

# Schlagzähigkeit von Stallbohlen für Pferdeboxen - Einflussgrößen auf die Bruchschlagarbeit

Jan T. Benthien, Nick Engehausen, Susanne Gäckler, Martin Ohlmeyer

Thünen Working Paper 121

Jan T. Benthien, Nick Engehausen und Martin Ohlmeyer  
Thünen-Institut für Holzforschung  
Leuschnerstraße 91  
21031 Hamburg  
Telefon: +49 (0)40 73962 {-652, -, -635}  
Fax: +49 (0)40 73962 -699  
Email: {jan.benthien, -, martin.ohlmeyer}@thuenen.de

Susanne Gäckler  
DLG TestService GmbH  
Max-Exth-Weg 1  
64823 Groß-Umstadt  
Telefon: +49 (0)69 24788 -638  
Fax: +49 (0)69 24788 -690  
Email: s.gaeckler@dlg.org

**Thünen Working Paper 121**

Braunschweig/Germany, März 2019

## Vorwort

Die im vorliegenden Dokument vorgestellten Versuchsergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens mit dem Titel

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

erhoben, 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-Institut 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.



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

## Danksagung

An dieser Stelle ein herzliches Dankeschön

- den Unternehmen Holzwerk Keck - B. Keck GmbH (Ehningen/Böblingen), KS Schlüter Im- & Export GmbH, Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, Röwer & Rüb GmbH für die kostenlose Bereitstellung von Materialmustern,
- den Kollegen der DLG TestService GmbH, namentlich Herrn Jürgen Katzameyer, Herrn Bernd Appel und Herrn Steffen Schudt für die freundliche Zusammenarbeit sowie
- Frau Bettina Steffen für die statistische Datenauswertung, Herrn Hannes Wagner für die tatkräftige Unterstützung der praktischen Arbeiten und Frau Stefanie Warsow für den Zuschnitt der Prüfkörper.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Zur Bruchschlagarbeit</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>5</b>
3.1 Material .....	5
3.1.1 Buchenvollholz .....	5
3.1.2 Buchen-LVL .....	5
3.1.3 Buchen-Scrimber .....	5
3.1.4 Übrige Hölzer .....	6
3.2 Methoden .....	6
3.2.1 Prüfkörpervorbereitung .....	6
3.2.2 Bestimmung der Holzfeuchte .....	7
3.2.3 Bestimmung der Rohdichte .....	7
3.2.4 Bestimmung der Bruchschlagarbeit .....	8
3.2.5 Statistische Datenauswertung .....	11
<b>4 Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>12</b>
4.1 Holzfeuchte der Prüfkörper .....	12
4.2 Bruchschlagarbeit von Vollholz .....	12
4.2.1 Bruchschlagarbeit von Buchenvollholz .....	13
4.2.2 Unterschiede der Bruchschlagarbeit über die Herkunftskollektive .....	13
4.2.3 Unterschiede der Bruchschlagarbeit innerhalb der Herkunftskollektive .....	14
4.3 Vergleich der Bruchschlagarbeit von Buchenvollholz und Buchen-LVL .....	15
4.4 Einfluss der Richtung des Lasteintrages in Relation zur anatomischen Holzrichtung bzw. zum Furnierstreifenverlauf .....	16
4.5 Einfluss von Auflagerabstand, Prüfkörperabmessungen und Stützweitenverhältnis auf die Bruchschlagarbeit .....	17
4.5.1 Einfluss des Auflagerabstandes .....	17
4.5.2 Einfluss der Prüfkörperbreite .....	19

4.5.3	Einfluss der Prüfkörperhöhe .....	20
4.5.4	Prüfreiheiten zum Einfluss des Stützweitenverhältnisses.....	21
4.6	Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer sowie von Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber – Ein Vergleich mit Literaturangaben .....	23
4.7	Untersuchung zur Robustheit der Groß-Pendelschlagwerk-Prüfmethode .....	26
4.8	Unterschiede in der Bruchschlagarbeit über verschiedene Chargen eines Materials bei Versuchen auf dem Groß-Pendelschlagwerk .....	27
4.9	Maßstabsvergrößerung von Standardprüfkörpern für Versuche auf dem Groß-Pendelschlagwerk .....	28
4.10	Untersuchung von Prüfkörpern auf dem Groß-Pendelschlagwerk, deren Abmessungen mit denen von Stallbohlen vergleichbar sind .....	31
<b>5</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>33</b>
	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>34</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>36</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>37</b>

## Zusammenfassung

Stallbohlen zum Bau von Pferdeboxen müssen aus Tierschutzgesichtspunkten einer möglichen Belastung durch Auskeilen standhalten, d.h. im Fall einer Schlagbelastung darf es nicht zum Materialversagen kommen. Die Kenngröße, mit der die Schlagzähigkeit von Holz quantifiziert wird, ist die im Schlagbiegeversuch bestimmte Bruchschlagarbeit. Mit Blick auf die Gestaltung durchtrittbeständiger Stallbohlen war die Erlangung eines tiefgehenden Verständnisses der Bruchschlagarbeit Ziel der vorliegenden Arbeit. Im Rahmen praktischer Laborversuche wurden hierfür an Pendelschlagwerken unterschiedlicher Größe potenzielle Einflussgrößen untersucht. Neben dem Einfluss der Herkunft einer Holzart, dem Einfluss des Materials (Vollholz, Furnierschichtholz, Scrimber, Bambus), der Prüfrichtung in Bezug auf die anatomische Holzrichtung sowie der Prüfkörperabmessungen, wurden maßstabsvergrößerte Standardprüfkörper sowie Prüfkörper untersucht, deren Abmessungen denen von Stallbohlen vergleichbar sind. Für die Prüfkörperbreite wurde ein geringer und für die Prüfkörperhöhe kein Einfluss auf die Bruchschlagarbeit gefunden, was die ingenieurmäßige Verwendbarkeit der materialspezifischen Kenngröße Bruchschlagarbeit nahelegt. Gleiches gilt für das Stützweitenverhältnis, wenn dieses über die Variation der Prüfkörperhöhe variiert wurde. Wird das Stützweitenverhältnis hingegen über eine Vergrößerung des Auflagerabstandes erhöht, so ist ein Anstieg der Bruchschlagarbeit festzustellen. Dieses Ergebnis legt nahe, dass die Bruchschlagarbeit nur begrenzt für die Bauteildimensionierung verwendet werden kann und an Prüfkörpern bestimmt werden muss, deren Länge der praktisch anzuwendenden beabsichtigten Länge entspricht. Bei dem Vergleich unterschiedlicher Materialien wurden signifikante Unterschiede in der Bruchschlagarbeit festgestellt. Besonders schlagzähe Hölzer sollten für den Bau von Stallbohlen im besonderen Maße geeignet sein. Versuche an maßstabsvergrößerten Standardprüfkörper zeigten, dass ein Vergleich der Bruchschlagarbeit verschiedener Hölzer nur vorgenommen werden kann, wenn Prüfkörper gleicher Abmessungen untersucht wurden. Dies bestätigten die Versuche an Prüfkörpern, deren Abmessungen denen von Stallbohlen vergleichbar sind. Hieraus wurde geschlussfolgert, dass die Bestimmung der Bruchschlagarbeit im Labormaßstab eine Vorstellung vom Leistungsvermögen realer Bauteile liefern kann, Sicherheit jedoch erst über die Prüfung von Bauteilen im Originalmaßstab zu erreichen ist.

## 1 Einleitung

Holz und Holzwerkstoffe, die zu Stallbohlen verarbeitet werden, sind - neben chemischer (Urin und Kot, z. B. Ammoniak), biologischer (holzerstörende Mikroorganismen, z. B. Schimmel) und physikalischer (z. B. Feuchte, d. h. Quellen und Schwinden) Beanspruchung - vor allem mechanisch beansprucht. Als kritisch für die Unversehrtheit oder gar das Leben der in Boxen gehaltenen Pferde zu bewertende mechanische Beanspruchung, ist die beim Auskeilen ggf. auf die Stallbohlen einwirkende Schlagbelastung zu nennen. Mit Blick auf die Anforderungen des Tierschutzgesetzes (TierSchG) bzw. die Anforderungen des TierSchG erklärenden „Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltung unter Tierschutzgesichtspunkten“ (BMELV 2009) müssen Ausfachungsbohlen so dimensioniert werden, dass ein Versagen (Bruch) und ein ggf. damit verbundenes Einklemmen der Hufe beim Auskeilen weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Gleichsam ist auszuschließen, dass im Fall einer durch Schlageinwirkung hervorgerufenen elastischen Biegeverformung die Möglichkeit zur Hufeinklemmung entsteht.

Das Verformungs- bzw. Bruchverhalten eines Gegenstandes der schlagartig beansprucht wird (mechanische Belastung innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne), lässt sich aus dessen Materialeigenschaften sowie der Geschwindigkeit und Masse des Anprallobjektes herleiten. Im Fall eines „weichen Stoßes“ absorbiert der belastete Gegenstand die Schlagenergie durch Deformation, d.h. die mit einem Tritt beaufschlagte Ausfachungsbohle biegt durch. Ein Pferdetritt kann jedoch nicht als anprallende Masse mit einer definierten Aufschlagsgeschwindigkeit beschrieben werden, sondern ist vielmehr als dosierte Kraft zu verstehen, mit der das Pferd die Stallbohle aktiv verformt. Im physikalischen Sinne wird bei der Schlagbelastung einer Stallbohle Arbeit verrichtet, d.h. Kraft wirkt über den Weg der Deformation. Keilt ein Pferd gegen eine Stallbohle, so muss diese die aufgebrachte Energie über elastische Verformung absorbieren.

Die Widerstandsfähigkeit einer Holzart gegen schlagartige Belastung (Schlagzähigkeit) wird nach DIN 52189-1:1981-12 mit einem Pendelschlagwerk bestimmt und über die Kenngröße der Bruchschlagarbeit quantifiziert. Normiert auf den Prüfkörperquerschnitt gibt die Bruchschlagarbeit an, wie viel Energie beim Durchschlagen der Probe absorbiert wird.

Mit dem Ziel ein tiefgehendes Verständnis der Bruchschlagarbeit als Materialkennwert für schlagartig beanspruchte Stallbohlen aus Holz zu erlangen, wurden im Rahmen des eingangs erwähnten Forschungsvorhabens verschiedene potenzielle Einflussgrößen auf die Bruchschlagarbeit untersucht. Die hierbei erzielten Ergebnisse werden im vorliegenden Bericht dargestellt und diskutiert. Untersucht wurden neben dem Einfluss der Herkunft einer Holzart, dem Einfluss der Holzart und der Prüfrichtung in Bezug auf die anatomische Holzrichtung sowohl der Einfluss der Prüfkörperabmessungen als auch der Pendelschlagwerkgröße. Der Einfluss der Prüfkörperabmessungen wurde hierbei vornehmlich an Furnierschichtholz (kurz LVL für engl. laminated veneer lumber) aus Buche untersucht. Eine Untersuchung von maßstabsvergrößerten Laborprüfkörpern



sowie Prüfkörpern mit Abmessungen, die denen von Stallbohlen vergleichbar sind, sollten Aufschluss darüber geben, ob anhand von Laborprüfkörpern auf die Eigenschaften von großformatige Holzbauteile geschlossen werden kann.

## 2 Zur Bruchschlagarbeit

Die Bruchschlagarbeit von Holz wird in Anlehnung an die DIN 52189-1:1981-12 durch zerstörende Prüfung von kleinen, stabförmigen, fehlerfreien Prüfkörpern bestimmt. Die Bruchschlagarbeit  $w$  ist definiert als die auf den Anfangsquerschnitt  $A$  einer Probe bezogene Arbeit  $W$ , die zum Durchschlagen des Probestabes erforderlich ist. Als weitere Synonyme werden in der technischen Literatur auch „Schlagbiegefestigkeit“ oder „Bruchschlagfestigkeit“ verwendet, die jedoch nicht deutlich machen, dass der Prüfkörper Bestimmung dieser Kenngröße bis mindestens zum Bruch belastet wird. Den Bezug der Arbeit auf den spezifischen Probenquerschnitt versuchte Ghelmeziu (1938) durch die Verwendung des Begriffes der „spezifische Bruchschlagarbeit“ zu verdeutlichen. Im englischen Sprachgebrauch finden Begriffe wie „toughness“ (deut. Zähigkeit) oder „impact-bending“ (deut. Schlagbiegung) Anwendung.

Im Kontext der Bruchschlagarbeit werden in der Literatur als Beispiele für schlagbeanspruchte (Holz-) Bauwerke, Bauteile sowie Gegenstände, für deren Funktion die Widerstandsfähigkeit gegen schlagartige Belastungen von Bedeutung ist, genannt:

- Funktürme (Kollmann 1936)
- Brücken und Teile anderer Holzbauwerke (Kollmann 1937)
- Holzteile von Fahr- und Flugzeugen, Sportgeräte, Bootsplanken, Leitersprossen, Werkzeugstiele (Ghelmeziu 1938)
- Verpackungs- und Transportkisten (Schwab und Gyamfi 1985)
- Leitplanken bei Fahrzeuganprall (Bocchio et al. 2001 und van de Kuilen 2012)
- abgestorbene Bäume gegen Naturgefahren wie Steinschlag und Lawinen (Ammann 2006)
- Waldbäume bei Steinschlag (Kalberer 2006)
- Gebäude bei Erdbeben oder Explosionen, Gerüstbretter und -balken sowie Dachdecker-schutz- oder -fangwände bei herunterfallenden Gegenständen oder abstürzenden Personen, Schwingböden in Turnhallen, Sprungbrettern (in Schwimmbädern), Treppenstufen oder Holzkerne in Skiern sowie tragenden Holzfußböden, wie beispielsweise Geschossdeckenbalken und Bodendielen (inkl. Terrassen- und Balkonbelägen) (Widmann 2009) und
- Ausfachungsbohlen von Boxen beim Auskeilen von Pferden (Benthien et al. 2012, Benthien 2016 und Benthien et al. 2016).

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Material

#### 3.1.1 Buchenvollholz

Mit dem Ziel einer breiten Streuung der Herkunft des Buchenvollholzes, wurde von drei über Deutschland verteilt ansässigen Sägern Holz aus jeweils drei verschiedenen Bäumen bezogen. Entsprechend des Sägers

1. Johann Hartkop e.K. (Schönberg in Schleswig-Holstein),
2. Holzwerk Keck - B. Keck GmbH (Ehningen/Böblingen in Baden-Württemberg) und
3. Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG (Creuzburg in Thüringen),

(Herkunftskollektiv 1, 2 oder 3), wird das Holz der Bäume im Folgenden als Buche 1.1, Buche 1.2 und Buche 1.3 (Hartkop), Buche 2.1, Buche 2.2 und Buche 2.3 (Keck) und Buche 3.1, Buche 3.2 und Buche 3.3 (Pollmeier) bezeichnet.

Ergänzend zum Buchenholz dieser Herkunftskollektive wurde von KS Schlüter GmbH & Co. KG Buchenholz bereitgestellt, das im weiteren Verlauf als Buche 4 bezeichnet wird.

#### 3.1.2 Buchen-LVL

Buchen-LVL wurde in Form des Produktes „BauBuche Paneel“ in den Dicken 20, 30 und 45 mm von Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG zur Verfügung gestellt. Die Lieferung des Materials in 45 mm Dicke erfolgte in mehreren Chargen, sodass bei Prüfkörpern mit einer Dicke von 40 mm der Vollständigkeit halber im Folgenden zwischen Buchen-LVL 1 und Buchen-LVL 2 unterschieden wird.

#### 3.1.3 Buchen-Scrimber

Scrimber-Bohlen aus Buchenholz wurden im Unterauftrag am Fraunhofer-Institut für Holzforschung hergestellt. Das Buchenholz wurde zwischen Walzen zerquetscht bzw. aufgefasert und nachfolgend mit einer Sprühpistole mit Phenol-Formaldehyd-Klebstoff (PF Prefere 4976, Prefere

Resins Holding GmbH, Erkner) beaufschlagt (Ziel-Klebstoffanteil: 12 %). Anschließend wurde das Material in einer Pressform (1500 mm x 450 mm) bei 130° C zu Bohlen von gut 40 mm Dicke und einer Rohdichte von 1000 kg/m<sup>3</sup> verpresst. Die so erhaltenen Bohlen wurden mit Hilfe von einem Bandschleifautomaten (80er Körnung) auf eine Dicke von 40 mm kalibriert.

### 3.1.4 Übrige Hölzer

Gängige Stallbauhölzer wurden von KS Schlüter GmbH & Co. KG in Form von Rohlingen bereitgestellt, wie sie für die Herstellung von Stallbohlen verwendet werden. Es wurden Rohlinge aus Lärche (*Larix spp.*), Eiche (*Quercus spp.*), Bilinga (*Nauclea diderrichii*), Movingui (*Distemonanthus benthamianus*), Bongossi (*Lophira alata*) und Denya (*Cylicodiscus gabunensis*) geliefert. Teilweise wurden mehrere Chargen einer Holzart untersucht, die im Folgenden mit an den Artnamen angehängten Ziffern unterschieden werden, z.B. Eiche 1 und Eiche 2.

Stallbohlen aus Bambus wurden von Röwer & Rüb GmbH bereitgestellt.

Tannenholz wurde in Form von unbesäumter Stammware des Mischsortiments Tanne/Fichte über den regionalen Holzhandel bezogen.

## 3.2 Methoden

### 3.2.1 Prüfkörpervorbereitung

Die zu untersuchenden Prüfkörper wurden zunächst mit Übermaß zugeschnitten und bei Normklima (20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit) bis zur Gewichtskonstanz konditioniert. Nach erfolgreicher Klimatisierung wurde auf Endmaß gehobelt.

Die Probestäbe für die Schlagbiegeprüfung im Labormaßstab zur Untersuchung der grundsätzlichen Einflussgrößen auf die Bruchschlagarbeit wurden so gefertigt, dass die Stabachse der Prüfkörper möglichst parallel zur longitudinalen anatomischen Holzrichtung liegt; die Querschnittsachsen parallel zur tangentialen bzw. radialen Holzrichtung. Es wurde darauf geachtet, möglichst von Holzfehlern freie Prüfkörper zu erhalten. Vor der Prüfung wurden die Prüfkörperabmessungen mit einem Messschieber auf 0,1 mm genau bestimmt.

Im Fall der Prüfkörper aus Stallbohlenrohlingen und insbesondere für die Schlagbiegeprüfung auf dem Groß-Pendelschlagwerk wurde beim Zuschnitt weniger stark auf die Holz Auswahl geachtet, sondern vielmehr so zugeschnitten, wie das Holz geliefert wurde. Für Prüfkörper, die auf dem

Groß-Pendelschlagwerk geprüft wurden, wurden als tatsächliche Prüfkörperabmessungen die Zielabmessungen angenommen.

### 3.2.2 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Holzfeuchte der Prüfkörper wurde mittels Darrmethode in Anlehnung an DIN EN 13183-1:2002-07 bestimmt. Hierfür wurden stichprobenartig Holzwürfel aus überzähligen bzw. bereits geprüften Prüfkörpern geschnitten und deren Masse vor und nach der Trocknung sowie ergänzend vor und nach der Klimatisierung bestimmt. Die Berechnung der Holzfeuchte erfolgte nach Gleichung 1.

$$u = ((m_1 - m_2) / m_2) \times 100 \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei

$u$  = Holzfeuchte (%)

$m_1$  = Masse des Prüfkörpers vor der Trocknung (g)

$m_2$  = Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand (g)

### 3.2.3 Bestimmung der Rohdichte

Die Rohdichte der Prüfkörper wurde in Anlehnung an DIN 52182:1976-09 bestimmt. Hierfür wurden nach der Klimatisierung unmittelbar vor der Prüfung der Bruchschlagarbeit die Abmessungen und die Masse der Prüfkörper aufgenommen. Die Berechnung der Rohdichte erfolgte nach Gleichung 2.

$$\rho = m / (l \times b \times h) \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei

$\rho$  = Rohdichte (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  = Masse (kg)

$l$  = Länge (m)

$b$  = Breite (m)

$h$  = Höhe (m)

### 3.2.4 Bestimmung der Bruchschlagarbeit

Zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit wurden prismatische Probestäbe mit zur tangentialen bzw. radialen anatomischen Holzrichtung möglichst parallel verlaufenden Querschnittsachsen auf zwei verschiedenen Pendelschlagwerken (Labor-Pendelschlagwerk und Groß-Pendelschlagwerk) geprüft.

Im praktischen Prüfablauf wurden die Pendel hierfür ausgelenkt und arretiert. Die berechnete potentielle Energie am Punkt der gewählten Pendelauslenkung stellt die Maximalenergie des Pendels dar. Nach Lösung der Arretierung wird die potentielle Energie (Reibungsverluste vernachlässigt) in kinetische Energie umgewandelt und erreicht am niedrigsten Punkt der Pendelhammerflugbahn ihr Maximum (vollständige Umsetzung der potenziellen in kinetische Energie). Genau an diesem Punkt wird der Probestab unter Absorption von Schlagenergie von der Hammerfinne durchschlagen, wobei der Lasteintrag in tangentialer (bzw. radialer) holzanatomischer Richtung erfolgt. Die nicht absorbierte kinetische Energie wird nach dem Durchschwingen des tiefsten Punktes der Pendelhammerflugbahn wieder in potentielle Energie umgewandelt. Über die Differenz der potentiellen Energie bei Pendelauslenkung vor dem Durchschlagen der Probe und potentieller Energie am höchsten Auslenkungspunkt nach dem Durchschlagen der Probe kann die absorbierte Schlagenergie berechnet werden. Diese wird dann auf den Prüfkörperquerschnitt bezogen und so die Bruchschlagarbeit erhalten. Entsprechend handelt es sich bei der ermittelten Bruchschlagarbeit um die auf den Probenquerschnitt normierte Gesamtenergie (inkl. Mitschleppen der Probe nach dem eigentlichen Bruchereignis), die im Zuge der Prüfung absorbiert wurde.

#### 3.2.4.1 Schlagbiegeprüfung auf dem Labor-Pendelschlagwerk

Die Bestimmung der Bruchschlagarbeit im Labormaßstab wurde in Anlehnung an den Schlagbiegeversuch nach DIN 52189-1:1981-12 mit Hilfe eines Labor-Pendelschlagwerkes einer Maximalenergie von 150 J (Masse = 12,3 kg, Fallhöhe = 1,24 m) durchgeführt.

Die Maße der Standardprüfkörper im Labormaßstab belaufen sich auf 20 mm Kantenlänge bei quadratischem Querschnitt und 300 mm Länge in Faserrichtung. Der Auflagerabstand beträgt 240 mm, woraus sich für Standardprüfkörper ein Stützweitenverhältnis (Auflagerabstand dividiert durch Prüfkörperhöhe) von 12 ergibt. Im Folgenden werden die Prüfkörper mit Standardabmessungen im Labormaßstab als Standard-Laborprüfkörper bezeichnet.

Zur Untersuchung des Einflusses der Prüfkörperabmessungen auf die Bruchschlagarbeit wurden auch Prüfkörper mit hiervon abweichenden Abmessungen untersucht.

Im Fall des verwendeten Labor-Pendelschlagwerks ist die aufgenommene Schlagenergie in m kg auf einer Skala abzulesen. Die Umrechnung von m kg in kJ erfolgt über die Multiplikation mit dem Faktor 10. Alternativ kann die absorbierte Schlagenergie nach dem Energieerhaltungssatz nach Gleichung 3 wie folgt berechnet werden:

$$E_{abs} = E_{pot\ max} - E_{pot\ 2} = m g (h_1 - h_2) \quad (\text{Gl. 3})$$

wobei

$E_{abs}$  = vom Prüfkörper absorbierte Schlagenergie (kJ)

$E_{pot\ max}$  = Maximalenergie des Pendels (kJ)

$E_{pot\ 2}$  = Energie am höchsten Auslenkungspunkt nach dem Durchschlagen der Probe (kJ)

$m$  = Pendelmasse (kg)

$g$  = Gewichtskraft ( $\text{m/s}^2$ )

$h_1$  = Maximale Höhe bzw. Auslenkung des Pendels vor dem Durchschlagen des Prüfkörpers (m)

$h_2$  = Maximale Höhe bzw. Auslenkung des Pendels nach dem Durchschlagen des Prüfkörpers (m)

Zur Ermittlung der Bruchschlagarbeit  $w$  (Gleichung 4) wird die vom Prüfkörper absorbierte Schlagenergie auf den spezifischen Probenquerschnitt bezogen:

$$w = E_{abs} / A \quad (\text{Gl. 4})$$

wobei

$w$  = Bruchschlagarbeit ( $\text{kJ/m}^2$ )

$E_{abs}$  = vom Prüfkörper absorbierte Schlagenergie (kJ)

$A$  = Prüfkörperquerschnitt ( $\text{m}^2$ )

Um bei der Prüfung von Proben, deren Länge vom Standardprüfkörper abweicht, den Auflagerabstand stufenlos regulieren zu können, wurden die Auflagerschienen des Labor-Pendelschlagwerkes quer zur Prüfrichtung zu beiden Seiten verlängert und mit verstellbaren Schlitten versehen. Bei Prüfkörpern mit einer vom Standardprüfkörper abweichenden Breite wurden die Auflagerschlitzen entfernt und mit Unterlegstücken gearbeitet, um zu gewährleisten, dass die Probe stets im Masseschwerpunkt des Pendelhammers getroffen wird.

### 3.2.4.2 Schlagbiegeprüfung auf dem Groß-Pendelschlagwerk

Für die Bestimmung der Bruchschlagarbeit im Technikumsmaßstab fand ein Groß-Pendelschlagwerk mit einer Maximalenergie von 670 J (Masse = 55 kg, Fallhöhe = 1,24 m) Verwendung.

Die Maße der Standardprüfkörper im Technikumsmaßstab belaufen sich auf 40 mm Kantenlänge bei quadratischem Querschnitt und 600 mm Länge in Faserrichtung. Der Auflagerabstand beträgt 480 mm woraus sich für Standardprüfkörper ein Stützweitenverhältnis (Auflagerabstand dividiert durch Prüfkörperhöhe) von 12 ergibt. Im Folgenden werden Prüfkörper mit Standardabmessungen im Technikumsmaßstab als Standard-Großprüfkörper bezeichnet.

Zur Untersuchung des Einflusses der Prüfkörperabmessungen auf die Bruchschlagarbeit wurden auch Prüfkörper mit hiervon abweichenden Abmessungen untersucht.

Die Berechnung der absorbierten Schlagenergie erfolgt über die Differenz zwischen Start- und Endhöhe des Pendels, welche wiederum über den Start- ( $103^\circ$ ) bzw. Endwinkel der Auslenkung des Pendels vom Ruhepol nach Gleichung 5 bestimmt wurde:

$$E_{abs.} = m g (Pl - \cos(\alpha_1) Pl) + m g (Pl - \cos(\alpha_2) Pl) \quad (\text{Gl. 5})$$

wobei

$E_{abs.}$  = vom Prüfkörper absorbierte Schlagenergie (kJ)

$m$  = Pendelmasse (kg)

$g$  = Gewichtskraft ( $\text{m/s}^2$ )

$Pl$  = Pendellänge (m)

$\alpha_1$  = Startwinkel ( $^\circ$ )

$\alpha_2$  = Endwinkel ( $^\circ$ )

Zur Ermittlung der Bruchschlagarbeit  $w$  (Gleichung 4) wird die vom Prüfkörper absorbierte Schlagenergie auf eine fixe Querschnittsfläche von  $1600 \text{ mm}^2$  ( $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ) bezogen. Eine Ausnahme stellen die in der Prüfkörperhöhe variierten Prüfkörper wie in Kapitel 4.10 beschrieben dar. Hier wurde die absorbierte Schlagenergie entsprechend der geringeren Prüfkörperhöhen (38 und 32 mm) auf die fixen Querschnittsflächen  $1520 \text{ mm}^2$  bzw.  $1280 \text{ mm}^2$  ( $40 \times 38 \text{ mm}^2$  bzw.  $40 \times 32 \text{ mm}^2$ ) bezogen.

Bei Versuchen mit einer verkürzten Pendelarmlänge (s. Kapitel 4.7) wurde der Startwinkel in der Weise vergrößert, dass sich nach Gleichung 5 die gleiche Pendelenergie wie bei Versuchen unter Standardbedingungen (Pendelarmlänge von 1m) ergibt.



### 3.2.5 Statistische Datenauswertung

Für alle Datensätze wurden Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient bestimmt. Des Weiteren wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  auf Normalverteilung geprüft.

Die für Buche und Buchen-LVL am Labor-Pendelschlagwerk aufgenommenen Datensätze wurden wie folgt ausgewertet: Zunächst wurde ein Ausreißertest nach Grubbs durchgeführt und als extreme Ausreißer aufgefallene Datenpunkte aussortiert. Bei Normalverteilung eines Datensatzes fand zum Zweck eines multiplen Mittelwertvergleiches ein parametrischer Tukey-Kramer-HSD-Test Verwendung (Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ ). Beim Vergleich zwei unabhängiger Stichproben mit Normalverteilung fand ein Stichproben t-Test für unabhängige Stichproben Verwendung. Mittelwerte von Datensätze, die keine Normalverteilung aufwiesen, wurden mit dem nicht-parametrischen Kruskal-Wallis-Test verglichen.

Für alle weiteren an Labor-Pendelschlagwerk und Groß-Pendelschlagwerk aufgenommenen Datensätze wurden zunächst Datenpunkte aussortiert, die nach der Quartilmethode als Ausreißer erkannt wurden. Zwecks eines Mittelwertvergleichs wurde der Welch-Test durchgeführt.

Die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche werden in den jeweiligen Tabellen im Ergebnisteil mittels Großbuchstaben dargestellt. Zwischen Werten, denen gleiche Buchstaben zugeteilt sind, bestehen keine signifikanten Unterschiede, sie gehören derselben homogenen Gruppe an. Es bestehen hingegen signifikante Unterschiede zwischen Werten, die mit verschiedenen Buchstaben versehen sind und damit unterschiedlichen homogenen Gruppen angehören.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Holzfeuchte der Prüfkörper

Die Bestimmung der Holzfeuchte der Laborprüfkörper aus Buchen-LVL 1 erfolgte nach der Klimatisierung unmittelbar vor der Prüfung der Bruchschlagarbeit an 86 zufällig über die Prüfkörperserien und Klimakammern entnommenen Mustern. Es wurde eine mittlere Holzfeuchte ( $\pm$  Standardabweichung) von 8,5 ( $\pm$  0,3) % ermittelt.

Die Holzfeuchten der Laborprüfkörper aus Buchenvollholz werden in Tabelle 1 aufgelistet. Auffällig bei den Ergebnissen ist, dass die Ausgleichsfeuchte der Prüfkörper aus Holz des Herkunftskollektives 2 signifikant die Holzfeuchte der Herkunftskollektive 1 und 3 übersteigt.

**Tabelle 1:** Holzfeuchte der Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz der drei Herkunftskollektive.

Herkunftskollektiv	Holzfeuchte (%)
1	11,0 (0,4) A
2	13,9 (0,2) B
3	10,8 (0,5) A

angegebene Werte: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe für n = 15

Die Holzfeuchte der übrigen Prüfkörper (Laborprüfkörper aus gängigen Stallbauhölzern und Buchen-Scrimber sowie die der Großprüfkörper) werden in den jeweilig nachfolgenden Kapiteln der Ergebnisdarstellung aufgeführt.

### 4.2 Bruchschlagarbeit von Vollholz

Die Untersuchung der Streuung der Bruchschlagarbeit von Buchenvollholz erfolgte an Holz von jeweils drei Bäumen („Buche“), die aus drei verschiedenen Herkunftskollektiven stammen (siehe Kapitel 3.1.1). Je Holz eines Baumes wurden 20 Standard-Laborprüfkörper auf dem Laborpendelschlagwerk untersucht.

Im Folgenden kann somit eine mittlere Bruchschlagarbeit für Buchenvollholz angegeben werden, das aus verschiedenen Regionen Deutschlands stammt. Weiter lassen sich aber auch Unterschie-

de in der Bruchschlagarbeit zwischen diesen Herkunftskollektiven sowie Unterschiede innerhalb der Herkunftskollektive quantifizieren.

#### 4.2.1 Bruchschlagarbeit von Buchenvollholz

Für Buchenvollholz wurde die Bruchschlagarbeit im Mittel auf  $72,5 (\pm 21,3)$  kJ/m<sup>2</sup> bestimmt. Von der Berechnung der Bruchschlagarbeit wurden die an Buche 3.1 ermittelten Messwerte ausgeschlossen, da diese vom Bruchbild durchweg eine Abweichung der Faserrichtung zur Prüfkörperlängsachse nahelegten (mittlerer Bruchwinkel von ca. 11°). Die Rohdichte der untersuchten Prüfkörper betrug im Mittel  $699 (\pm 37)$  kg/m<sup>3</sup>.

Die im Mittel über alle Herkunftskollektive für Buchenvollholz gefundene Bruchschlagarbeit liegt mit  $72,5$  kJ/m<sup>2</sup> deutlich unterhalb der Angaben aus der Literatur mit 80-120 kJ/m<sup>2</sup> (Sell 1997).

#### 4.2.2 Unterschiede der Bruchschlagarbeit über die Herkunftskollektive

Von der Betrachtung der Unterschiede der Bruchschlagarbeit von Buchenholz unterschiedlicher Herkunftskollektive wurden die an Buche 3.1 ermittelten Messwerte ausgeschlossen, da die Bruchbilder der zugehörigen Prüfkörper ausnahmslos auf eine Abweichung der Faserrichtung von der Prüfkörperlängsachse hindeuteten. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- bzw. Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie der statistischen Mittelwertanalyse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie statistischer Mittelwertanalyse für Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz unterschiedlicher Herkunftskollektive.

Herkunftskollektiv	n	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )
1	60	721 (25) A	73,0 (23,5) A
2	60	666 (27) B	79,3 (20,8) A
3	40	716 (30) A	70,3 (15,0) A

Rohdichte und Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

Aus Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass zwischen den ermittelten Bruchschlagarbeiten für die unterschiedlichen Herkunftskollektive keine signifikanten Unterschiede bestehen. Die mittlere Rohdichte der Prüfkörper unterschiedlicher Herkunftskollektive unterscheidet sich jedoch zum Teil signifikant. Interessant ist hierbei, dass die Prüfkörper mit einer geringeren mittleren Rohdichte

(Herkunftskollektiv 2,  $666 \text{ kg/m}^3$ ) nominell eine höhere Bruchschlagarbeit aufweisen, als die Prüfkörper der Herkunftskollektive 1 und 3 mit einer nominell höheren Rohdichte ( $721 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $716 \text{ kg/m}^3$ ).

In der Literatur finden sich bezüglich des Einflusses der Rohdichte auf die Bruchschlagarbeit zu den Ergebnissen gegensätzliche Angaben. So stellten Niemz und Sonderegger (2003) fest, dass die Rohdichte mit mehreren Festigkeitseigenschaften, darunter die Bruchschlagarbeit, positiv korreliert. Vermutlich überdecken in einigen Fällen Effekte des Holzgefüges den positiven Einfluss hoher Rohdichten auf die Bruchschlagarbeit.

### 4.2.3 Unterschiede der Bruchschlagarbeit innerhalb der Herkunftskollektive

Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- bzw. Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie der statistischen Mittelwertanalyse für die untersuchten Bohlen der unterschiedlichen Herkunftskollektive sind in Tabelle 3 aufgelistet.

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie der statistischen Mittelwertanalyse (innerhalb der Herkunftskollektive) für jeweils 20 Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz unterschiedlicher Bäume verschiedener Herkunftskollektive.

Bäume	Rohdichte ( $\text{kg/m}^3$ )	Bruchschlagarbeit ( $\text{kJ/m}^2$ )
Buche 1.1	716 (28) A	52,2 (12,9) A
Buche 1.2	725 (24) A	82,0 (12,6) B
Buche 1.3	723 (23) A	84,8 (26,4) B
Buche 2.1	641 (21) A	62,9 (9,7) A
Buche 2.2	675 (18) A	75,7 (10,1) B
Buche 2.3	683 (18) B	99,5 (20,5) C
Buche 3.1	757 (17) A	45,1 (16,2) A
Buche 3.2	705 (28) B	65,9 (11,0) B
Buche 3.3	726 (30) C	74,7 (17,3) B

Rohdichte und Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass sich die ermittelten Bruchschlagarbeiten sowie die Prüfkörperrohddichten zwischen Bäumen eines Herkunftskollektives signifikant voneinander unterscheiden können. Dies zeigt sich insbesondere bei der Betrachtung von Herkunftskollektiv 2, bei dem sich alle untersuchten Bäume in der ermittelten Bruchschlagarbeit signifikant voneinander unterscheiden. Auch innerhalb der Herkunftskollektive 1 und 3 zeigen sich zum Teil signifikante Unterschiede zwischen den Bruchschlagarbeitswerten der untersuchten Bäume. Zwischen den Rohddichten von Buche 1.1, 1.2 und 1.3 (Herkunftskollektive 1) liegen keine signifikanten Unterschiede vor, während zwischen den einzelnen Bäumen innerhalb der Herkunftskollektive 2 und 3 zum Teil signifikante Unterschiede festzustellen sind.

In der Literatur finden sich Aussagen, die diese Ergebnisse bestätigen. So unterliegt die Bruchschlagarbeit nach von Pechmann (1953) weitaus größeren Schwankungen, als alle anderen Festigkeitseigenschaften, die für Holz ermittelt werden. Als Ursache für die signifikanten Unterschiede in der Bruchschlagarbeit von Bohlen aus ein und demselben Baum kann das über Stammlänge und -querschnitt variierende Holzgefüge vermutet werden. Auch Kollmann (1951) sprach dem Gefüge des Holzes einen entscheidenden Einfluss auf die Bruchschlagarbeit zu. So wird dem Winkel der Fibrillen eine besondere Bedeutung zugemessen. Je flacher dieser ist, desto geringer soll auch die Bruchschlagarbeit sein.

### 4.3 Vergleich der Bruchschlagarbeit von Buchenvollholz und Buchen-LVL

Für den Vergleich der Bruchschlagarbeit von Buchenvollholz (Buche 1.1) und Buchen-LVL wurden je Material 20 Standard-Laborprüfkörper auf dem Labor-Pendelschlagwerk getestet. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- bzw. Rohddichtebestimmung sowie der statistischen Mittelwertanalyse sind in Tabelle 4 aufgelistet.

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohddichtebestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz und Buchen-LVL.

Material	Rohddichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )
Buche 1.1	716 (28) A	52,2 (12,9) A
Buchen-LVL 1	836 (34) B	67,0 (7,9) B

Rohddichte und Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass sowohl zwischen der Bruchschlagarbeit als auch der Rohddichte des untersuchten Buchenvollholzes (Buche 1.1) und Buchen-LVL signifikante Unterschiede bestehen.

Das hier erzielte Ergebnis passt zwar nicht mit dem von Colak et al. (2007) gefundenem Absinken der Bruchschlagarbeit von Schichtholz mit steigendem Klebstoffgehalt zusammen (Versprödung durch das Vorhandensein von Klebstofffugen), lässt sich jedoch mit dem von Kollmann (1951) beschriebenen Anstieg der dynamischen Festigkeit mit einer stärkeren Verdichtung beim Pressen der Schichtholzplatten erklären. Die damit einhergehende Erhöhung der Rohdichte wirkt sich dann positiv auf die Festigkeiten aus. Bei der Ergebnisinterpretation ist insgesamt jedoch im Auge zu behalten, dass insbesondere die Bruchschlagarbeit von Buche 1.1 recht niedrig ist. Würde der Mittelwert aller untersuchten Prüfkörper aus Buchenholz herangezogen werden ( $72,5 \text{ kJ/m}^2$ , Kapitel 4.2.1), so wäre kein Unterschied zwischen der Bruchschlagarbeit von Buchenvollholz und Buchen-LVL zu erkennen.

Die geringere Streuung in den ermittelten Bruchschlagarbeitswerten von LVL im Vergleich zu Vollholz lässt sich über den homogenen Aufbau des Werkstoffes erklären. Festigkeitsbeeinträchtigende Holzmerkmale (Holzfehler), wie Äste, Faserabweichungen oder Stauchbrüche werden durch das Schälen der Stämme und die nachfolgende Verklebung der erhaltenen Furniere verteilt und so ein homogenisierter Werkstoff erhalten, der dann eine geringere Streubreite der Eigenschaften aufweist.

#### 4.4 Einfluss der Richtung des Lasteintrages in Relation zur anatomischen Holzrichtung bzw. zum Furnierstreifenverlauf

Die Untersuchung des Einflusses der Richtung des Lasteintrages in Relation zur anatomischen Holzrichtung bzw. zum Furnierstreifenverlauf wurde je Lasteintragsrichtung an je 20 Standard-Laborprüfkörpern aus Buchenvollholz und Buchen-LVL am Labor-Pendelschlagwerk untersucht. Die Zuordnung der Lasteintragsrichtung (tangential und radial) für Prüfkörper aus Buchenvollholz entspricht der Definition in DIN 52189-1:1981-12. Im Fall der Prüfkörper aus Buchen-LVL sind die Flächen des Prüfkörpers als radiale Prüfkörperflächen zu verstehen, auf denen die Klebstofffugen zwischen den Furnieren sichtbar und die Furniere entlang der Faserrichtung des Holzes geschnitten sind. Als tangentielle Prüfkörperflächen werden die Flächen der Prüfkörper verstanden, die eine Furnierlage zeigen. Die Prüfkörper aus Buchenvollholz wurden nur aus Buche 1.1 geschnitten.

- 20 Prüfkörper - Buchenvollholz - Buche 1.1- tangentielle Prüfrichtung
- 20 Prüfkörper - Buchenvollholz - Buche 1.1 - radiale Prüfrichtung
- 20 Prüfkörper - Buchen-LVL 1 - „tangentielle“ Prüfrichtung
- 20 Prüfkörper - Buchen-LVL 1 - „radiale“ Prüfrichtung

Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- bzw. Rohdichtebestimmung sowie der statistischen Mittelwertanalyse sind in Tabelle 5 aufgelistet.

**Tabelle 5:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie der statistischen Mittelwertanalyse für jeweils 20 Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz und Buchen-LVL bei unterschiedlicher Prüfrichtung.

Material	Prüfrichtung	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )
Buche 1.1	tangential	716 (28) A	52,2 (12,9) A
Buche 1.1	radial	724 (29) A	55,3 (16,8) A
Buchen-LVL 1	tangential	836 (34) A	67,0 (7,9) A
Buchen-LVL 1	radial	830 (33) A	69,1 (15,3) A

Rohdichte und Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass sowohl für Prüfkörper aus Buchenvollholz als auch für Prüfkörper aus Buchen-LVL kein Einfluss der Prüfrichtung auf die Bruchschlagarbeit zu erkennen ist (keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messwerten).

Die in der Literatur zum Einfluss der Lasteintragsrichtung auf die Bruchschlagarbeit gemachten Angaben decken sich weitestgehend mit den gefundenen Ergebnissen. So fand Ghelmeziu (1938) bei Untersuchungen von Prüfkörpern aus Buche keine signifikanten Unterschiede in der Bruchschlagarbeit bei Variation der Schlagrichtung. Ebenso ist bei Kollmann (1951) zu lesen, dass bei Buchenvollholz kein Einfluss der Schlagrichtung auf die Bruchschlagarbeit zu erwarten ist.

Als möglicher Grund für den fehlenden Einfluss der Lasteintragsrichtung auf die Bruchschlagarbeit lässt sich der relativ homogene Aufbau der zerstreutporigen Holzstruktur von Buchenholz aufführen (relativ geringe Dichteveränderungen zwischen Früh- und Spätholz durch gleichmäßige Verteilung der Gefäße über den Querschnitt), der sowohl bei Buchenvollholz als auch bei Buchen-LVL zum Tragen kommt.

## 4.5 Einfluss von Auflagerabstand, Prüfkörperabmessungen und Stützweitenverhältnis auf die Bruchschlagarbeit

### 4.5.1 Einfluss des Auflagerabstandes

Der Einfluss des Auflagerabstandes auf die Bruchschlagarbeit wurde an Prüfkörpern untersucht, die Auflagerabstände von 160, 167, 192, 240, 281, 320, 440, 463, 550, 663, 666, 740, 779, 791

und 925 mm aufwiesen. Die jeweiligen Prüfkörperlängen wurden entsprechend dem Verhältnis von Auflagerabstand zu Prüfkörperlänge (1:1,25) bei den Standard-Laborprüfkörpern gewählt. Aufgrund der Variation des Auflagerabstandes bei konstanter Prüfkörperhöhe wurde indirekt auch das Stützweitenverhältnis verändert. Je Abmessung wurden 20 Prüfkörper geprüft. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung sowie der statistischen Mittelwertanalyse sind in Tabelle 6 aufgelistet.

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit Querschnittsabmessungen von 20 x 20 mm<sup>2</sup> bei variiertem Auflagerabstand und Stützweitenverhältnis.

Auflagerabstand (mm)	Prüfkörperlänge (mm)	Stützweitenverhältnis (-)	Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )
160	200	8	61,9 (11,2) AB
167	209	8,4	61,2 (8,4) AB
192	240	9,6	63,3 (8,4) AB
240	300	12	67,0 (7,9) B
281	351	14,1	70,1 (10,2) AC
320	400	16	72,4 (13,6) C
440	550	22	88,9 (11,0)
463	579	23,2	96,8 (9,8)
550	688	27,5	101,1 (16,6)
633	791	31,7	102,9 (14,7)
666	832	33,3	114,3 (16,4)
740	925	37	117,6 (18,8)
779	974	39	119,0 (20,3)
791	988	39,6	119,3 (11,1)
925	1156	46,3	135,7 (21,3)

Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) ggf. homogene Gruppe



Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass die mittlere Bruchschlagarbeit (mit einigen Ausnahmen) mit dem Auflagerabstand zunimmt. Für beim geringsten Auflagerabstand von 160 mm untersuchte Prüfkörper wurde eine mittlere Bruchschlagarbeit von  $61,9 \text{ kJ/m}^2$  bestimmt, während diese beim größten untersuchten Auflagerabstand von 925 mm bei  $135,7 \text{ kJ/m}^2$  lag. Die Mittelwerte der Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern, die bei Auflagerabständen von 160 mm bis 320 mm geprüft wurden, wurden auch auf signifikante Unterschiede untersucht. Folglich wurde beispielsweise für Prüfkörper bei einem Auflagerabstand von 160 mm eine signifikant geringere Bruchschlagarbeit von  $61,9 \text{ kJ/m}^2$  festgestellt, als für Prüfkörper bei einem Auflagerabstand von 320 mm mit einer Bruchschlagarbeit von  $72,4 \text{ kJ/m}^2$ .

Monnin untersuchte 1919 den Einfluss des Auflagerabstandes auf die Bruchschlagarbeit an Prüfkörpern mit quadratischem Querschnitt und kam zu ähnlichen Ergebnissen: mit zunehmendem Auflagerabstand wurde ein Anstieg der Bruchschlagarbeit festgestellt.

Obwohl der Auflagerabstand die Bruchschlagarbeit beeinflusst, wird dieser bei der Kennwertberechnung (absorbierte Energie pro Probenquerschnitt) nicht berücksichtigt. Ein Bezug der absorbierten Schlagenergie auf das Volumen des Prüfkörpers, wie Ylinen (1944) es vorschlug, könnte möglicherweise eine Lösung für dieses Problem darstellen.

#### 4.5.2 Einfluss der Prüfkörperbreite

Der Einfluss der Prüfkörperbreite auf die Bruchschlagarbeit wurde an Prüfkörpern untersucht, die anders als Standard-Laborprüfkörper ( $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ ) Breiten von 10, 15, 25, 30 und 40 mm aufwiesen. Je Abmessung wurden bei konstantem Auflagerabstand (240 mm) 20 Prüfkörper geprüft. Aufgrund des konstanten Auflagerabstandes und konstanter Prüfkörperhöhe lag für alle Prüfkörper ein einheitliches Stützweitenverhältnis vor. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung sowie der statistischen Mittelwertanalyse sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass sich die Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern unterschiedlicher Breite zum Teil signifikant unterscheidet. Aus der Betrachtung der Mittelwerte und der homogenen Gruppen ist zu festzustellen, dass mit zunehmender Prüfkörperbreite mit einem Anstieg der Bruchschlagarbeit zu rechnen ist. Über den Bezug der absorbierten Energie auf den Prüfkörperquerschnitt wird zwar ein Großteil des Einflusses der Prüfkörperbreite mit Blick auf eine material-spezifische Kenngröße herausnormiert, jedoch bleibt ein gewisser Einfluss der Prüfkörperbreite auf die Bruchschlagarbeit bestehen. Bei Betrachtung der Standardabweichung fällt auf, dass die Streuung der Messwerte mit zunehmender Prüfkörperbreite vornehmlich abnimmt.

**Tabelle 7:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit konstanter Prüfkörperlänge (300 mm), Prüfkörperhöhe (20 mm), Auflagerabstand (240 mm) und Stützweitenverhältnis (12) bei variiertem Breite.

Prüfkörperbreite (mm)	Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )
10	65,5 (11,8) AB
15	65,8 (10,3) AB
20	67,0 (7,9) A
25	72,5 (5,9) BC
30	76,9 (7,7) CD
40	80,8 (5,1) D

Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

In der Literatur sind widersprüchliche Angaben zum Zusammenhang von Prüfkörperbreite und Bruchschlagarbeit zu finden. Nach Rolinec (1970) korreliert die Bruchschlagarbeit mit der Prüfkörperbreite positiv. Auch Ghelmeziu (1938) fand mit Erhöhung der Prüfkörperbreite von 1 bis 4 cm einen Anstieg der Bruchschlagarbeit an Kiefernholzstäben. Im Gegensatz dazu konnte Baumann (1922) an Fichtenholzstäben mit Prüfkörperbreiten von 0,79 bis 2 cm keinen Zusammenhang von Prüfkörperbreite und Bruchschlagarbeit feststellen.

### 4.5.3 Einfluss der Prüfkörperhöhe

Der Einfluss der Prüfkörperhöhe auf die Bruchschlagarbeit wurde an Prüfkörpern untersucht, die anders als Standard-Laborprüfkörper (300 x 20 x 20 mm<sup>3</sup>) Höhen von 15, 17,1, 25, 28,8 und 30 mm aufwiesen. Je Abmessung wurden bei konstantem Auflagerabstand (240 mm) 20 Prüfkörper geprüft. Aufgrund der Variation der Prüfkörperhöhe wurde indirekt auch das Stützweitenverhältnis variiert. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung sowie der statistischen Mittelwertanalyse sind in Tabelle 8 aufgelistet.

**Tabelle 8:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit konstanter Prüfkörperlänge (300 mm), Prüfkörperbreite (20 mm), Auflagerabstand (240 mm), variierter Prüfkörperhöhe und Stützweitenverhältnis.

Prüfkörperhöhe (mm)	Stützweitenverhältnis (-)	Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )
15	16	69,2 (10,3) BC
17,1	14	70,7 (12,1) BCD
20	12	67,0 (7,9) A
25	9,6	64,9 (9,1) AB
28,8	8,3	77,4 (9,2) CD
30	8	77,9 (7,5) D

Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

Tabelle 8 ist zu entnehmen, dass sich die Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern unterschiedlicher Höhe zum Teil signifikant unterscheidet. Ein linearer Zusammenhang zwischen der Prüfkörperhöhe und der Bruchschlagarbeit ist jedoch nicht zu erkennen: Die Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern geringer Höhe ist signifikant höher als die Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern mittlerer Höhe. Weiter ist die Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern größerer Höhe wieder signifikant größer als die Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern mittlerer Höhe.

In der Literatur finden sich Angaben, die im Gegensatz zu den gefundenen Ergebnissen stehen. Rolinec (1970) fand im Gegensatz zu den hier dargestellten Ergebnissen eine positive Korrelation der Bruchschlagarbeit mit der Prüfkörperhöhe.

Als Grund für den lediglich moderaten Einfluss der Prüfkörperhöhe auf die Bruchschlagarbeit ist, genau wie im Fall der Prüfkörperbreite, die Normierung der absorbierten Energie auf den Prüfkörperquerschnitt anzunehmen.

#### 4.5.4 Prüfreihen zum Einfluss des Stützweitenverhältnisses

Das Stützweitenverhältnis ist das Verhältnis von Auflagerabstand zu Prüfkörperhöhe und ist somit von 12 (Standardprüfkörper) verschieden, wenn entweder Auflagerabstand oder Prüfkörper-

höhe jeweils oder aber Auflagerabstand und Prüfkörperhöhe nicht proportional zueinander verändert werden.

Der Einfluss des Stützweitenverhältnisses auf die Bruchschlagarbeit wurde an Prüfkörpern von Prüfserien untersucht, die bereits für die Untersuchung (a) des Einflusses des Auflagerabstandes auf die Bruchschlagarbeit sowie (b) dem Einfluss der Prüfkörperhöhe auf die Bruchschlagarbeit herangezogen wurden.

Somit kann bei der Untersuchung des Einflusses des Stützweitenverhältnisses auf die Bruchschlagarbeit unterschieden werden, welcher Ursache (1. veränderter Auflagerabstand, 2. veränderte Prüfkörperhöhe) ein beobachteter Effekt zuzuordnen ist. Eine Auflistung der untersuchten Stützweitenverhältnisse sowie der Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung und der statistischen Mittelwertanalyse erfolgte in Tabelle 6 (Auflagerabstand: Kapitel 4.5.1) und Tabelle 8 (Prüfkörperhöhe: Kapitel 4.5.3).

Zur Überprüfung, ob ein Einfluss des Stützweitenverhältnisses auf die Bruchschlagarbeit vorliegt oder vielmehr die Variation von Auflagerabstand oder Prüfkörperhöhe für eine veränderte Bruchschlagarbeit ursächlich ist, wurde eine Prüfreihe zusammengestellt, bei der die Prüfkörperabmessungen (Länge bzw. Auflagerabstand und Prüfkörperhöhe) gleichzeitig proportional so verändert wurden, dass deren Stützweitenverhältnis konstant 12 beträgt. Eine Auflistung der variierten Prüfkörperabmessungen sowie der Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung und der statistischen Mittelwertanalyse erfolgt in Tabelle 9.

**Tabelle 9:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit konstanter Prüfkörperbreite (20 mm) und konstantem Stützweitenverhältnis durch proportionale Variation von Prüfkörperhöhe und Auflagerabstand.

Auflagerabstand	Prüfkörperlänge	Prüfkörperhöhe	Bruchschlagarbeit
(mm)	(mm)	(mm)	(kJ/m <sup>2</sup> )
120	150	10	45,6 (5,4) A
180	225	15	61,5 (8,7) B
240	300	20	67,0 (7,9) B
300	375	25	72,3 (9,7) C
360	450	30	81,7 (12,7) C
420	525	35	95,9 (16,3) D

Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

Tabelle 6 (Kapitel 4.5.1) ist zu entnehmen, dass die Bruchschlagarbeit mit zunehmendem Stützweitenverhältnis (aufgrund von Erhöhung des Auflagerabstandes) mit einigen Ausnahmen zunimmt.

Tabelle 8 (Kapitel 4.5.3) ist zu entnehmen, dass zwischen den Bruchschlagarbeiten von Prüfkörpern mit unterschiedlichem Stützweitenverhältnis (aufgrund von Variation der Prüfkörperhöhe) zum Teil signifikante Unterschiede bestehen. Ein Einfluss des Stützweitenverhältnisses (bei Änderung der Prüfkörperhöhe) auf die Bruchschlagarbeit wurde nicht festgestellt.

Tabelle 9 ist zu entnehmen, dass bei konstantem Stützweitenverhältnis (bei proportionaler Veränderung von Auflagerabstand und Prüfkörperhöhe) teils signifikante Unterschiede in der Bruchschlagarbeit festzustellen sind. Die Bruchschlagarbeit steigt mit Erhöhung von Prüfkörperlänge bzw. Auflagerabstand und Prüfkörperhöhe bei konstantem Stützweitenverhältnis an. Aus den zuvor im Kapitel dargestellten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass dieser Einfluss vornehmlich auf die Variation des Auflagerabstandes zurückzuführen ist.

In der Literatur finden sich Angaben, die sich mit den gefundenen Ergebnissen decken. Monin (1919) untersuchte den Einfluss des Stützweitenverhältnisses bei Änderung des Auflagerabstandes auf die Bruchschlagarbeit an Prüfkörpern mit quadratischem Querschnitt. Er fand einen Anstieg der Bruchschlagarbeit mit zunehmendem Stützweitenverhältnis durch Erhöhung des Auflagerabstandes. Für geringere Auflagerabstände begründete er die Erhöhung der Bruchschlagarbeit damit, dass die Auflager und die Hammerfinne stärker in den Prüfkörper eindringen und sich somit die Arbeitsaufnahme erhöht. Auch Kollmann (1951) befasste sich mit dem Einfluss des Stützweitenverhältnisses auf die Bruchschlagarbeit. Er untersuchte Buchenschichtholz und fand im Gegensatz zu Vollholz einen linearen Anstieg der Bruchschlagarbeit mit dem Stützweitenverhältnis. Des Weiteren stellte er fest, dass ab einer Stablänge von 28 cm weniger die inneren Holzeigenschaften als vielmehr äußere Einflüsse, wie Reibungswiderstände der Auflager, die Bruchschlagwerte bestimmen.

## 4.6 Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer sowie von Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber – Ein Vergleich mit Literaturangaben

Für die Bruchschlagarbeitsbestimmung gängiger Stallbauhölzer sowie der von Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber wurden je Material 20 Standard-Laborprüfkörper hergestellt und auf dem Labor-Pendelschlagwerk getestet. Die ermittelten Bruchschlagarbeitswerte werden - zusammen mit der sich nach Klimatisierung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit einstellenden Holzfeuchtigkeit - in Tabelle 10 aufgelistet. Weiter wird in Tabelle 10 die gemittelte Rohdichte der untersuchten Prüfkörper sowie die Ergebnisse einer statistischen Mittelwertanalyse der Bruchschlagarbeit angegeben.

**Tabelle 10:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeits-, Rohdichte- und Holzfeuchtebestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und ggf. statistische Mittelwertanalyse) für Standard-Laborprüfkörper gängiger Stallbauhölzer, Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber.

Holzart bzw. Material	Holzfeuchte <sup>1)</sup> (%)	Rohdichte <sup>2)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchschlagarbeit <sup>2)</sup> (kJ/m <sup>2</sup> )
Bambus	10,5 (0,4)	1163 (48)	91,7 (20,6) A
Bilinga	14,5 (0,2)	707 (52)	39,0 (8,2) B
Bongossi 1	17,2 (0,1)	1055 (33)	76,5 (51,8) A
Buche 1 (1.1)	11,4 (0,1)	716 (28)	52,2 (12,9) -
Buchen-LVL 1	11,9 (1,5)	836 (34)	67,0 (7,9) A
Buchen-Scrimber	-	934 (69)	78,2 (16,7) A
Denya	14,7 (0,1)	1058 (29)	80,3 (40,9) A
Eiche 1	15,7 (0,3)	678 (36)	29,4 (11,4) B
Lärche	14,1 (0,6)	578 (26)	35,7 (18,3) B
Movingui	13,5 (0,4)	680 (45)	75,6 (37,1) A

angegebene Werte: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) ggf. homogene Gruppe, <sup>1)</sup> n = 6, <sup>2)</sup> n = 20

Tabelle 11 zeigt Spannen und daraus berechnete Mittelwerte der in verschiedenen Quellen (Benthien et al. 2012, Sell 1997 und Wolters-Fahlenkamp o.J.) angegebenen Materialdichten und Bruchschlagarbeiten verschiedener Stallbaumaterialien sowie von Buche.

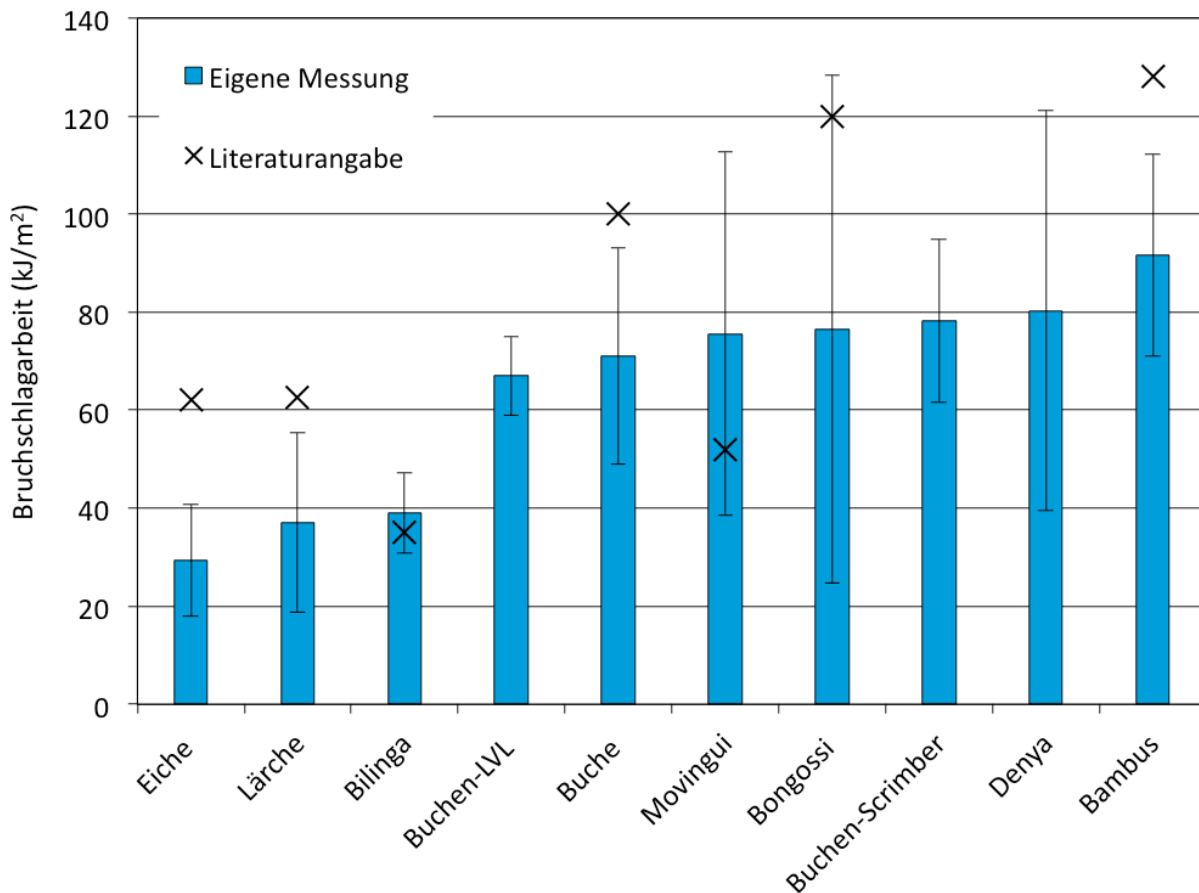
**Tabelle 11:** Spannen und daraus berechnete Mittelwerte für Literaturangaben zur Rohdichte und Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer und Buche.

Holzart bzw. Material	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )		Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )	
	min - max	MW (Stabw)	min - max	MW (Stabw)
Bambus <sup>1)</sup>	1,07 - 1,24	1,16 (0,07)	110 - 157	136 (18)
Bilinga <sup>2)</sup>	730 - 870	800	30 - 40	35
Bongossi <sup>2)</sup>	1020 - 1150	1085	90 - 150	120
Buche <sup>2)</sup>	700 - 790	745	80 - 120	100
Denya <sup>3)</sup>	770 - 1100	935 [960 <sup>4)</sup>	-	-
Eiche <sup>2)</sup>	650 - 760	705	50 - 74	62
Lärche <sup>2)</sup>	540 - 620	580	50 - 75	62,5
Movingui <sup>2)</sup>	660 - 820	740	35 - 69	52

<sup>1)</sup> Benthien et al. (2012) mit n = 10, <sup>2)</sup> Sell (1997) (lufttrocken), <sup>3)</sup> Wolters-Fahlenkamp (o.J.) (lufttrocken), <sup>4)</sup> von Wolters-Fahlenkamp (o.J.) hervorgehobener Wert

Die Bruchschlagarbeit von Standard-Laborprüfkörpern wurde mit Literaturangaben (sofern existent) für gängige Stallbauhölzer (Bambus, Bilinga, Bongossi (1), Denya, Eiche (1), Lärche und Movingui) sowie Buche (1.1), Buchen-LVL (1) und Buchen-Scrimber in Abbildung 1 verglichen.

Tabelle 10 ist zu entnehmen, dass im Fall der Standard-Laborprüfkörper zum Teil signifikante Unterschiede zwischen den Bruchschlagarbeiten der verschiedenen Materialien bestehen. Entsprechend ihrer Bruchschlagarbeit lassen sich die Holzarten in zwei signifikant voneinander verschiedene Gruppen einteilen: Zwischen den Materialien Bambus, Bongossi 1, Buchen-LVL 1, Buchen-Scrimber, Denya und Movingui wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Zwischen den Materialien Bilinga, Eiche 1 und Lärche wurden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der Bruchschlagarbeit festgestellt, jedoch unterscheiden sie sich signifikant von den zuvor aufgeführten.



**Abbildung 1:** Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer, Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber im Vergleich mit Literaturangaben, soweit vorhanden.

Dem in Abbildung 1 dargestellten Vergleich der an gängigen Stallbauhölzern, Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber ermittelten Bruchschlagarbeit mit Literaturangaben ist zu entnehmen, dass die selbst gemessenen Bruchschlagarbeiten überwiegend deutlich unterhalb von denen liegen, die in der Literatur für gängige Stallbauhölzer und andere Materialien angegeben werden. Insbesondere die Bruchschlagarbeit von Prüfkörpern aus Eiche, Lärche, Buche, Bongossi und Bambus wurde weit unterhalb der in der Literatur angegebenen Werte gefunden. Ausnahmen sind Bilinga und Movingui, bei denen sich der mittlere Messwert mit dem Mittelwert der Literaturangabe nahezu deckt (Bilinga) bzw. diesen noch übersteigt (Movingui).

#### 4.7 Untersuchung zur Robustheit der Groß-Pendelschlagwerk-Prüfmethode

Für die Groß-Pendelschlagwerk-Prüfmethode wurde untersucht, ob die Berücksichtigung der Masse des Pendelarms für die Festlegung des Auftreffpunktes des Pendelhammers auf den Prüfkörper einen Einfluss auf den Messwert der Bruchschlagarbeit hat. Hierfür wurden - ergänzend zu den Standard-Versuchsbedingungen - Standard-Großprüfkörper aus Buchen-LVL bei verringertem



Abstand zwischen Prüfkörpermitte und Drehachse des Pendels geprüft (Buche-LVL 1 X). Um mit gleicher Schlagenergie zu prüfen, wurde der Winkel der Pendelauslenkung erhöht. Die Ergebnisse der Holzfeuchte-, Rohdichte- und Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse - letzte nur für Bruchschlagarbeit) sind in Tabelle 12 aufgeführt.

**Tabelle 12:** Ergebnisse der Holzfeuchte-, Rohdichte- und Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und ggf. statistische Mittelwertanalyse) für je 20 Standard-Großprüfkörper aus Buchen-LVL 1 bei Variation der Pendelarmlänge (Buchen-LVL 1 vs. Buche-LVL 1 X).

Holzart	Holzfeuchte (%)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchschlagarbeit (kJ/m <sup>2</sup> )
Buchen-LVL 1	8,8 (0,2)	861 (20)	146,9 (16,6) A
Buche-LVL 1 X	8,7 (0,1)	864 (20)	151,3 (19,0) A

angegebene Werte: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) ggf. homogene Gruppe

Tabelle 12 ist zu entnehmen, dass die Berücksichtigung der Pendelarmmasse zur Festlegung des Auftreffpunktes des Pendelhammers auf den Prüfkörper zu keinem signifikanten Unterschied in der Bruchschlagarbeit führt. Aus diesem Ergebnis ist zu schlussfolgern, dass aufgrund ggf. vorliegender Unzulänglichkeiten des Versuchsaufbaus die Versuchsergebnisse nicht infrage zu stellen wären.

Dass die Methode zur Bestimmung der Bruchschlagarbeit recht robust ist, fand auch Krech (1960), der bei gebräuchlichen Schlaggeschwindigkeiten deren Wirkung auf die Ergebnisse des Schlagbiegeversuches als vernachlässigbar gering fand. Auch der Einfluss des Pendelhammergewichtes auf die Bruchschlagarbeit ist nach Ghelmeziu (1938) zu vernachlässigen.

#### 4.8 Unterschiede in der Bruchschlagarbeit über verschiedene Chargen eines Materials bei Versuchen auf dem Groß-Pendelschlagwerk

Zur Untersuchung, ob auch innerhalb eines untersuchten Materials über verschiedene Chargen Unterschiede in der Bruchschlagarbeit festzustellen sind, wurden jeweils 2 Lieferungen einer Holzart (Bongossi 1 und Bongossi 2, Eiche 1 und Eiche 2) sowie des Holzwerkstoffes Buchen-LVL (1 und 2) geprüft. Je Charge und Material wurden 20 Standard-Großprüfkörper untersucht. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13 ist zu entnehmen, dass für die untersuchten Materialien zum Teil signifikante Unterschiede in der Bruchschlagarbeit der untersuchten Chargen bestehen. So ist beispielsweise die Bruchschlagarbeit der Charge Bongossi 2 mit  $163,8 \text{ kJ/m}^2$  signifikant höher als die der Charge Bongossi 1 mit  $114,9 \text{ kJ/m}^2$ . Die für die verschiedenen Chargen von Buchen-LVL und Eiche gefundenen Bruchschlagarbeiten zeigen keine signifikanten Unterschiede.

**Tabelle 13:** Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung für Standard-Großprüfkörper ( $n=20$ ) unterschiedlicher Materialien und Chargen auf dem Groß-Pendelschlagwerk.

Material	Bruchschlagarbeit ( $\text{kJ/m}^2$ )
Bongossi 1	114,9 (50,8) A
Bongossi 2	163,8 (81,5) B
Buchen-LVL 1	144,8 (12,9) A
Buchen-LVL 2	131,7 (21,4) A
Eiche 1	58,2 (23,4) A
Eiche 2	38,4 (15,6) A

Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) ggf. homogene Gruppe

#### 4.9 Maßstabsvergrößerung von Standardprüfkörpern für Versuche auf dem Groß-Pendelschlagwerk

Der Einfluss einer Maßstabsvergrößerung auf die Bruchschlagarbeit wurde anhand von Ergebnissen untersucht, die auf dem Labor- und Groß-Pendelschlagwerk erzielt wurden. Im Vergleich zu den Standard-Laborprüfkörpern hatten die Standard-Großprüfkörper verdoppelte Abmessungen, d.h. anstelle von  $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$  (Auflagerabstand 240 mm, Stützweitenabstand 12),  $600 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  (Auflagerabstand 480 mm, Stützweitenverhältnis 12). Geprüft wurde der Einfluss einer Maßstabsvergrößerung an Prüfkörpern aus Bambus, Bilinga, Bongossi 1, Buchen-LVL 1, Buchen-Scrimber, Denya, Eiche 1, Lärche und Movingui. Die für Standard-Großprüfkörper aus verschiedenen Materialien gefundenen Holzfeuchten, Rohdichten und Bruchschlagarbeiten sind in Tabelle 14 aufgeführt. Weiter ist Tabelle 14 das Ergebnis einer statistischen Mittelwertanalyse der Bruchschlagarbeit zu entnehmen. Die entsprechenden Daten für Standard-Laborprüfkörper sind in Tabelle 10 aufgeführt.

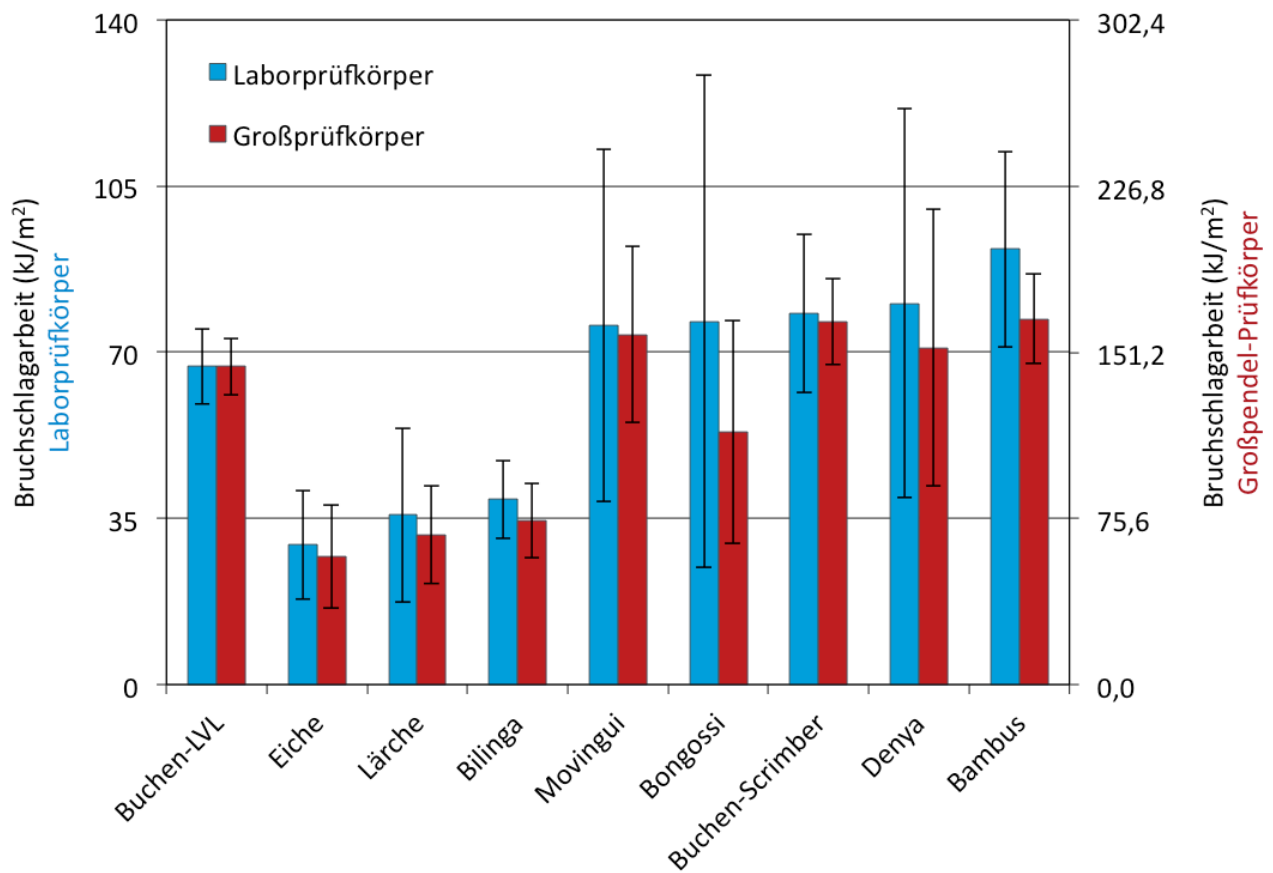
**Tabelle 14:** Ergebnisse der Holzfeuchte-, Rohdichte- und Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und ggf. statistische Mittelwertanalyse) für Standard-Großprüfkörper verschiedener Materialien.

Material	Holzfeuchte <sup>1)</sup> (%)	Rohdichte <sup>2)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchschlagarbeit <sup>2)</sup> (kJ/m <sup>2</sup> )
Bambus	10,0 (0,3)	1197 (19)	166,5 (20,3) A
Bilinga	13,9 (0,2)	726 (47)	74,6 (16,9) EF
Bongossi 1	16,4 (0,2)	1067 (26)	114,9 (50,8) CD
Bongossi 2	-	-	163,8 (81,5) -
Buche 4	-	-	128,8 (25,7) BCD
Buchen-LVL 1	8,8 (0,2)	861 (20)	144,8 (12,9) ABC
Buchen-LVL 2	-	-	131,7 (21,4) -
Buchen-Scrimber	-	-	165,3 (19,6) A
Denya	13,8 (0,2)	1063 (19)	153,4 (63,0) AB
Eiche 1	15,0 (0,2)	650 (37)	58,2 (23,4) F
Eiche 2	-	-	38,4 (15,6) -
Tanne	-	-	102,7 (30,2) DE
Lärche	13,6 (0,3)	565 (38)	68,3 (22,3) F
Movingui	13,1 (0,4)	694 (36)	159,4 (40,1) AB

angegebene Werte: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) ggf. homogene Gruppe, <sup>1)</sup> n = 10, <sup>2)</sup> n = 20

In Abbildung 2 wird ein Vergleich der für Standard-Laborprüfkörpern und Standard-Großprüfkörper für verschiedene Holzarten ermittelten Bruchschlagarbeiten vorgenommen. Hierfür wurden Primär-y-Achse (Laborprüfkörper) und Sekundär-y-Achse (Groß-Prüfkörper) so skaliert, dass die Säulen, die die Bruchschlagarbeit des Buchen-LVLs repräsentieren, gleich hoch sind. Über dieses Vorgehen lassen sich die Bruchschlagarbeiten der unterschiedlich großen Prüfkörper relativ zueinander vergleichen.

Tabelle 14 ist zu entnehmen, dass für die untersuchten Standard-Großprüfkörper überwiegend signifikante Unterschiede zwischen den Bruchschlagarbeiten bestehen.



**Abbildung 2:** Vergleich der an Standard-Labor- und Großprüfkörpern ermittelten Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber.

Bei der Betrachtung von Abbildung 2 fällt auf, dass die für Standard-Großprüfkörper ermittelte Bruchschlagarbeit ausnahmslos über der der Standard-Laborprüfkörper liegt. Des Weiteren lassen sich die Holzarten Eiche, Lärche und Bilinga im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien einer Gruppe geringer Bruchschlagarbeit zusammenfassen. Buchen-LVL, Movingui, Bongossi, Buchen-Scrimber und Denya lassen sich zu einer Gruppe mit deutlich höherer Bruchschlagarbeit zusammenfassen. Die Bruchschlagarbeit von Bambus übersteigt die aller übrigen Materialien.

Die Maßstabsvergrößerung bzw. Abmessungsverdoppelung der Standard-Laborprüfkörper zu Standard-Großprüfkörpern hatte im Vergleich innerhalb der einzelnen untersuchten Materialien einen starken Anstieg der Bruchschlagarbeit zur Folge. Zu ähnlichen Ergebnissen kam von Widmann (2009), der für großformatige Prüfkörper (Kanthölzern und Brettern) aus Schweizer Fichtenholz (Norway Spruce/ *Picea abies*) Bruchschlagarbeiten ermittelte, die deutlich über denen der in der Literatur (Sell 1997) angegebenen und in eigenen Versuchen erzielten Werten für fehlerfreie Kleinproben ( $300 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ ) lagen. Wie auch schon in Kapitel 4.5.1 festgestellt, ist dieser Einfluss vermutlich auf die Erhöhung des Auflagerabstandes zurückzuführen, da für die

Variation der Prüfkörperbreite (s. Kapitel 4.5.2) und die Variation der Prüfkörperhöhe (s. Kapitel 4.5.3) nur ein geringer Einfluss auf die Bruchschlagarbeit festgestellt wurde.

#### 4.10 Untersuchung von Prüfkörpern auf dem Groß-Pendelschlagwerk, deren Abmessungen mit denen von Stallbohlen vergleichbar sind

Da die Bruchschlagarbeit von der Prüfkörperlänge beeinflusst ist, wurden auf dem Groß-Pendelschlagwerk Prüfkörper untersucht, deren Abmessungen denen gängiger Stallbohlen (siehe Tabelle 15) mit Ausnahme der Breite entsprechen.

**Tabelle 15:** Gebräuchliche Abmessungen von Stallbohlen.

Länge (mm)	Breite (mm)	Höhe (mm)	Stützweitenverhältnis <sup>1)</sup>
880	90 - 160	32 / 38 / 40	27,5 / 23,2 / 22
1265	90 - 160	32 / 38 / 40	39,5 / 33,3 / 31,6
1480	90 - 160	32 / 38 / 40	46,3 / 38,9 / 37

<sup>1)</sup> zur Berechnung des Stützweitenverhältnisses wurde die Länge der Stallbohle als Auflagerabstand herangezogen

Ausgehend von den in Tabelle 15 angegebenen Abmessungen sowie der Montage von Stallbohlen in der Praxis (Einschub in U-Profile) wurden Prüfkörper hergestellt, die sich bei einheitlicher Höhe (40 mm) und Breite (40 mm) lediglich in der Länge unterscheiden. Die Länge der Prüfkörper (1100, 1581 und 1850 mm) wurde entsprechend dem Verhältnis von Auflagerabstand zu Prüfkörperlänge (1:1,25) der Standardprüfkörper so gewählt, dass der Auflagerabstand der Länge der Stallbohlen entspricht (880, 1265 und 1480 mm).

Weiter wurden Prüfkörper hergestellt, die sich bei einheitlicher Länge (1581 mm, Auflagerabstand 1265 mm) und Breite (40 mm) lediglich in der Dicke (32, 38, 40 mm) unterscheiden.

Die Prüfserie mit Prüfkörpern der Abmessung 1581 x 40 x 40 mm<sup>3</sup> wurde redundant für beide beschriebenen Maßstabsverkleinerungen verwendet und wird im Folgenden der Übersichtlichkeit halber auch doppelt aufgeführt. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) von nach den verschiedenen Methoden miniaturisierten Stallbohlen sind in Tabelle 16 aufgeführt.

**Tabelle 16:** Ergebnisse der Bestimmung der Bruchschlagarbeit (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) von Prüfkörpern, deren Abmessungen denen von Stallbohlen vergleichbar sind. Je Abmessung wurden 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL 1 konstanter Breite (40 mm) untersucht.

Prüfkörperlänge (mm)	Prüfkörperhöhe (mm)	Auflagerabstand (mm)	Stützweitenver- hältnis	Bruchschlagar- beit (kJ/m <sup>2</sup> )
1100	40	880	22	179,6 (17,5) A
1581	40	1265	32	198,5 (23,9) AB
1850	40	1480	37	214,2 (40,8) B
1581	32	1265	40	188,9 (29,8) A
1581	38	1265	33	187,9 (32,4) A
1581	40	1265	32	198,5 (23,9) A

Bruchschlagarbeit: Mittelwert ( $\pm$  Standardabweichung) homogene Gruppe

Tabelle 16 ist zu entnehmen, dass - wie bereits bei Versuchen auf dem Laborpendel festgestellt (s. Kapitel 4.5.4) - die Bruchschlagarbeit mit zunehmendem Stützweitenverhältnis (durch Erhöhung der Prüfkörperlänge bzw. des Auflagerabstandes) ansteigt. Weiter ist Tabelle 16 zu entnehmen, dass - wie zuvor festgestellt (s. Kapitel 4.5.3) - eine Änderung des Stützweitenverhältnisses über die Variation der Prüfkörperhöhe keinen Einfluss auf die Bruchschlagarbeit hat.

Wie auch Widmann (2009) bei einer ähnlichen Untersuchung feststellte, fand gleichwohl Partl (1977) vor ihm, dass Untersuchungen an kleinen fehlerfreien Proben keine Grundlage für eine effektive Dimensionierung von Bauteilen aus Holz auf stoßartige Belastung liefern.

## 5 Fazit und Ausblick

Anhand der durchgeführten Versuche konnte ein grundlegendes Verständnis zur Bruchschlagarbeit als Materialkennwert für Holzarten und Holzwerkstoffe gewonnen werden. Abmessungsbedingte Einflüsse auf die Bruchschlagarbeit wurden bestätigt oder als von geringer Bedeutung identifiziert. Der geringe Einfluss von Prüfkörperbreite und -höhe auf die Bruchschlagarbeit legt die Brauchbarkeit des Materialkennwertes Bruchschlagarbeit für die Auslegung von Bauteilen nahe. Grund hierfür ist die Tatsache, dass bei der Berechnung der Bruchschlagarbeit die vom Prüfkörper absorbierte Energie auf den Querschnitt bezogen wird. Für die Prüfkörperlänge bzw. den Auflagerabstand wurde jedoch ein Einfluss auf die Bruchschlagarbeit festgestellt, da diese Größen bei der Berechnung der Bruchschlagarbeit nicht mitberücksichtigt werden. Folglich kann die Bruchschlagarbeit lediglich als Richtwert bei der Materialauswahl dienen. Für einen Vergleich von Bruchschlagarbeitswerten müssen diese jedoch an Prüfkörpern gleicher Abmessungen ermittelt worden sein.

Die Ergebnisse der Untersuchung von Buchenvollholz und Buchen-LVL legen nahe, dass durch den Einsatz von Holzwerkstoffen, mit gegenüber Vollholz geringerer Streubreite in der Bruchschlagarbeit, bei der Bemessung von Bauteilen mit geringeren Sicherheitsaufschlägen gerechnet und damit Material eingespart werden könnte.

## Quellenverzeichnis

### Literatur

- Amman M (2006) Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH)
- BAUMANN R W (1922) Die bisherigen Ergebnisse der Holzprüfungen in der Materialprüfungsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart. No. 231. J. Springer, 1922.
- 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* 62(4):255-262
- 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, GÄCKLER S, OHLMEYER M (2016) Durchtrittbeständigkeit von Ausfachungsbohlen für Pferdeboxen (PerdeTritt). In: Tagungsband Innovationstage 2016, 25.-26. Oktober 2016, Bonn, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)
- BMBF, BMEL (2014) Bioökonomie in Deutschland - Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft. Bonn, Berlin 2014
- BOCCHIO N, RONCA P, VAN DE KUILEN (2001) Impact loading test on timber beams. In: *Innovative Wood Structures and Bridges*, Lahti, Finland
- COLAK S, COLAKOGLU G, AYDIN (2007) Effects of log steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). *Build Environ* 42 (1): 93-98.
- GHELMEZIU N (1938) Untersuchungen über die Schlagfestigkeit von Bauhölzern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1(15):585-601.
- KALBERER M (2006) Quantifizierung und Optimierung der Schutzwaldleistung gegen Steinschlag. Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau
- KOLLMANN F (1936) *Technologie des Holzes*.
- KOLLMANN F (1937) Über die Schlag- und Dauerfestigkeit der Hölzer. *Preuss. Holzforschungsint.*
- KOLLMANN F (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*.
- KRECH H (1960) Größe und zeitlicher Ablauf von Kraft und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch an Holz und ihr Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit. *Holz als Roh- und Werkstoff* 18.3 (1960): 95-105.
- MONNIN M (1919) *Essais physiques, statiques et dynamiques des bois*.
- NIEMZ P, SONDEREGGER W (2003) Untersuchungen zur Korrelation ausgewählter Holzeigenschaften untereinander und mit der Rohdichte unter Verwendung von 103 Holzarten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 154.12 (2003): 489-493.
- PARTL M, STRÄSSER H (1977) Temperatureinfluss auf das Biege- und Schlagbiegeverhalten von Fichtenholz. *Holzforschung und Holzverwertung* 29(5):94-101



- ROLINEC P (1970) Vergleichende Untersuchungen über den Einfluß von Größe und Form der Probestäbe auf die Bruchschlagarbeit des Holzes. Diplom-Arbeit, Hamburg/ Reinbek (1970).
- SELL J (1997) Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. Dietikon : Baufachverlag, 87 p
- SCHWAB E, GYAMFI A (1985) Verhalten von Furnierlagenholz bei schlagartiger Beanspruchung. Holz als Roh- und Werkstoff 43.11:455-461
- WIDMANN R (2009) Schlagbiegebeanspruchung von Bauteilen aus Schweizer Fichtenholz (Impact load on timber structural elements made of Swiss Norway Spruce) Abschlussbericht zum WHFF Projekt Nr. 2003.17, EMPA, Dübendorf
- VAN DE KUILEN (2012) The first full timber guardrail for highways. In: 2. Internationale Holzbrückentage 2012, 19.-20. April 2012, Bad Wörishofen, Deutschland
- VON PECHMANN H (1953) Untersuchungen über die Bruchschlagarbeit von Rotbuchenholz. European Journal of Wood and Wood Products 11.9 (1953): 361-367.
- YLINEN A (1944) Begründung der Abänderungsvorschläge der Prüfnormen für Holz. Silvae Orbis 15 (1944): 99.

## **Normen**

- DIN 52182:1976-09; Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte. Berlin: Beuth
- DIN 52189-1:1981-12; Prüfung von Holz: Schlagbiegeversuch; Bestimmung der Bruchschlagarbeit. Berlin: Beuth.
- DIN EN 13183-1:2002-07; Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Berlin: Beuth

## **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](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)

## **Internetquelle**

- 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)

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer, Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber im Vergleich mit Literaturangaben, soweit vorhanden. ....	26
<b>Abbildung 2:</b>	Vergleich der an Standard-Labor- und Großprüfkörpern ermittelten Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber. ....	30

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Holzfeuchte der Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz der drei Herkunftskollektive. ....	12
<b>Tabelle 2:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie statistischer Mittelwertanalyse für Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz unterschiedlicher Herkunftskollektive.	13
<b>Tabelle 3:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie der statistischen Mittelwertanalyse (innerhalb der Herkunftskollektive) für jeweils 20 Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz unterschiedlicher Bäume verschiedener Herkunftskollektive. ....	14
<b>Tabelle 4:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohdichtebestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz und Buchen-LVL. ....	15
<b>Tabelle 5:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeits- und Rohdichtebestimmung (Mittelwert und Standardabweichung) sowie der statistischen Mittelwertanalyse für jeweils 20 Standard-Laborprüfkörper aus Buchenvollholz und Buchen-LVL bei unterschiedlicher Prüfrichtung. ....	17
<b>Tabelle 6:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit Querschnittsabmessungen von 20 x 20 mm <sup>2</sup> bei variiertem Auflagerabstand und Stützweitenverhältnis. ....	18
<b>Tabelle 7:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit konstanter Prüfkörperlänge (300 mm), Prüfkörperhöhe (20 mm), Auflagerabstand (240 mm) und Stützweitenverhältnis (12) bei variiertem Breite. ....	20
<b>Tabelle 8:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit konstanter Prüfkörperlänge (300 mm), Prüfkörperbreite (20 mm), Auflagerabstand (240 mm), variiertem Prüfkörperhöhe und Stützweitenverhältnis. ....	21
<b>Tabelle 9:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) für jeweils 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL mit konstanter Prüfkörperbreite (20 mm) und konstantem	

	Stützweitenverhältnis durch proportionale Variation von Prüfkörperhöhe und Auflagerabstand.....	22
<b>Tabelle 10:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeits-, Rohdichte- und Holzfeuchtebestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und ggf. statistische Mittelwertanalyse) für Standard-Laborprüfkörper gängiger Stallbauhölzer, Buche, Buchen-LVL und Buchen-Scrimber.....	24
<b>Tabelle 11:</b>	Spannen und daraus berechnete Mittelwerte für Literaturangaben zur Rohdichte und Bruchschlagarbeit gängiger Stallbauhölzer und Buche.....	25
<b>Tabelle 12:</b>	Ergebnisse der Holzfeuchte-, Rohdichte- und Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und ggf. statistische Mittelwertanalyse) für je 20 Standard-Großprüfkörper aus Buchen-LVL 1 bei Variation der Pendelarmlänge (Buchen-LVL 1 vs. Buche-LVL 1 X). ....	27
<b>Tabelle 13:</b>	Ergebnisse der Bruchschlagarbeitsbestimmung für Standard-Großprüfkörper (n=20) unterschiedlicher Materialien und Chargen auf dem Groß-Pendelschlagwerk. ....	28
<b>Tabelle 14:</b>	Ergebnisse der Holzfeuchte-, Rohdichte- und Bruchschlagarbeitsbestimmung (Mittelwert, Standardabweichung und ggf. statistische Mittelwertanalyse) für Standard-Großprüfkörper verschiedener Materialien.....	29
<b>Tabelle 15:</b>	Gebräuchliche Abmessungen von Stallbohlen.....	31
<b>Tabelle 16:</b>	Ergebnisse der Bestimmung der Bruchschlagarbeit (Mittelwert, Standardabweichung und statistische Mittelwertanalyse) von Prüfkörpern, deren Abmessungen denen von Stallbohlen vergleichbar sind. Je Abmessung wurden 20 Prüfkörper aus Buchen-LVL 1 konstanter Breite (40 mm) untersucht.....	32

**Bibliografische Information:**  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

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

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter [www.thuenen.de](http://www.thuenen.de)

*Volumes already published in this series are available on the Internet at [www.thuenen.de](http://www.thuenen.de)*

**Zitationsvorschlag – Suggested source citation:**

**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

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

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



## Thünen Working Paper 121

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut  
Bundesallee 50  
38116 Braunschweig  
Germany

[thuenen-working-paper@thuenen.de](mailto:thuenen-working-paper@thuenen.de)  
[www.thuenen.de](http://www.thuenen.de)

DOI:10.3220/WP1551778748000  
urn:nbn:de:gbv:253-201903-dn060901-7