$$MW(Stabw) = 134 (23) \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 96 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 81 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 81 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(Stabw) = 22.260 (3.348) \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 16.753 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 14.175 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 4.620 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 6.897 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 8.446 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 46 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ek} = 68 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 84 \text{ N/mm}^2$$

⁶ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Gérard et al. (2011)

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 13,7 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 20,4 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 25,0 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 28,8 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = 31,3 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 84 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 81 \text{ N/mm}^2$ übersteigt die Biegespannung die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_x = 32 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 40 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die maximal tolerierbare Durchbiegung des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus Denya zwar als einklemmsicher, nicht aber als durchtrittbeständig zu bewerten.

2.4.12.4 Eiche

Baustoffeigenschaften⁷

Biegefestigkeit

$$MW(Stabw) = 105 (15) \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 67 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 67 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(Stabw) = 13.300 (1.750) \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 10.422 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 8.818 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 3.572 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 5.331 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 6.529 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{EK} = 53 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 65 \text{ N/mm}^2$$

⁷ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Gérard et al. (2011)

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 17,7 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 26,4 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 32,3 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 36,5 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = 39,7 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 65 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 67 \text{ N/mm}^2$ ist die Biegespannung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_x = 40 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 40 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit maximal gleich der maximal tolerierbaren Durchbiegung des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus Eiche als durchtrittbeständig und einklemmsicher zu bewerten.

2.4.12.5 Lärche

Baustoffeigenschaften⁸

Biegefestigkeit

$$MW(Stabw) = 90 \text{ (9⁹) N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 75 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 63 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 63 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(Stabw) = 11.800 \text{ (1.180¹⁰) N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 9.859 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 8.342 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 3.364 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 5.021 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 6.150 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 33 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{EK} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 61 \text{ N/mm}^2$$

⁸ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Gérard et al. (2011)

⁹ Aufgrund fehlender Angabe wird als Standardabweichung ein Wert in Höhe von 10 % der Biegefestigkeit veranschlagt.

¹⁰ Aufgrund fehlender Angabe wird als Standardabweichung ein Wert in Höhe von 10 % des Biege-Elastizitätsmoduls veranschlagt.

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 18,8 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 28,0 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 34,3 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 37,6 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = 40,8 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 61 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 63 \text{ N/mm}^2$ ist die Biegespannung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_x = 41 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 40 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung größer als die maximal tolerierbare des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus Lärche zwar als durchtrittbeständig, nicht aber als einklemmsicher zu bewerten.

2.4.12.6 Movingui

Baustoffeigenschaften¹¹

Biegefestigkeit

$$MW(Stabw) = 116 (13) \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 95 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 80 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 80 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(Stabw) = 14.740 (3.053) \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 9.718 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 8.223 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 3.760 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 5.612 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 6.873 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 37 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ek} = 55 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 68 \text{ N/mm}^2$$

¹¹ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Gérard et al. (2011)

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 16,8 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 25,1 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 30,7 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 37,8 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = 41,1 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 68 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 80 \text{ N/mm}^2$ ist die Biegespannung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_x = 42 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 40 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung größer als die maximal tolerierbare des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus Movingui zwar als durchtrittbeständig, nicht aber als einklemmsicher zu bewerten.

2.4.12.7 BauBuche

Baustoffeigenschaften¹²

Biegefestigkeit

$$MW(Stabw) = - \text{N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 70 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 59 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 59 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(Stabw) = 16.700 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 15.700 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 13.284 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 4.002 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 5.973 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 7.316 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ek} = 59 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 73 \text{ N/mm}^2$$

¹² Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Blaß und Streib (2016), GL 70 hochkant

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 15,8 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 23,6 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 28,9 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 29,8 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = 32,4 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 73 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 63 \text{ N/mm}^2$ übersteigt die Biegespannung die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_\chi = 33 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 40 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die maximal tolerierbare des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus BauBuche zwar als einklemmsicher, nicht aber als durchtrittbeständig zu bewerten.

2.4.12.8 Bambus

Baustoffeigenschaften¹³

Biegefestigkeit

$$MW(Stabw) = 153 (22) \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{5\%} \text{ bzw. } BF_k = 117 \text{ N/mm}^2$$

$$BF_{Xd} \text{ bzw. } X_d = 98 \text{ N/mm}^2$$

→ Beanspruchbarkeit $X_d = 98 \text{ N/mm}^2$

Biege-Elastizitätsmodul

$$MW(Stabw) = 13.016 (1.831) \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{5\%} \text{ bzw. } EM_k = 10.004 \text{ N/mm}^2$$

$$EM_{Xd} = 8.465 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Statisch äquivalente Ersatzkraft

$$F_{EMW} = 2.919 \text{ N}$$

$$F_{EK} = 4.357 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = 5.336 \text{ N}$$

Beanspruchung der Einwirkung (Biegefestigkeit)

$$Q_{EMW} = 34 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ek} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_{Ed} = 62 \text{ N/mm}^2$$

¹³ Quelle für Mittelwert und Standardabweichung: Hübner (2005)

Auswirkung der Einwirkung (Durchbiegung)

$$D_{EMW, EMMW} = 21,6 \text{ mm}$$

$$D_{EK, EMMW} = 32,3 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMMW} = 39,6 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMk} = 45,1 \text{ mm}$$

$$D_{Ed, EMXd} = 49,1 \text{ mm}$$

Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit

Mit $Q_{Ed} = 62 \text{ N/mm}^2$ und $X_d = 98 \text{ N/mm}^2$ ist die Biegespannung mit einer angemessenen Zuverlässigkeit kleiner als die Biegefestigkeit des betrachteten Materials. Mit $D_x = 50 \text{ mm}$ (aufgerundet) und $D_n = 32 \text{ mm}$ ist die Durchbiegung größer als die maximal tolerierbare des betrachteten Materials. Unter den gewählten Rahmenbedingungen sind Stallbohlen aus Bambus zwar als durchtrittbeständig, nicht aber als einklemmsicher zu bewerten.

2.4.13 Diskussion der Berechnungsergebnisse

Unter den gewählten Rahmenbedingungen

- Bohlenabmessungen $1.265 \times 120 \times 40 \text{ mm}^3$ ($l \times b \times d$)
- Bauteilversagen und Durchbiegung sind sicherheitsrelevant
- Biegeeigenschaften nach Gérard et al. (2011)
- maximale Durchbiegung \leq Bohlendicke

sind Stallbohlen aus Bongossi, Buche und Eiche als durchtrittbeständig und einklemmsicher zu bewerten. Im Fall der übrigen betrachteten Materialien (Tabelle 25) übersteigt entweder die Biegespannung die Biegefestigkeit (Bohlen sind nicht durchtrittbeständig) oder die Durchbiegung ist größer als das maximal tolerierbare Nennmaß bzw. die Bohlendicke (Bohlen sind nicht einklemmsicher).

Tabelle 25: Zusammenstellung der Ergebnisse der Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit von Stallbohlen ($1.265 \times 120 \times 40$ bzw. $1.265 \times 160 \times 32 \text{ mm}^3$ im Fall von Bambus) aus verschiedenen Materialien.

Material	Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit		Prüfung auf Einklemmsicherheit			
	Biegespannung	Biegefestigkeit	Durchbiegung	Maximal tolerierbares Nennmaß		
	N/mm ²	N/mm ²	mm	mm		
Bongossi	82	<	107	33	<	40
Bilinga	68	>	65	33	<	40
Buche	70	<	81	35	<	40
Denya	84	>	81	32	<	40
Eiche	65	<	67	40	=	40
Lärche	61	<	63	41	>	40
Movingui	68	<	80	42	>	40
BauBuche	73	>	59	33	<	40
Bambus	62	<	98	50	>	32

Im Fall der Hölzer Bilinga und Denya ist anzumerken, dass die Biegespannung die Biegefestigkeit um lediglich 3 N/mm^2 übersteigt. Dieses Festigkeitsdefizit bzw. diese Überbeanspruchung des Materials ist bei Betrachtung mit Augen eines Praktikers zu vernachlässigen, da zum einen hohe Sicherheitszuschläge auf Beanspruchbarkeit und Beanspruchung berücksichtigt wurden und zum anderen die zu prüfende Bedingung ($Q_{Ed} \leq X_d$) beim Heranziehen einer anderen Datenquelle für die Biegeeigenschaften leicht zu erfüllen wären. Das zeigt sich insbesondere im Fall von BauBuche, für die im Rahmen eigener Versuche eine wesentlich größere Biegefestigkeit ($BF_{5\%} = 108,3 \text{ N/mm}^2$ anstelle von 70 N/mm^2) gemessen wurde. Wenn - wie im Fall von BauBuche im übertra-

genen Sinne geschehen - für Lärche (z.B. C24), Eiche (z.B. D30), Buche (z.B. D40) und Bongossi (z.B. D60) die charakteristischen Werte der Festigkeitsklasse veranschlagt würden, so wären Bohlen aus diesen Hölzern als nicht-durchtrittbeständig zu bewerten.

Im Zuge der Betrachtung der Auswirkungen, die ein Heranziehen der charakteristischen Werte der Festigkeitsklassen für verschiedene Massivhölzer mit sich brächte, ist anzumerken, dass der Bemessungswert der Biegefestigkeit für BauBuche (70 N/mm^2 [Quelle: Blaß und Streib (2016), GL 70 hochkant]) mit dem Bemessungswert der Biegefestigkeit der Festigkeitsklasse D70 (70 N/mm^2) übereinstimmt und der Bemessungswert des Biege-Elastizitätsmodul (15.300 N/mm^2 [Quelle: Blaß und Streib (2016), GL 70 hochkant]) beinahe den Bemessungswert des Biege-Elastizitätsmodul der Festigkeitsklasse D70 (16.800 N/mm^2) erreicht. Diese Betrachtung vermittelt eine Vorstellung davon, dass der Einsatz eines Holzwerkstoffes (veredeltes Holzprodukt) gegenüber einem (unveredelten) Vollholz aufgrund besserer Biegeeigenschaften Vorteile bei der Gestaltung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen bringen kann.

Bei der Prüfung auf Einklemmsicherheit wurde lediglich für Bohlen aus Lärche, Movingui und Bambus festgestellt, dass diese im Fall einer Trittbelastung eine größere Durchbiegung aufweisen können, als das maximal tolerierbare Nennmaß erlaubt. Im Fall von Lärche beträgt die Überschreitung der zulässigen Durchbiegung 1 mm, im Fall von Movingui 2 mm. Im Fall von Bambus beträgt die Überschreitung der zulässigen Durchbiegung 18 mm. Grund hierfür ist die geringere Dicke im Vergleich zu den übrigen Bohlen. Würde die Bohlendicke von 32 mm auf 38 mm vergrößert, so wären auch Stallbohlen aus Bambus als einklemmsicher einzustufen. Würden für die Prüfung der Einklemmsicherheit die charakteristischen Werte herangezogen, die in den jeweiligen Festigkeitsklassen (z.B. C24 für Lärche, D30 für Eiche, D40 für Buche und D60 für Bongossi) für das Biege-Elastizitätsmodul angegeben werden, so wäre für Lärche von einer Überschreitung der maximal tolerierbaren Durchbiegung von 8 mm, für Eiche von 3 mm auszugehen. Ob es tatsächlich sinnvoll ist, die Bohlendicke als maximal tolerierbares Nennmaß der Durchbiegung anzunehmen oder ab welcher Durchbiegung effektiv die Gefahr einer Hufeinklemmung besteht, soll im folgenden diskutiert werden.

Das Maß der Durchbiegungsüberschreitung bezieht sich auf die Bohlenmitte und handelt sich somit um einen Extremwert. Mit zunehmendem Abstand von der Bohlenmitte wird der zwischen den Bohlen bei Biegung entstehende Spalt sukzessive kleiner. Zu klären wäre also, ab welchem Maß es tatsächlich zu einer Hufeinklemmung kommen kann oder ob auch eine mögliche Einklemmung von Schweif, Fell oder Haut für die Festlegung der maximalen Durchbiegung relevant ist.

Im Fall von Boxen-Seitenwände sollte in der Diskussion weiter beachtet werden, dass die Stallbohlen über Nut- und Federprofile miteinander verzahnt sind. Die Möglichkeit zur isolierten Durchbiegung nur einer Bohle, wie es in der Rechnung angenommen wird, ist aus praktischen Gesichtspunkten somit gar nicht möglich. Eine rechnerische Berücksichtigung dieser Verzahnung ist jedoch auch wenig hilfreich, da für die Lastübertragung auf die Nachbarbohle lediglich mit der

Scherfestigkeit gerechnet werden kann. Als Ergebnis würde vermutlich stets ein Scherversagen an der Nut- und Federverbindung erhalten werden.

Im Fall von Stallbohlen für Boxentüren sollte berücksichtigt werden, dass durch das kantenparallele Ausfräsen der Schmalflächen auf einer gewissen Länge die Bohlenbreite reduziert ist und hier tatsächlich keine Verbindung zur Nachbarbohle besteht. Aufgrund der fehlenden Verbindung sowie dem Entstehen von Schlitzten zwischen den Bohlen ist speziell hier ein besonderes Augenmerk auf die maximal tolerierbare Durchbiegung zu richten. Während bei normalen Stallbohlen bis zu einer der Bohlendicke entsprechenden Durchbiegung kein Spalt zwischen den Bohlen entsteht, so ist bei Stallbohlen für Boxentüren bereits im unbelasteten Zustand ein (gewollter) Spalt vorhanden. Übersteigt die Durchbiegung im Lastfall das Maß der Bohlendicke, so addiert sich die Differenz aus Durchbiegung und Bohlendicke zur Breite des Belüftungsschlitzes. Für die Festlegung des maximalen Spaltmaßes ist hier allein der Huf entscheidend, da beim Zurückfedern der Bohle Schweif, Fell oder Haut nicht eingeklemmt werden können (zumindest nicht im Bereich der Ausfräsung).

Mit dem verfolgten Ansatz wird sichergestellt, dass weder eine extreme Einwirkung (95 %-Quantil und Sicherheitsbeiwert), noch eine unterdurchschnittliche Werkstoffeigenschaft (5 %-Quantil des Biege-Elastizitätsmoduls) sowie ungünstige Lasteinwirkungsdauer und Holzfeuchte zu einer unerwünscht großen Durchbiegung führt. Tatsächlich wird dies sogar für den Fall sichergestellt, dass extreme Einwirkung und unterdurchschnittliche Werkstoffeigenschaft (inklusive Lasteinwirkungsdauer und Holzfeuchte) gleichzeitig auftreten.

Eine Vorstellung davon, wie hoch das Sicherheitsniveau im Fall der Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes von 1,5 auf das 95 %-Quantil der Einwirkung ist, kann bekommen werden, wenn für die Berechnung der Durchtrittbeständigkeit allein die Energie des stärksten gemessenen Tritts (93,2 J) veranschlagt wird. Bei diesem Vorgehen wird für den schlimmsten dokumentierten Tritt berechnet, wie groß die Biegespannung und Durchbiegung sind. Hierbei wird für die Materialeigenschaften weiterhin mit einer Eigenschaftsunterschreitungen von lediglich 5 % gerechnet sowie mögliche Einflüsse von Lasteinwirkungsdauer und Feuchtigkeit berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wird hingegen der Sicherheitsbeiwert von 1,5 auf die Einwirkung; es soll schließlich der stärkste Tritt ohne weitere Sicherheitszuschläge untersucht werden. Im Fall von Bongossi würde das bedeuten, dass als Bemessungswert der Einwirkung eine Biegespannung von 77 N/mm^2 (anstelle von 82 N/mm^2) und für die Durchbiegung ein Wert von 31 mm (anstelle von 33 mm) erhalten wird.

Insgesamt ist bei den Ergebnissen der Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit zu beachten, dass mit Ausnahme von Bambus von einheitlichen Bohlenabmessungen ausgegangen wurde. Im Fall von Denya würde eine Vergrößerung der veranschlagten Bohlenbreite von 120 mm um 10 mm auf 130 mm dafür sorgen, dass die Beanspruchung (Biegespannung) auf 81 N/mm^2 sinkt und somit der Beanspruchbarkeit (Biegefestigkeit) entspricht, d.h. Durchtrittbeständigkeit vorliegt. Einen wesentlich größeren Effekt als die Vergrößerung der Bohlenbreite würde

eine Erhöhung der Bohlendicke bewirken, da diese bei der Berechnung der Biegespannung in zweiter Potenz, bei der Berechnung der Durchbiegung in dritter Potenz Berücksichtigung findet.

2.4.14 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen

Formuliertes Projektziel war die dahingehende Dimensionierung, dass bzw. Überprüfung aktueller Abmessungen von Stallbohlen, ob von Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit ausgegangen werden kann. Dieses Ziel wurde versucht darüber zu erreichen, Stallbohlen als sicherheitsrelevante Bauteile im Sinne der Eurocodes aufzufassen und für ausgewählte Materialien entsprechende Berechnungen durchzuführen.

2.5 Verifizierung der Methode zur Dimensionierung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen: Schlagversuche mit künstlichem Huf

2.5.1 Prüfvorrichtung

Das in Kapitel 2.3.1 beschriebene und in Abbildung 7 sowie Abbildung 17 abgezeichnete Groß-Pendelschlagwerk wurde für die Veranschaulichung bzw. Verifizierung der Ergebnisse der Stallbohlendimensionierung mit einem Pendelschlaghammer ausgerüstet, dessen Hammerfinne der Form eines Pferdehufes nachempfunden wurde. Für eine möglichst große Ähnlichkeit mit einem echten Pferdehuf wurde auf den metallischen Grundkörper ein Gummihufeisen montiert, dessen Härte der eines gewöhnlichen Horn-Hufes nahe kommt. Eine Vorstellung von der einem Huf nachempfundenen Hammerfinne kann in Abbildung 16 gewonnen werden. Das Gewicht des künstlichen Hufes (Summe aus Hammerfinne, Gewindestange, zentralem Gewicht am Schwert sowie dem Zusatzgewicht) betrug 60 kg.

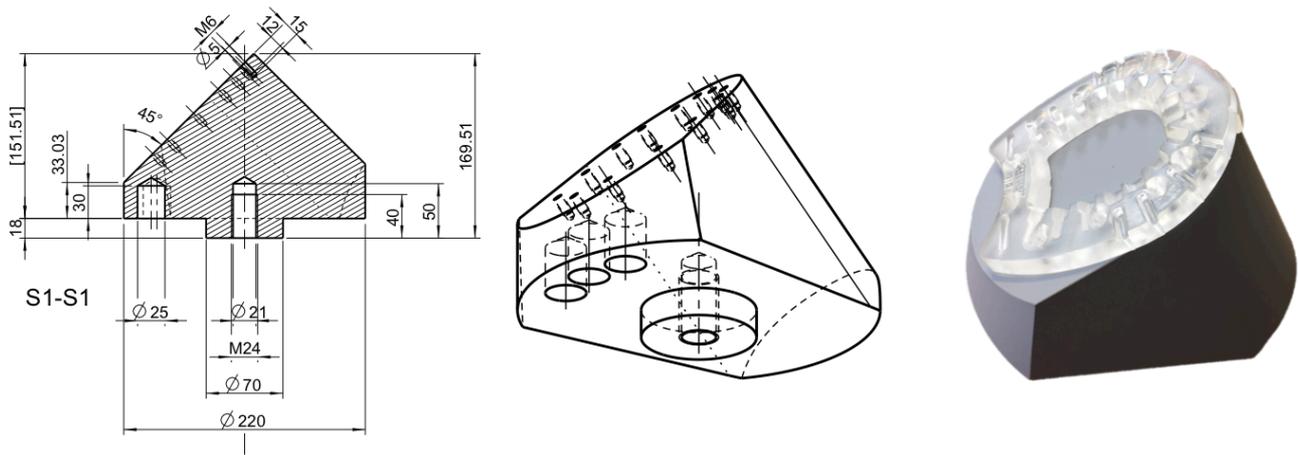


Abbildung 16: Einem Huf nachempfundene Hammerfinne für das Groß-Pendelschlagwerk.



Abbildung 17: Groß-Pendelschlagwerk mit künstlichem Huf bei der Röwer & Rüb GmbH.

2.5.2 Versuchsaufbau

Die Informationstiefe, die Ergebnisse der Schlagversuche mit dem künstlichen Huf haben können, wenn keine statistisch abgesicherte, materialspezifische Kenngröße (wie im Fall der Versuche mit dem C-Hammer gesehen) ermittelt wird, ist vergleichsweise gering. Als Ergebnis eines Versuches, bei dem die Bohle nicht zwangsläufig durchschlagen wird und über die Differenz der Pendelauslenkung vor und nach dem Durchschlagen die absorbierte Energie berechnet wird, kann erhalten werden: „Bohle hält stand“ oder „Bohle hält nicht stand“. Welcher Schlagenergie eine Sorte von Bohle standhält, könnte sich lediglich über die sukzessive Erhöhung der Schlagenergie angenähert werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass für jeden Schlag eine neue Bohle erforderlich wäre, um den Einfluss einer im ersten Durchgang verursachten Schädigung auszuschließen. Die Aussage verzerrend würde sich dann jedoch die Eigenschaftsvariation auswirken. Mit diesem Hintergrund wurden im vorliegend beschriebenen Projekt folgende Versuchsreihen mit dem künstlichem Huf durchgeführt:

- (1) Überprüfung, ob als durchtrittbeständig und einklemmsicher dimensionierte Stallbohlen tatsächlich in keinem Fall Materialversagen oder eine übermäßige Durchbiegung zeigen,
- (2) Beobachtung, ob für Prüfkörper, die anhand empirisch ermittelter Eigenschaftsmittelwerte (ohne Sicherheitszuschläge) dimensioniert wurden, eine gleichmäßige Verteilung des Ergebnisses „Bohle hält stand“ oder „Bohle hält nicht stand“ erzielt wird, wie es aufgrund der Normalverteilung der Eigenschaftskennwerte zu erwarten ist.

2.5.2.1 Überprüfung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit entsprechend dimensionierter Bohlen

Entsprechend der in Kapitel 2.4.11 ff. vorgestellten Berechnung zur Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit wurden die Abmessungen (Breite) von Stallbohlen aus Bau-Buche so eingestellt, dass als Ergebnis die Bedingungen für Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit (Biegespannung kleiner-gleich Biegefestigkeit und Durchbiegung kleiner-gleich maximal tolerierbarem Nennmaß) erfüllt sind.

Bei Annahme einer Bohlenlänge von 1.265 mm, -breite von 185 mm und -dicke von 40 mm sowie einer Trittenenergie von 105,6 J wird eine Biegebeanspruchung von 59 N/mm^2 (entspricht der Biegebeanspruchbarkeit) und eine Durchbiegung von 27 mm (deutlich kleiner als die Bohlendicke) erhalten. Bohlen dieser Abmessungen sind somit als durchtrittbeständig und einklemmsicher zu bewerten.

Bei Beaufschlagung dieser Bohlen mit einer Schlagenergie von 105,6 J (Bemessungswert der Einwirkung: Produkt von 95 %-Quantil der in Kapitel (1) bestimmten Trittenenergie und Sicherheitsbeiwert) ist also davon auszugehen, dass die Bohlen auch beim Vorliegen geringer Materialeigen-

schaften (aufgrund der Eigenschaftsvariation) weder Versagen, noch stärker als maximal tolerierbar durchbiegen.

Die Überprüfung, ob im Fall der Schlagbelastung ein Versagen der Bohle stattgefunden hat, wird ohne technische Hilfsmittel allein auf Basis der visuellen und akustischen Begutachtung des Versuches beurteilt. Zur Prüfung der Einhaltung des maximal tolerierbaren Nennmaßes werden die aufgezeichneten Winkel herangezogen. Mit Hilfe des Sinussatzes wird so die maximale Durchbiegung der Bohlen berechnet.

2.5.2.2 Beobachtung der Ergebnisverteilung bei Prüfung von Bohlen, die ohne Sicherheitszuschläge dimensioniert wurden

In Anlehnung an die in Kapitel 2.4.11 ff. vorgestellte Berechnung zur Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit wurden die Abmessungen (Breite) von Stallbohlen aus Bau-Buche unter den Rahmenbedingungen

- Verwendung der empirisch ermittelten Biegeeigenschaftsmittelwerte (Kapitel 2.3)
 - Biegefestigkeit: $122,6 \pm 13,1 \text{ N/mm}^2$
 - Biege-Elastizitätsmodul: $13.609 \pm 958 \text{ N/mm}^2$
- Nicht-Berücksichtigung verringerter Eigenschaften aufgrund
 - der Bauteilexposition gegenüber dem Umgebungsklima
 - der Lasteinwirkungsdauer
 - unvorhersehbarer Imperfektionen

so eingestellt, dass als Ergebnis die Bedingungen für Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit (Biegespannung kleiner-gleich Biegefestigkeit und Durchbiegung kleiner-gleich maximal tolerierbarem Nennmaß) gerade noch erfüllt werden.

- (1) Bei Annahme einer Bohlenlänge von 1.265 mm, -breite von 34 mm und -dicke von 40 mm sowie einer Trittenenergie von 105,6 J wird eine Biegebeanspruchung von $122,6 \text{ N/mm}^2$ (entspricht der Biegebeanspruchbarkeit) erhalten. Bei Beaufschlagung dieser Bohlen mit einer Schlagenergie von 105,6 J (Bemessungswert der Einwirkung: Produkt von 95 %-Quantil der in Kapitel (1) bestimmten Trittenenergie und Sicherheitsbeiwert) ist also davon auszugehen, dass Bohlen mit durchschnittlichen und überdurchschnittlichen Materialeigenschaften nicht versagen, Bohlen mit unterdurchschnittlichen Materialeigenschaften versagen.
- (2) Bei Annahme einer Bohlenlänge von 1265 mm, -breite von 77 mm und -dicke von 40 mm sowie einer Trittenenergie von 105,6 J wird eine Durchbiegung von 40 mm (entspricht dem maximal tolerierbaren Nennmaß) erhalten. Bei Beaufschlagung dieser Bohlen mit dem Bemessungswert der Einwirkung ist davon auszugehen, dass Bohlen mit durchschnittlichen

und überdurchschnittlichen Materialeigenschaften nicht stärker durchbiegen, als es das maximal tolerierbare Nennmaß erlaubt, Bohlen mit unterdurchschnittlichen Materialeigenschaften stärker durchbiegen, als es das maximal tolerierbare Nennmaß erlaubt.

Die Überprüfung auf Versagen (Bruch) und übermäßige Durchbiegung wird wie im vorherigen Fall vorgenommen.

2.5.3 Ergebnisse

2.5.3.1 Überprüfung der Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit entsprechend dimensionierter Bohlen

Insgesamt wurden 10 Bohlen mit einer mittleren Schlagenergie von 111,6 Joule beaufschlagt. Diese Schlagenergie wurde durch eine Auslenkung des Pendelhammers aus seiner Ruhelage um im Mittel 35,9° erreicht.

Im Rahmen der Versuche wurde für keine der untersuchten Bohlen Versagen festgestellt. Alle Bohlen hielten der Belastung stand. Der Pendelhammer wurde nach Beaufschlagung der Bohle von dieser beim Zurückfedern in nahezu seine Ausgangsposition zurückgeworfen. Die mittlere Durchbiegung der Bohlen betrug 19 mm. Der Maximalwert betrug 22 mm.

Auf Basis der maximalen Auslenkung des Pendelhammers im Zuge des Zurückfederns der Bohle wurde berechnet, dass im Mittel insgesamt 46,2 Joule absorbiert wurden.

2.5.3.2 Beobachtung der Ergebnisverteilung bei Prüfung von Bohlen, die ohne Sicherheitszuschläge dimensioniert wurden

Für die 11 Bohlen, die so dimensioniert wurden, dass eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper bricht und eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper der Belastung standhält, wurde annähernd genau dieses Ergebnis beobachtet. Bei einer mittleren Schlagenergie von 110,1 Joule (35,6°) hielten 6 Bohlen der Belastung stand und 5 Bohlen brachen. Auf Basis der maximalen Auslenkung des Pendelhammers im Zuge des Zurückfederns der Bohle wurde für die nicht-gebrochenen Bohlen berechnet, dass im Mittel 51,1 Joule absorbiert wurden.

Im Fall der 13 Bohlen, die so dimensioniert wurden, dass eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper übermäßig durchbiegt und eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper weniger als das maximal tolerierbare Nennmaß von 40 mm durchbiegt, wurde nie eine übermäßige Durchbiegung beobachtet. Bei einer mittleren Schlagenergie von 108,7 Joule betrug die mittlere Durchbiegung 29 mm, die

maximale Durchbiegung 31 mm. Auf Basis der maximalen Auslenkung des Pendelhammers im Zuge des Zurückfederns der Bohle wurde berechnet, dass im Mittel 44,6 Joule absorbiert wurden.

2.5.3.3 Nebenergebnis

Für die beschriebenen Versuche wurden die Bohlen in Metall-C-Profile eingeschoben (Auflager), wie sie in der Praxis zum Bau von Boxen verwendet werden (Abbildung 18a). Im Laufe der Versuche wurde festgestellt, dass sich der belastete Schenkel des C-Profils unter der wiederkehrenden Belastung aufgebogen hat (Abbildung 18b).

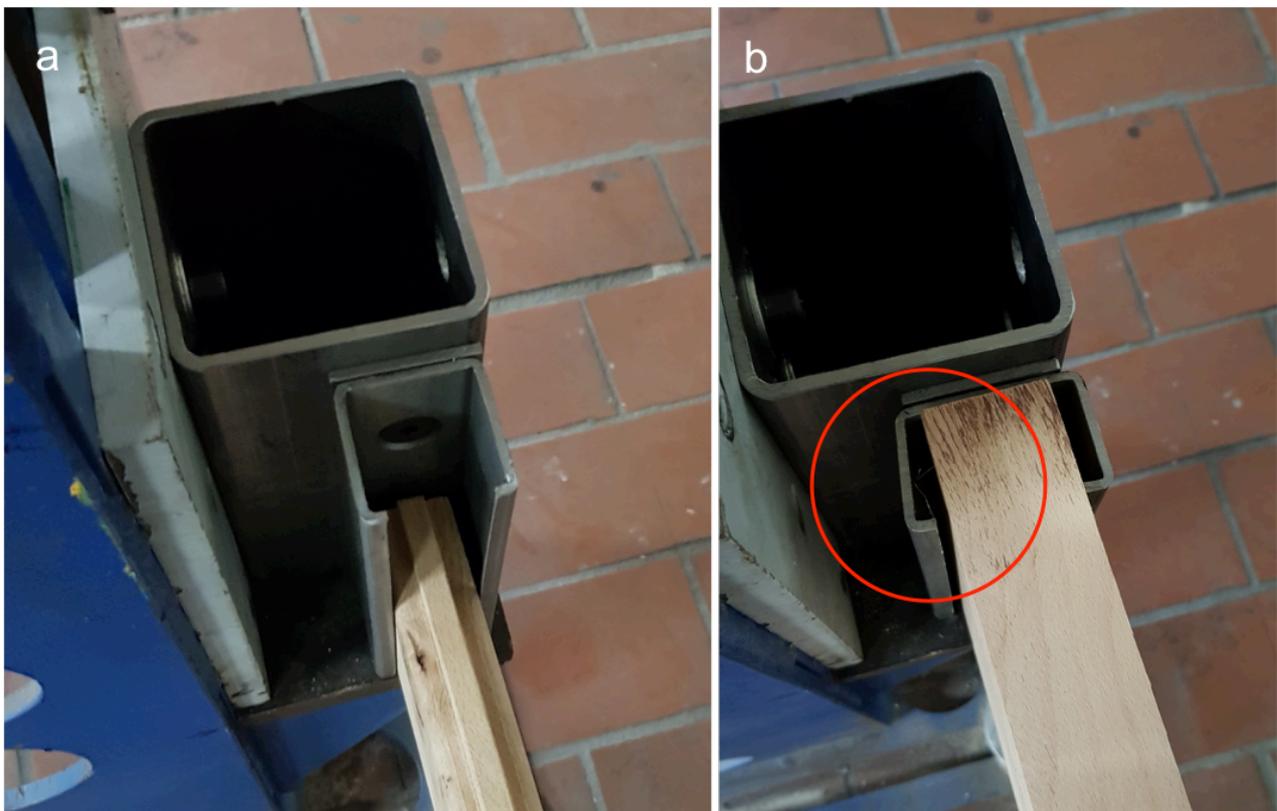


Abbildung 18: (a) Metall-C-Profil mit 32 mm-Aufnahme für Bambusbohlen; (b) Metall-C-Profil mit 40 mm-Aufnahme für Vollholzbohlen, eingekreist ist hier der aufgebogene Schenkel nach mehrfacher Schlagbelastung der Bohle.

Diese Beobachtung zeigt, dass nicht allein die Stallbohlen in Bezug auf die zu erwartenden Belastungen dimensioniert werden müssen, sondern auch die übrigen Boxenkomponenten, wenn ein insgesamt stimmiges Konzept umgesetzt werden soll. Auch wenn ein bedingtes Aufbiegen des Metall-C-Profils noch mehrfacher, heftiger Schlageinwirkung nicht sofortigen Handlungsbedarf im Bezug auf die tierschutzgerechte Unterbringung von Pferden bedeutet, so zeigt es doch, an welcher Stelle konstruktives Optimierungspotenzial besteht.

2.5.4 Diskussion

Die Schlagversuche mit dem künstlichen Huf konnten zeigen, dass die Methode zur Dimensionierung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen grundsätzlich valide ist. Alle im Hinblick auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit dimensionierten Stallbohlen haben der zugrunde gelegten Belastung standgehalten. Im Fall der Bohlen, die so dimensioniert wurden, dass eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper bricht und eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper der Belastung standhält, wurde annähernd genau dies als Ergebnis erhalten. Im Fall der Bohlen, die so dimensioniert wurden, dass eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper übermäßig durchbiegt und eine Hälfte der untersuchten Prüfkörper weniger als das maximal tolerierbare Nennmaß durchbiegt, konnte kein vergleichbares Ergebnis erzielt werden. Zumindest jedoch wurde in keinem Fall das maximal tolerierbare Nennmaß überschritten, für die Praxis wichtig ist.

2.5.5 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen

Formuliertes Ziel war die Ausstattung des Groß-Pendelschlagwerkes mit einem Pendelhammer, dessen Pinne der Form eines Hufes nachempfunden ist. Mit dem derart aufgebauten Pendelschlagwerk sollte die Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit entsprechend dimensionierter Stallbohlen überprüft werden.

Im Rahmen des vorliegend beschriebenen Projektes wurden beide Vorhaben (Bau der beschriebenen Prüfvorrichtung, Prüfung in Bezug auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit dimensionierter Stallbohlen) erfolgreich umgesetzt werden.

2.6 Alternative Hölzer

2.6.1 Gründe für die Suche nach Alternativen, Vorschläge für Alternativen, Informationen zur Robinie

Neben der Erarbeitung einer Herangehensweise zur Gestaltung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen war es Ziel dieses Projektes, Alternativen zu Tropenhölzern für die Herstellung von Stallbohlen vorzuschlagen. Grund für die Suche nach Alternativen sind der noch immer in der Öffentlichkeit bestehende Vorbehalt und die Ablehnung gegenüber der Nutzung von Tropenholz. Als ursächlich für Vorbehalt und Ablehnung ist der Ende der 80er Jahre von verschiedenen Umweltschutzorganisationen initiierte Boykott von Tropenholz zu vermuten, der jedoch wegen Kontraproduktivität in die Forderung einer bestandsschützenden, nachhaltigen Bewirtschaftung tropischer Wälder verändert wurde (Anonymous 1997).

Im Rahmen der Bestimmung verschiedener Biegeeigenschaften ausgesuchter Hölzer und Holzwerkstoffen (Kapitel 2.3) sowie der beispielhaften Berechnung von Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit (Kapitel 2.4) wurden bereits indirekt Alternativen vorgeschlagen (BauBuche, Buche, ...). Unter Berücksichtigung der geringen Anforderungen in Bezug auf die Dauerhaftigkeit an Stallbohlen für Boxen „unter Dach“ und ohne Mistkontakt (siehe Benthien et al. 2018), kommen neben Buche auch andere schwere Laubhölzer heimischen Ursprungs infrage. Beispielhaft aufzuführen sind hier die Hölzer Esche, Hainbuche, Birke und Robinie. Ein Eindruck der optischen Erscheinung dieser Hölzer kann in Abbildung 19 gewonnen werden.

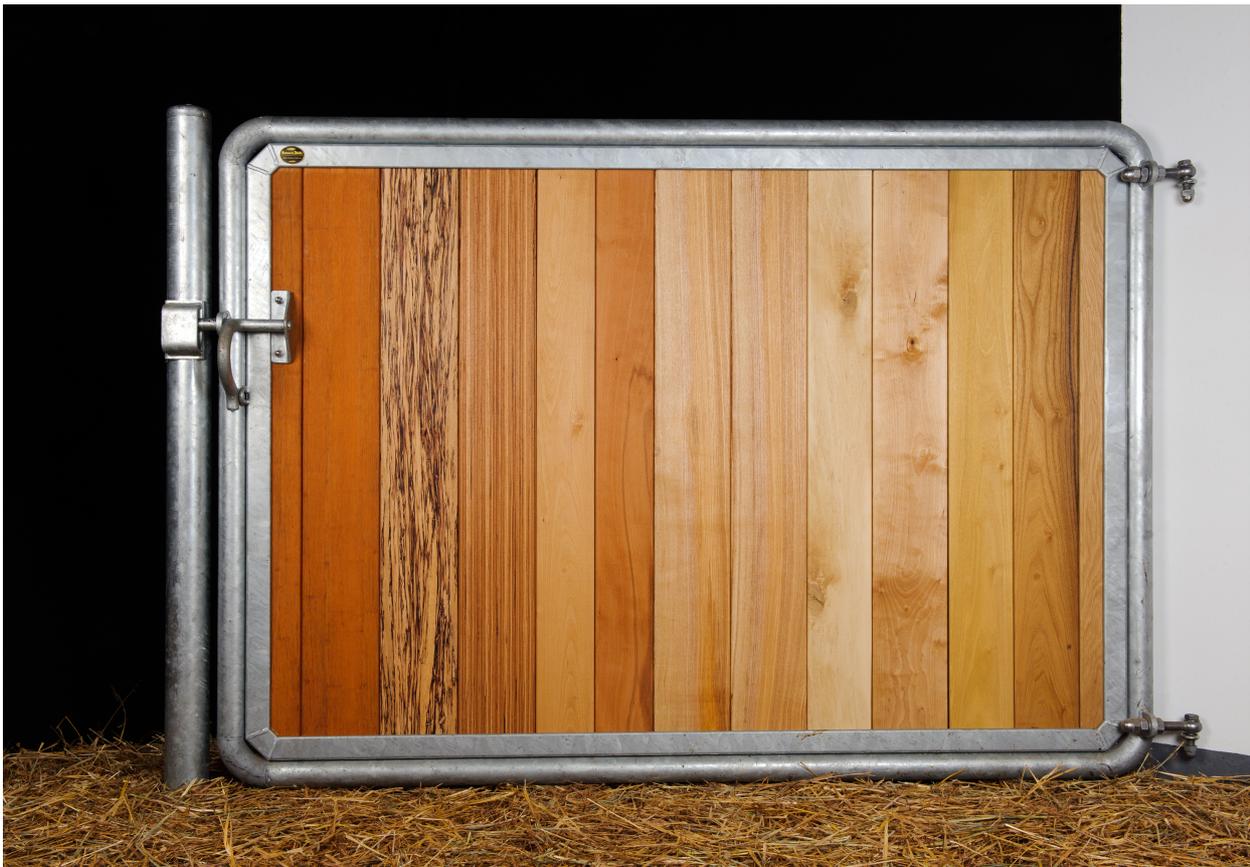


Abbildung 19: Beispielhafte Füllung des schwenkbaren Seitenelementes aus den Versuchen in Kapitel (1) mit verschiedenen Materialien (v. l. n. r.: 2 x Bambus, Buchen-Scrimber, BauBuche, 2 x Buche, 2 x Esche, Hainbuche, Birke, 2x Robinie, Eiche).

Beim Vergleich der Biegeeigenschaften (Bruchschlagarbeit, Biegefestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul) der beispielhaft aufgeführten Alternativen (Tabelle 26) mit denen gängiger Hölzern (Tabelle 7, Tabelle 14) ist zu erkennen, dass diese nur zum Teil hinter denen der schweren Tropenhölzer zurück bleiben. Die mechanischen Eigenschaften von Bilinga werden sogar überstiegen.

Tabelle 26: Biegeeigenschaften von Esche, Hainbuche, Birke und Robinie aus Sell (1997).

Holzart	Bruchschlagarbeit (kJ/m ²)	Biegefestigkeit (N/mm ²)	Biege-Elastizitätsmodul (N/mm ²)
Esche	67...68	100...127	11.900...13.900
Hainbuche	80...120	115...160	12.000...16.000
Birke	75...100	120...144	13.300...16.200
Robinie	112...170	118...145	11.000...15.700

An Stallbohlen, die im ständigen Mistkontakt stehen (Mistbrett), regelmäßig mit Tränkwasser befeuchtet werden oder für Außenställe oder Führanlagen eingesetzt sind, werden höhere Anforderungen in Bezug auf die Dauerhaftigkeit gestellt. Hier rückt die Robinie in den Fokus, da sie der Dauerhaftigkeitsklasse 1-2 zugeordnet ist und somit in der Gebrauchsklasse 3.2 eingesetzt werden kann. Ähnlich dauerhaft und damit ebenfalls in Gebrauchsklasse 3.2 einsetzbar ist die Edelkastanie.

Gegenüber dem Einsatz von Robinie als Stallbauholz besteht jedoch Skepsis. Die Robinie gilt als giftig, da das Anknabbern von Zaunpfählen zu Gesundheitsbeeinträchtigungen (bis hin zum Tod) bei Pferden geführt hat. Hierbei wird jedoch häufig nicht ausreichend dazwischen unterschieden, ob das Kernholz, der Splint oder die Rinde der Robinie aufgenommen wurde.

Wie kürzlich von Weiß (2018) vorgestellte Ergebnisse einer chemischen Analyse des Holzes von Robinie auf toxische Substanzen nahelegen, ist vornehmlich die Rinde, weniger das Splintholz und wohl kaum das Kernholz für Vergiftungen verantwortlich. Im Rahmen der Versuche zur Bestimmung des Gehaltes an toxischen Eiweißen, die am Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD), Ressort Chemie und Umwelt, von Prof. Dr. habil. Beyer durchgeführt wurden, zeigte sich, dass die Konzentration an giftigen Lectinen in der Rinde 9...10 % beträgt, im Splintholz hingegen nur noch 1,8...2,5 % und im Kernholz 1...1,15 %.

Aus der Kombination dieser Ergebnisse mit den Ergebnissen von Fütterungsversuchen von Fardel (1934) ist zu vermuten, dass aufgrund der nötigen Menge eine Vergiftung durch Kernholz praktisch kaum möglich ist. Fardel fand, dass bei der Aufnahme von 70 g Rinde mit leichten Kolikerscheinungen, bei 100 g mit einer kruppösen Darmentzündung und bei 150 g mit dem Tod des Pferdes zu rechnen ist. Berechnet man nun überschlägig die Menge an Kernholz, die die gleiche Menge an Toxinen enthält, so müssten rund 1,3 kg aufgenommen werden, um eine gleiche Wirkung wie 150 g Rinde zu erzielen.

Es ist somit eher zu vermuten, dass im Fall der Erkrankungen stets am Koppelpfahl verbliebene Rinde oder Splintholz ursächlich für eine Vergiftung waren. Im Fall von Stallbohlen ist eine vergleichbar schlechte Entfernung von Rinde und Splintholz unwahrscheinlich, da hier nicht Rundholz sondern Holzbohlen als Ausgangsmaterial dienen. Die alleinige Verwendung von Kernholz zur

Herstellung von Stallbohlen ist schon allein aus Gründen der Langlebigkeit von Boxen notwendig, da nur das Kernholz einer Zersetzung durch Pilze und Insekten dauerhaft widerstehen kann.

2.6.2 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen

Im Rahmen des Projektes sollten Alternativen zu derzeit gängigen Materialien zur Herstellung von Stallbohlen vorgeschlagen werden. Dies wurde unter anderem in diesem Kapitel gemacht sowie darüber hinaus die Kriterien zusammengefasst, die neben Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit zu erfüllen sind.

2.7 Ansätze zur Entwicklung energieabsorbierender oder flexibler Stallbohlen

2.7.1 Hintergründe, Ideen, Diskussion

Für die Verfolgung des Zieles der Entwicklung energieabsorbierender oder flexibler Stallbohlen erscheint es sinnvoll, vorab die Bedeutung der Begrifflichkeiten „energieabsorbierend“ und „flexibel“ näher zu klären. Wichtig in diesem Zusammenhang sind weiter der „elastische Stoß“ und der „plastische Stoß“.

Ein Stoß ist als Vorgang definiert, bei dem (mindesten) zwei Körper kurzzeitig Kraft aufeinander ausüben. Als Folge ändern die Körper ihren Bewegungszustand und möglicherweise ihre Form. Grundsätzlich gilt der Energieerhaltungssatz, d.h. Energie geht nicht verloren, sondern wird maximal in eine andere Energieform umgewandelt.

Im Fall eines ideal elastischen Stoßes wird kinetische Energie des Anprallobjektes (in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen) auf den gestoßenen Gegenstand übertragen, ohne dass hierbei Energie in Wärme oder Deformation, d.h. innere Energie umgewandelt wird. Im Fall eines ideal plastischen Stoßes wird die kinetische Energie des Anprallobjektes in innere Energie umgewandelt. Als Beispiel für einen elastischen Stoß lässt sich (idealisiert) das Auftreffen einer Billardkugel auf eine andere anführen. Als Beispiel für einen plastischen Stoß lässt sich (idealisiert) das Auftreffen einer Stahlkugel auf einen Sandsack vorstellen. Während im ersten Beispiel das Anprallobjekt seine kinetische Energie an die angespielte Kugel weitergibt, so absorbiert im zweiten Fall der Sandsack die kinetische Energie der Stahlkugel über Formänderung.

Würde die Entwicklung „energieabsorbierender“ Stallbohlen angestrebt werden, so müsste es beim Auskeilen zu einem plastischen Stoß kommt. Die Energie, mit der ein Pferd eine Bohle beaufschlägt, müsste in innere Energie (Deformation und Wärme) umgewandelt werden. Dies wäre

bei einer herkömmlichen Stallbohle der Fall, wenn diese versagt (Bruch). Hier wird die Trittenergie durch die plastische Verformung der Stallbohle absorbiert. Als energieabsorbierend dürfte auch ein Vorhang aus einer schweren Gummimatte als Boxentrennwand gewertet werden können. Hier würde es im Fall eines Tritts zu einer Deformation der Matte und Beschleunigung aus deren Ruhelage kommen. Die Trittenergie würde über die Verformung und das Anheben der Gummimatte aus ihrer Ruhelage gegen die Erdanziehungskraft absorbiert. Weder die plastische Verformung einer Stallbohle, noch eine herabhängende Gummimatte erfüllen die Anforderungen, die im Allgemeinen an eine Boxentrennwand gestellt werden.

Da der Huf nach dem Auskeilen aktiv zurückgezogen wird und es nicht wie im Beispiel des Auftreffens einer Stahlkugel auf einen Sandsack um deren Fixierung geht, wäre es ausreichend, wenn die kinetische Energie kurzfristig durch Deformation gespeichert und dann durch die Einstellung des Ursprungszustands wieder abgegeben wird. Als Beispiel hierfür könnte man sich den Sprung auf ein Trampolin vorstellen: Die kinetische Energie des Anprallobjektes wird über die Deformation von Federn aufgenommen, gespeichert und im Zuge des Einstellens des Ausgangszustandes wieder abgegeben. Wichtig ist hierbei lediglich, dass es sich um einen elastischen Vorgang handelt (d.h. die Energieaufnahme nicht zu einer plastischen Verformung und somit Bauteilversagen kommt) und die Verformung innerhalb definierter Grenzen bleibt. Eine Stallbohle dürfte beispielsweise nicht so stark durchbiegen, dass es zu einer Hufeinklemmung kommen kann. Auch wäre es nicht zu akzeptieren, wenn ein flächiges, sehr flexibles Material bis weit in die Nebenbox bewegt werden würde.

Für die Entwicklung einer funktionsoptimierten Boxentrennwand (im Sinne von energieabsorbierend oder energiespeichernd) ist zu berücksichtigen, dass diese durchtrittbeständig und einklemmsicher ist und im Fall des Zulassens einer Bewegung aus deren Ruhelage der Aufenthalt auf der Rückseite der Trennwand uneingeschränkt möglich ist. Insgesamt muss die Trennwand die Merkmale einer herkömmlichen Seitenwand aufweisen, d.h. es muss sich um ein weitestgehend starres Gebilde handeln.

Festzustellen ist, dass der herkömmliche Aufbau einer Boxentrennwand grundsätzlich zweckmäßig ist. Ein starres Grundgerüst positioniert Holzbohlen so, dass zwei Einstellflächen zuverlässig voneinander getrennt werden. Bei entsprechender Dimensionierung nehmen diese Stallbohlen die Energie eines Tritts über Deformation auf und geben diese beim Zurückfedern wieder ab, ohne dass eine Veränderung am Bauteil zu erwarten ist. Vorteil diesem Aufbau ist, dass sich die Einzelkomponenten vergleichsweise einfach berechnen lassen.

Soll Last von den Stallbohlen genommen werden, was insgesamt eine schlankere Dimensionierung ermöglichen würde, so könnten federnde Komponenten integriert werden. Diese müssten so gestaltet sein, dass durch die resultierende Bewegung der Trennwand nicht die Gefahr einer Hufeinklemmung entsteht. Vorstellbar wäre beispielsweise, das Grundgerüst über einen Gummistreifen oder Federn von einem die Stallbohlen fassenden Rahmen zu trennen. Dieser Aufbau würde insgesamt den Charakter der Trennwand erhalten, einen Teil der „Energie-

Zwischenspeicherung“ von den Stallbohlen auf das Gummi bzw. die Federn verlagern. Neben der komplexeren Berechnung dieses Systems wäre weiter zu bedenken, wie ein Tritt gegen das Grundgerüst zu berücksichtigen ist.

Der alternative Einsatz von Kunststoff als Stallbohle hätte den Vorteil, dass ein speziell mit den erforderlichen Eigenschaften gestaltetes Material eingesetzt werden würde. In Erfahrung zu bringen ist in diesem Zusammenhang jedoch, welcher Preis für einen speziell eingestellten, nicht im Massenmarkt standardmäßig erhältlichen Kunststoff aufgerufen werden würde. Zu beachten ist grundsätzlich, dass Holz im Gegensatz zu Kunststoffen eine warme und natürliche Ausstrahlung hat und entscheidend zur Gesamterscheinung eines Stalls beiträgt. Naheliegender als der Einsatz von Kunststoffbohlen wäre es daher, Verbundwerkstoffbohlen mit mindestens der Decklage aus Holz einzusetzen, wobei hier ein Mehrwert die voraussichtlich höheren Produktionskosten gegenüber Bohlen aus Holz rechtfertigen müssten.

2.7.2 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegeben Zielen

Im Projekt sollten Ansätze zur Entwicklung energieabsorbierender oder flexibler Stallbohlen erarbeitet werden. Im Anschluss an eine nähere Definition der Begrifflichkeiten „energieabsorbierend“ und „flexibel“ sowie der genaueren Betrachtung der Unterschiede zwischen einem „elastischen Stoß“ und einem „plastischen Stoß“ wurden Möglichkeiten diskutiert, wie Stallelemente umgestaltet werden könnten. Auf Basis dieser Ansätze könnte nun eine umfangreichere Beschäftigung mit diesem Thema beginnen.

3 Diskussion der Projektergebnisse

3.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit dem Tierschutzgesetz werden von der Gesellschaft für wichtig und richtig betrachtete Mindeststandards im Umgang des Menschen mit Tieren verbindlich geregelt. Neben anderen Aspekten werden hier Mindestanforderungen formuliert, die an die Haltungsbedingungen von Tieren gestellt werden. Mit dem Ziel, dass diese in der Pferdehaltung ihrer Intention nach umgesetzt werden können, wurden von der Bundesregierung in 2009 die „Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutzgesichtspunkten“ herausgegeben. In Bezug auf die Ausgestaltung von Stallbohlen sind diese jedoch zu unkonkret sind, als dass sie in der Praxis direkt umgesetzt werden könnten.

Grund dafür, dass die Anforderungen an die Ausgestaltung von Stallbohlen unkonkret formuliert sind, ist die Tatsache, dass bislang kein verlässliches Wissen dazu vorliegt, mit welcher Last Stallbohlen im Fall des Auskeiles belastet werden. Entsprechend lagen bislang auch keine Vorschläge dazu vor, wie die im Tierschutzgesetz formulierten Anforderungen

- „Boxenabtrennungen müssen so ausgeführt werden, dass keinesfalls ein Einklemmen der Hufe möglich ist“ (d.h. einklemmsicher)
- „Trennwände müssen durchtrittfest sein“ (d.h. durchtrittbeständig)

erfüllt bzw. nachgewiesen werden können.

Mit dem Ziel einer dahingehenden Erneuerung der Vorgehensweise bei der Gestaltung von durchtrittbeständigen und einklemmsichere Stallbohlen war es notwendig, zunächst die beim Auskeilen wirksam werdende Trittenenergie zu bestimmen und die in der Literatur angegebenen Trittstärken auf Plausibilität zu prüfen. Weiter war es notwendig herauszufinden, welche Art der Biegeeigenschaften (statisch oder dynamisch) und im Detail welche Biegeeigenschaft (Biegearbeit, Biegefestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul) für eine Berechnung von Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit relevant sind, welchen Einflussfaktoren diese Materialeigenschaften unterliegen und wie zuverlässig Literaturangaben sind. Das Vorschlagen einer Vorgehensweise zur Gestaltung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen war notwendig, um der Pferdewirtschaft die Möglichkeit zu geben, die Haltung von Pferden entsprechend den Vorgaben des Tierschutzgesetzes praktisch gestalten zu können. Die durchgeführten Arbeiten waren weiter Voraussetzung dafür, die Einsatzmöglichkeit alternativer Materialien für den Boxenbau zu bewerten. Der Bau und die Anwendung eines Groß-Pendelschlagwerkes war notwendig, um die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten zu verifizieren.

Da alle durchgeführten Arbeiten einen wichtigen Beitrag zur Lösung der Problemstellung geliefert haben, sind diese als angemessen zu bewerten.

3.2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Mit dem Wissen um die beim Auskeilen wirksam werdende Energie sowie dem Vorschlag eines Verfahrens zur Berechnung der Abmessungen durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen versetzt in die Lage, nachweislich tierschutzgerechte Pferdeboxen anbieten zu können. Über die detaillierte Betrachtung der Einbausituationen von Stallbohlen (Benthien et al. 2018) konnte Klarheit darüber geschaffen werden, für welchen Anwendungsfall welche Dauerhaftigkeit erforderlich ist. Durch die Kombination beider Erkenntnisse wird es möglich, alternative Materialien für die Herstellung von Stallbohlen zu finden. Die Umsetzung dieses Wissens kann zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen der Pferdewirtschaft genutzt werden, da auf das Interesse von Pferdehaltern nach einer bestmöglichen, verletzungssicheren Unterbringung ihrer Tiere eingegangen werden kann.

Neben dem Zugewinn an Reputation und Expertise für die Forschungspartner, nützten die Projektergebnisse einer breiten Interessensgruppe um das Nutztier Pferd. Nicht zuletzt dienen die Projektergebnisse dem Wohlergehen des in Obhut des Menschen lebenden Pferdes.

3.3 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens wurden dem Zuwendungsempfänger keine Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt.

3.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

BENTHIEN JT (2016) Ausfachungsbohlen für Pferdeboxen auf dem Prüfstand - Gemeinschaftsprojekt des Thünen-Instituts für Holzforschung und des Testzentrums Technik und Betriebsmittel der DLG. Holz-Zentralblatt 142(1):16

BENTHIEN JT, ENGEHAUSEN N, GÄCKLER S, OHLMEYER M (2019) Schlagzähigkeit von Stallbohlen für Pferdeboxen - Einflussgrößen auf die Bruchschlagarbeit. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 45 p, Thünen Working Paper 121, DOI:10.3220/WP1551778748000

- BENTHIEN JT, GÄCKLER S, KRAUSE A, AL SAMARRAIE A, OHLMEYER M (2019) Experimental determination of the horse kick impact energy. Submitted to Biosystems Engineering
- BENTHIEN JT, GÄCKLER S, OHLMEYER M (2016) Durchtrittbeständigkeit von Ausfachungsbohlen für Pferdeboxen. In: Tagungsband Innovationstage 2016, 25.-26. Oktober 2016, Bonn, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).
- BENTHIEN JT, GÄCKLER S, OHLMEYER M (2020) Robinie im Pferdestall - Alternativen zu Tropenholz für den Stallbau gesucht. Vorgesehen zur Veröffentlichung im Holz-Zentralblatt
- BENTHIEN JT, HÖPPKEN M, MELCHER E, GÄCKLER S, OHLMEYER M (2018) Zur Dauerhaftigkeit von Stallbohlen für die Pferdehaltung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 35 p, Thünen Working Paper 104, DOI:10.3220/WP1537345061000

4 Zusammenfassung

Projektziel war es, einen Vorschlag für die Vorgehensweise zur Gestaltung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen zu erarbeiten, mit dem die Anforderungen des Tierschutzgesetzes an die Haltung von Pferden erfüllt werden können. Hierfür wurde zunächst die beim Auskeilen wirksam werdende Trittenergie bestimmt und mit in der Literatur angegebenen Trittsärken abgeglichen. Es zeigte sich, dass bisherige Messungen fehlerhaft waren und bislang von zu großen Belastungen ausgegangen wurde.

Geklärt werden sollte weiter, ob der alternative Einsatz von Holzwerkstoffen einen Vorteil gegenüber dem Einsatz von Massivholz für den Stallbau bietet und somit ein besseres und zuverlässigeres Endprodukt angeboten werden kann. Weiter war zu klären, ob sich schwere Stallbauhölzer tropischen Ursprungs bzw. Stallbohlen aus Bambus durch das Holz heimischer Holzarten ersetzen lassen. Mit dem Wissen um die bremsende bzw. puffernde Wirkung von energieabsorbierenden oder flexiblen, gummiartigen Materialien sollten Ansätze erarbeitet werden, die diese Eigenschaften im Stallbau für eine sichere Unterbringung von Pferden nutzen.

Die Bestimmung verschiedener statischer sowie dynamischer Biegeeigenschaften hat ein breites Verständnis deren Bedeutung für Dimensionierung von Stallbohlen geliefert. Die Bestimmung an Prüfkörper unterschiedlicher Abmessungen und Holzarten hat gezeigt, dass einige Eigenschaften stark von den Bauteilabmessungen abhängen. Weiter wurde deutlich, dass die tatsächlichen Biegeeigenschaften gehandelter Hölzer nicht den Werten entsprechen, die aufgrund von Literaturangaben zu erwarten wären. Ebenso konnte aber auch gezeigt werden, dass deutlich bessere Biegeeigenschaften vorliegen können. Insgesamt führt diese Beobachtung vor Augen, dass bei der Verwendung von Massivholz zur Herstellung von Bauteilen die Berücksichtigung von großzügigen Sicherheitsbeiwerte ratsam ist oder der Vorteil einer geringeren Streubreite von Holzwerkstoffen genutzt werden sollte. Gleichwohl konnte gezeigt werden, dass die Biegeeigenschaften heimischer Hölzer denen tropischen Ursprungs nicht nachstehen müssen und mit ihnen ebenfalls durchtrittbeständige und einklemmsichere Stallbohlen hergestellt werden können.

Im Zuge der beispielhaften Anwendung des vorgeschlagenen Ansatzes zur Gestaltung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen wurde gezeigt, dass gestellte Anforderungen erfüllt werden können. Im Zuge der Ergebnisdiskussion wurde deutlich, dass in der Praxis etablierten Ausführungsdetails (Verbindung der Trennwandbohlen über Nut und Feder, Schlitz in der Türfläche zur verbesserten Luftzirkulation) eine überlegte Definition der Rahmenbedingungen bzw. des Anforderungsprofils erfordern, bevor der vorgeschlagene Ansatz zur Gestaltung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen angewendet werden kann.

Die Betrachtung von Ansätzen zur Entwicklung energieabsorbierender oder flexibler Stallbohlen hat ergeben, dass Holz ein geeignetes Eigenschaftsprofils zur Herstellung von Stallbohlen hat und

funktionsoptimierte Alternativen anscheinend keinen derart großen Zusatznutzen bringen werden, die die mutmaßlich höheren Herstellkosten rechtfertigen würden.

Mit Hilfe von Versuchen am Groß-Pendelschlagwerk mit künstlichem Huf als Hammerpinne wurde die Funktionalität des vorgeschlagenen Ansatzes zur Dimensionierung durchtrittbeständiger und einklemmsicherer Stallbohlen demonstriert.

Mit der Umsetzung des erarbeiteten Wissens können Unternehmen der Pferdewirtschaft ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken, da auf das Interesse von Pferdehaltern nach einer bestmöglichen, verletzungssicheren Unterbringung ihrer Tiere eingegangen werden kann. Nicht zuletzt dienen die Projektergebnisse dem Wohlergehen des in Obhut des Menschen lebenden Pferdes.

Quellenverzeichnis

Literatur

- ANONYMOUS (1997) MAHAGONI FÜR ALLE. DER SPIEGEL 6/1997:162-164
- BENTHIEN JT, GEORG H, MAIKOWSKI S, OHLMEYER M (2012) Infill planks for horse stable constructions: thoughts about kick resistance determination and alternative material development. *Landbauforsch/ Appl Agric Forestry Res* 4(62):255-262
- BENTHIEN JT, HÖPPKEN M, MELCHER E, GÄCKLER S, OHLMEYER M (2018) Zur Dauerhaftigkeit von Stallbohlen für die Pferdehaltung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 35 p, Thünen Working Paper 104, DOI:10.3220/WP1537345061000
- BERTHOLD D (2014): Verbundvorhaben: Eschentriebsterben - Forst- und holzwirtschaftliche Strategien zum Umgang mit dem neuartigen Eschentriebsterben; Teilvorhaben 3: Innovative Holzverwendung (Scrimber-Wood) URL: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22011010.pdf> (letzter Zugriff 21.01.2019)
- BLAß HJ, STREIB J (2016) Ingenious hardwood : BauBuche Buchen-Furnierschichtholz : Bemessungshilfe für Entwurf und Berechnung nach Eurocode 5. 2. überarbeitete Auflage. Herausgeber: Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, Creuzburg. Immenstadt : Eberl Print, 76 p. ISBN: 978-3-920269-64-1
- BRÖKER FW, SAMAMON S (1989) Instrumentierung eines Pendelschlagwerkes für die Holzprüfung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 47:93-97
- DILL-LANGER G, AICHER S (2015) BauBuche in XXL-Format – Versuche und Europäische Zulassung. 3. Stuttgarter Holzbau-Symposium – Neueste Entwicklungen bei geklebten Holzbauteilen. Stuttgart, 08.-09. Oktober 2015
- FARDEL R (1934) Contribution à l'étude de toxicité du robinier faux acacia (*Robinia pseudoacacia*). Diss., Lyon *In*: UHLIG A, GROSCHE A, HOOPS M, SCHUSSER GF (2008) Robinien als Ursache für Vergiftungen beim Pferd. *In*: 4. Leipziger Tierärztekongress : 17.-19. Januar 2008. Stuttgart : Schattauer, 88 p.
- GÄCKLER S (2012) Kraftpaket Pferd: was Stallbauteile aushalten müssen. Tag der Nürtinger Agrar-und Pferdewirtschaft, 16. Juni 2012
- GÉRARD J, GUIBAL D, PARADIS S, VERNAY M, BEAUCHÊNE J, BRANCHERIAU L, CHÂLON I, DAIGREMONT C, DÉTIENNE P, FOUQUET D, LANGBOUR P, LOTTE S, THÉVENON MF, MÉJEAN C, THIBAUT A (2011) Tropix 7. CIRAD. URL: <https://doi.org/10.18167/74726f706978> (letzter Zugriff: 05. Juli 2018)
- GLASER K (2012): Ganz schön schnittig. *Cavallo* 04:128-133

- HELMS R, KÜHN HJ, LEDWORUSKI S (1982) Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin, Nr. 82:52S.
- HOFFMANN G (2009) Orientierungshilfen Reitanlagen- & Stallbau : Planung – Ställe – Hallen – Plätze – Auslauf – Koppel - Reitwege. FN-Verlag der Deutschen Reiterlichen Vereinigung, Warendorf. 200 p. ISBN 978-3-88542-740-7
- HÜBNER R (2005) Eigenschaftsuntersuchungen an einem neuartigen Werkstoff aus Bambus. Hamburg : Univ, 135 p
- KOLLMANN F (1951) Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 2. Auflage, Band I. Berlin, Göttingen, Heidelberg, München: Springer
- KRECH H (1960) Größe und zeitlicher Verlauf von Krafz und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch an Holz und ihr Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit. Holz als Roh- und Werkstoff 18:95-105
- MAIKOWSKI S (2011) Technologische Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von plattenförmigen WPC für die Pferdehaltung. Masterarbeit, Universität Hamburg
- MÜLLER-ROOS J, RICHTER G (1979) Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch. - Ein Beitrag zur Untersuchung des Bruchverhaltens von Stählen. GKSS-Jahresbericht. Geesthacht: 35-45
- SCHATTNER H (2012) Untersuchung zur Schlagkraft des Pferdes. Masterarbeit an der Georg-August-Universität Göttingen
- SELL J (1997) Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. Zürich : Dietikum : Baufachverlag, 87 p. ISBN 3-85565-223-6
- STEINMETZ AK, FUCHS C (2012) Pferdehaltung : Planen und kalkulieren/ KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt: KTBL, 200 p. ISBN 978-3-941583-66-5
- VON WACHENFELDT H, NILSSON C, VENTORP M (2011) Safe horse stables – kick loads from horses on fittings and building constructions. Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Department of Rural Buildings and Animal Husbandry (LBT), 33p. Landskap trädgård jordbruk : Rapport 2011:20 (ISBN 978-91-86373-71-9). Alnarp, Sweden
- VON WACHENFELD H, NILSSON C, VENTORP M (2013) Measurement of kick loads from horse on stable fittings and building elements. Biosystems Engineering 116:487-496
- WEIß B (2018) Angewandte Holzanatomie; Bedeutung der Akzessorien für Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung ausgewählter Hölzer. In: 4. Holzanatomisches Kolloquium (Tagungsband), 15.-16. November 2018, Dresden
- WOLTERS-FAHLENKAMP U (o.J.) Holzarten: Denya/Okan. URL: [http:// www.fahlenkamp.de/holzarten/denya-okan/](http://www.fahlenkamp.de/holzarten/denya-okan/), letzter Zugriff: 03.01.2017

Normen

DIN 52186:1978-06, Prüfung von Holz, Biegeversuch

DIN 52189-1:1981-12, Prüfung von Holz - Schlagbiegeversuch - Bestimmung der Bruchschlagarbeit

DIN EN 323:1993-08, Holzwerkstoffe, Bestimmung der Rohdichte

DIN EN 338:2016-07, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen

DIN EN 384:2016-12, Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte

DIN EN 408:2012-10, Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften

DIN EN 1990:2010-12, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung

DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau

Gesetze und Leitlinien

BMELV, BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2009) Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutzgesichtspunkten, überarbeitete Version vom 09. Juni 2009.
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Tier/Tierschutz/GutachtenLeitlinien/HaltungPferde.pdf?__blob=publicationFile (letzter Zugriff: 21. Juni 2018)

TIERSCHUTZGESETZ (TIERSCHG) in der Fassung vom 18. Mai 2006 der Bekanntmachung vom 31. Mai 2006 (Bundesgesetzblatt Teil I, Nummer 25, Seite 1206-1222), zuletzt geändert durch Gesetz vom 29. März 2017 (Bundesgesetzblatt Teil I, Nummer 16, Seite 626-653)

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Ursprüngliche Konstruktion der Schlagplatten-Messvorrichtung zur Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Belastung in einem Probierstand (verändert nach Gäckler 2012). 9
- Abbildung 2: Rückansicht (a) und Vorderansicht (b) des freistehenden Grundgerüsts des Probierstandes, mit dem die beim Auskeilen wirksam werdenden Schlagenergie gemessen werden kann (Foto: Benthien)..... 10
- Abbildung 3: Probierstand mit Möglichkeit zur Bestimmung der beim Auskeilen wirksam werdenden Energie (Foto: Benthien). 11
- Abbildung 4: Grafische Darstellung der aus v. Wachenfelt et al. (2013) herangezogenen Wertepaare (für die Bestimmung der funktionalen Abhängigkeit von Kraft und Aufschlagenergie benutzte Daten farbig hinterlegt), des berechneten Wertepaares zur Maximalkraft sowie der Regressionsgeraden über die „Benutzten Daten“, deren Funktionsgleichung und Bestimmtheitsmaß..... 18
- Abbildung 5: Grafische Darstellung der aus Schattner (2012) zusammengestellten Wertepaare (gemessene Kraft und Aufschlagenergie bei verschiedenen Abständen zwischen Pendelschlagwerk und Messvorrichtung), der Wertepaare aus gemessener Kraft und berechneter Trittenenergie sowie der Regressionsgeraden, deren Funktionsgleichung und Bestimmtheitsmaß..... 22
- Abbildung 6: Zur Prüfung deutlich größerer Auflagerabstände, als es für Standardprüfkörper notwendig wäre, umgebautes Pendelschlagwerk. 26
- Abbildung 7: a) Beim Projektpartner DLG vorhandenes Groß-Pendelschlagwerk mit künstlichem Huf; b) zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit mit C-Hammer und Auflagerböcken umgerüstetes Groß-Pendelschlagwerk. 27
- Abbildung 8: Oberflächenerscheinung der Werkstoffe (A) Buchen-Scrimber, (B) BauBuche und (C) Bambus..... 28
- Abbildung 9: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit typischer Biegekurve eines statischen Biegeversuches. 47
- Abbildung 10: Exemplarische Darstellung einer Biegekurve im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit durch die Punkte „Koordinatenursprung“ und „ F_{\max} “ sowie „Kraftminimum zwischen dem Kraftmaximum des Beschleunigungsstoßes und der eigentlichen Biegekurve“ und „80 % von F_{\max} “ verlaufenden Geraden, auf Basis deren die Steigung der dynamische Biege-Elastizitätsmodul berechnet wird. 50

- Abbildung 11: Exemplarische Darstellung einer Biegekurve im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit bis zum Bruch der Probe zwischen Biegekurve und x-Achse farbig hinterlegter Fläche, die der „Bruchschlagarbeit bis F_{\max} “ entspricht. 52
- Abbildung 12: Exemplarische Darstellung einer Biegekurve im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm mit zwischen Biegekurve und x-Achse farbig hinterlegter Fläche, die der „Bruchschlagarbeit bis Ende Messung“ entspricht..... 52
- Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Bruchschlagarbeit und a) Auflagerabstand bzw. b) Prüfkörperdicke von Prüfkörpern aus BauBuche mit a) einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und b) einer Länge von 1.581 mm (Auflagerabstand 1.265 mm)..... 54
- Abbildung 14: Veranschaulichung der Gegenüberstellung des Wertes der Biegespannungen unter Berücksichtigung des Bemessungswertes der Einwirkung und dem Bemessungswertes der Baustoffeigenschaft (Biegefestigkeit) sowie Teilschritte deren Berechnung. 70
- Abbildung 15: Veranschaulichung der Schritte zur Berechnung der Durchbiegung bei Veranschlagung des Bemessungswertes der Einwirkung und dem Biege-Elastizitätsmodul $_{xd}$ (Bemessungswert der Baustoffeigenschaft) sowie des Nennwertes der maximalen Durchbiegung..... 71
- Abbildung 16: Einem Huf nachempfundene Hammerfinne für das Groß-Pendelschlagwerk. 93
- Abbildung 17: Groß-Pendelschlagwerk mit künstlichem Huf bei der Röwer & Rüb GmbH. 93
- Abbildung 18: (a) Metall-C-Profil mit 32 mm-Aufnahme für Bambusbohlen; (b) Metall-C-Profil mit 40 mm-Aufnahme für Vollholzbohlen, eingekreist ist hier der aufgebogene Schenkel nach mehrfacher Schlagbelastung der Bohle. 97
- Abbildung 19: Beispielhafte Füllung des schwenkbaren Seitenelementes aus den Versuchen in Kapitel 1 mit verschiedenen Materialien (v. l. n. r.: 2 x Bambus, Buchen-Scrimber, BauBuche, 2 x Buche, 2 x Esche, Hainbuche, Birke, 2x Robinie, Eiche). 99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Im Rahmen der Messungen aufgenommene Energiewerte, sortiert nach Intensität, ausgewertet (Minimalwert, 5 %-Quantil, Median, 95 %-Quantil, Maximalwert und Mittelwert) für jeweils eine von drei unterschiedlich umfangreiche Datenauswahl.	15
Tabelle 2:	Für die Neuauswertung herangezogene Rohdaten aus v. Wachenfelt et al. (2013). .	16
Tabelle 3:	Für die Neuauswertung herangezogenen Rohdaten aus Schattner (2012).	20
Tabelle 4:	Ergebnisse der Rohdichtebestimmung sowie für die untersuchten Materialien in der Literatur gemachte Angaben.	34
Tabelle 5:	Statische Biegefestigkeit (Mittelwert und Variationskoeffizient), Ergebnis des Mittelwertvergleichs (homogene Gruppe), Intervallgrenzen innerhalb der 95 % aller Messwerte zu erwarten sind sowie 5 %-Quantil ausgewählter Materialien mit Prüfkörperabmessungen von 360 x 20 x 20 mm ³	35
Tabelle 6:	Statischer Biege-Elastizitätsmodul (Mittelwert und Variationskoeffizient), Ergebnis des Mittelwertvergleichs (homogene Gruppe), Intervallgrenzen innerhalb der 95 % aller Messwerte zu erwarten sind sowie 5 %-Quantil ausgewählter Materialien mit Prüfkörperabmessungen von 360 x 20 x 20 mm ³	36
Tabelle 7:	Für ausgewählte Hölzer und Holzwerkstoffe in der Literatur angegebene Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul.	37
Tabelle 8:	Für ausgewählte Hölzer von Sell (1997) angegebene Bereiche für Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul.	37
Tabelle 9:	Statische Biegeeigenschaften von Prüfkörpern aus BauBuche mit einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und Längen von 600 mm, 1.100 mm, 1.581 mm und 1.850 mm für Auflagerabstände von 480 mm, 880 mm, 1.265 mm und 1.480 mm sowie Ergebnisse der statistischen Datenanalyse (Mittelwertvergleich).	39
Tabelle 10:	Statische Biegeeigenschaften von Prüfkörpern aus Scrimber mit einer Kantenlänge des Querschnitts von 40 mm und Längen von 600 mm und 1.581 mm für Auflagerabstände von 480 mm und 1.265 mm sowie Ergebnisse der statistischen Datenanalyse (Mittelwertvergleich).	39
Tabelle 11:	5 %-Quantile der dynamischen Biegefestigkeit (Schlagbiegefestigkeit) und des dynamische Biege-Elastizitätsmoduls (Schlagbiege-Elastizitätsmodul) von Prüfkörpern ausgewählter Materialien und Abmessungen von 180 x 10 x 10 mm ³	41

Tabelle 12:	Ergebnisse der Prüfung auf Mittelwertunterschiede (homogene Gruppen) zwischen den untersuchten Materialien innerhalb gleicher Prüfkörperabmessungen. 42
Tabelle 13:	Bruchschlagarbeit _{gesamt} (Mittelwert, Standardabweichung und 5 %-Quantil) für Prüfkörper ausgewählter Materialien, verschiedener Abmessungen und Chargen sowie statistischer Mittelwertvergleich für jeweils ein Material über die Prüfkörperabmessungen. 45
Tabelle 14:	Für Prüfkörper mit den Abmessungen 300 x 20 x 20 mm ³ bestimmte Bruchschlagarbeit _{gesamt} (Mittelwert, 2,5 %-Quantil, 97,5 %-Quantil) sowie von Sell (1997) aufgeführte Bruchschlagarbeit. 46
Tabelle 15:	Ergebnisse der Berechnung des Schlagbiege-Elastizitätsmoduls von Prüfkörpern mit den Abmessungen 180 x 10 x 10 mm ³ auf Basis vier verschiedener Datenabschnitte zur Bestimmung der Steigung der Biegekurve sowie deren Vergleiches auf Gleichheit. 49
Tabelle 16:	Vergleichende Angabe der „Bruchschlagarbeit bis F _{max} “ und der „Bruchschlagarbeit bis Ende Messung“ sowie das Ergebnis deren statistischen Mittelwertanalyse auf Gleichheit für Prüfkörper mit den Abmessungen 180 x 10 x 10 mm ³ ; Angabe des Anteils der absorbierten Energie nach dem Bruchereignis..... 51
Tabelle 17:	Einfluss des Auflagerabstandes auf die Bruchschlagarbeit bei einer Prüfkörperdicke und Breite von 40 mm (BauBuche). 53
Tabelle 18:	Einfluss des Prüfkörperdicke auf die Bruchschlagarbeit bei einem Auflagerabstand von 1.265 mm (Prüfkörperlänge 1581 mm) und Breite von 40 mm (BauBuche). 54
Tabelle 19:	Vergleich (statistische Analyse) von statischer und dynamischer Biegefestigkeit sowie statischem und dynamischem Biege-Elastizitätsmodul innerhalb eines Materials für Prüfkörper unterschiedlicher Größe. 56
Tabelle 20:	Vergleich (statistische Analyse) von (statischer) Biege- und (dynamischer) Bruchschlagarbeit, jeweils bis F _{max} , innerhalb eines Materials für Prüfkörper unterschiedlicher Größe. 57
Tabelle 21:	Gegenüberstellung von Ergebnissen der eigenen Bestimmung von Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul mit entsprechenden Angaben der charakteristischen Werte aus DIN EN 338:2016-07. 59
Tabelle 22:	Rechenwerte für die charakteristischen Festigkeits- und Steifigkeitswerte ausgewählter Festigkeitsklassen nach DIN EN 338:2016-07. 63
Tabelle 23:	Nutzungsklassen 64
Tabelle 24:	Klassen der Lasteinwirkungsdauer 64

- Tabelle 25: Zusammenstellung der Ergebnisse der Prüfung auf Durchtrittbeständigkeit und Einklemmsicherheit von Stallbohlen (1.265 x 120 x 40 bzw. 1.265 x 160 x 32 mm³ im Fall von Bambus) aus verschiedenen Materialien. 89
- Tabelle 26: Biegeeigenschaften von Esche, Hainbuche, Birke und Robinie aus Sell (1997). 100

Thünen Report

Bereits in dieser Reihe erschienene Hefte – *Volumes already published in this series*

1 - 55	siehe http://www.thuenen.de/de/infothek/publikationen/thuenen-report/
56	Frank Offermann, Martin Banse, Florian Freund, Marlen Haß, Peter Kreins, Verena Laquai, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Claus Rösemann, Petra Salamon Thünen-Baseline 2017 – 2027: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland
57	Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2016 Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2016
58	Anja-Kristina Techen Reduzierung von landwirtschaftlichen Stickstoffeinträgen in Gewässer: die Wirksamkeit von Beratung am Beispiel der hessischen WRRL-Beratung
59	Katja Oehmichen, Susann Klatt, Kristin Gerber, Heino Polley, Steffi Röhling, Karsten Dunger Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung Szenarientwicklung, Ergebnisse und Analyse
60	Anne Margarian Strukturwandel in der Wissensökonomie: Eine Analyse von Branchen-, Lage- und Regionseffekten in Deutschland
61	Meike Hellmich Nachhaltiges Landmanagement vor dem Hintergrund des Klimawandels als Aufgabe der räumlichen Planung - Eine Evaluation im planerischen Mehrebenensystem an den Beispielen der Altmark und des Landkreises Lüchow-Dannenberg -
62	Bernd Degen, Konstantin V. Krutovsky, Mirko Liesebach (eds.) German Russian Conference on Forest Genetics - Proceedings - Ahrensburg, 2017 November 21-23
63	Jutta Buschbom Exploring and validating statistical reliability in forensic conservation genetics
64	Anna Jacobs, Heinz Flessa, Axel Don, Arne Heidkamp, Roland Prietz, René Dechow, Andreas Gensior, Christopher Poeplau, Catharina Riggers, Florian Schneider, Bärbel Tiemeyer, Cora Vos, Mareille Wittnebel, Theresia Müller, Annelie Säurich, Andrea Fahrion-Nitschke, Sören Gebbert, Rayk Hopfstock, Angélica Jaconi, Hans Kolata, Maximilian Lorbeer, Johanna Schröder, Andreas Laggner, Christian Weiser, Annette Freibauer Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung
65	Jörn Sanders, Jürgen Heß (Hrsg.) Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft
66	Patrick Küpper, Jan Cornelius Peters Entwicklung regionaler Disparitäten hinsichtlich Wirtschaftskraft, sozialer Lage sowie Daseinsvorsorge und Infrastruktur in Deutschland und seinen ländlichen Räumen

- 67 Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Ulrich Dämmgen, Ulrike Döring, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Annette Freibauer, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Bernhard Osterburg, Roland Fuß
Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2017
Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2017
- 68 Alexandra Purkus, Jan Lüdtke, Georg Becher, Matthias Dieter, Dominik Jochem, Ralph Lehnen, Mirko Liesebach, Heino Polley, Sebastian Rüter, Jörg Schweinle, Holger Weimar, Johannes Welling
Evaluation der Charta für Holz 2.0: Methodische Grundlagen und Evaluationskonzept
- 69 Andreas Tietz
Bodengebundene Einkommensteuern in einer strukturschwachen ländlichen Gemeinde
- 71 Thomas Schmidt, Felicitas Schneider, Dominik Leverenz, Gerold Hafner
Lebensmittelabfälle in Deutschland – Baseline 2015 –
- 72 Friederike Mennicke, Martin Ohlmeyer, Vera Steckel, Jörg Hasener, Julia Borowka, Joachim Hasch
Entwicklung einer Prüfmethode für die schnelle Bestimmung von VOC aus Holzprodukten zur frühzeitigen Ableitung des langfristigen Emissionsverhaltens und Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Holzwerkstoffen
- 73 Thomas Schmidt, Sandra Baumgardt, Antonia Blumenthal, Bernhard Burdick, Erika Claupein, Walter Dirksmeyer, Gerold Hafner, Kathrin Klockgether, Franziska Koch, Dominik Leverenz, Marianne Lörchner, Sabine Ludwig-Ohm, Linda Niepagenkemper, Karoline Owusu-Sekyere, Frank Waskow
Wege zur Reduzierung von Lebensmittelabfällen - Pathways to reduce food waste (REFOWAS)
Maßnahmen, Bewertungsrahmen und Analysewerkzeuge sowie zukunftsfähige Ansätze für einen nachhaltigen Umgang mit Lebensmitteln unter Einbindung sozio-ökologischer Innovationen - Volume 1
- 73 Thomas Schmidt, Sandra Baumgardt, Antonia Blumenthal, Bernhard Burdick, Erika Claupein, Walter Dirksmeyer, Gerold Hafner, Kathrin Klockgether, Franziska Koch, Dominik Leverenz, Marianne Lörchner, Sabine Ludwig-Ohm, Linda Niepagenkemper, Karoline Owusu-Sekyere, Frank Waskow
Wege zur Reduzierung von Lebensmittelabfällen - Pathways to reduce food waste (REFOWAS)
Maßnahmen, Bewertungsrahmen und Analysewerkzeuge sowie zukunftsfähige Ansätze für einen nachhaltigen Umgang mit Lebensmitteln unter Einbindung sozio-ökologischer Innovationen - Volume 2 (Anhang)
- 74 Jan T. Benthien, Susanne Gäckler, Martin Ohlmeyer
Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Durchtrittbeständigkeit von Pferdebox-Ausfachungsbohlen sowie Entwicklung von Alternativen zu derzeit verwendeten Ausfachungsmaterialien für den Bau von Pferdeboxen



THÜNEN

Thünen Report 74

Herausgeber/Redaktionsanschrift

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesallee 50

38116 Braunschweig

Germany

www.thuenen.de

ISBN 978-3-86576-204-7



9 783865 762047