

Weiterentwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Charakterisierung von Furnier mit Hilfe von Ultraschallwellen

Mario KÜHMSTEDT¹, Kilian TSCHÖKE¹, Robert KRÜGER²

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden

² Technische Universität Dresden, Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik, Dresden

Kontakt E-Mail: mario.kuehmstedt@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Unter anderem durch den Klimawandel und einen nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen befördert, hat das Konstruieren mit Holz in den letzten Jahren einen Aufschwung erlebt. Der von Natur aus heterogene, anisotrope Werkstoff Holz mit Wuchsbesonderheiten (Aststellen, Faserorientierung) lässt sich zu Holzwerkstoffen (Furnierlagenverbunde) verarbeiten. Damit ein einzelnes Furnier optimal verbaut werden kann, muss zunächst eine Materialcharakterisierung durchgeführt werden. Resultierend daraus wird das Furnier lastgerecht zu einem Holzwerkstoff verbaut bzw. findet gegebenenfalls eine gezielte Verstärkung von Schwachstellen, vor Einbau, statt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der zerstörungsfreien Charakterisierung von Buchenfurnier (0,5 mm Materialstärke) mit geführten Wellen. Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen war es, einen Versuchsstand zur Bestimmung der Materialparameter zu konzipieren und aufzubauen. Dabei sollen Elastizitätsmodul und Schubmodul der Buchenfurniere durch das Anwenden von elastischen Wellen im Ultraschall-Frequenzbereich ermittelt werden. Im Frequenzbereich von 200 kHz wurden Ultraschallwellen angeregt und detektiert. Das Senden und Empfangen der Ultraschallwelle wurde mit piezoelektrischen Wandlern realisiert. Zur Ergebnisdarstellung wurden Polardiagramme erstellt, welche die E-Module, Schubmodule und die Faserrichtung in einem 360° Messkreis, in der Furnierebene, darstellen. Die Validierung der Messergebnisse erfolgte durch Zugversuche. Resultierend aus dem Vergleich der Ergebnisse, konnte für bestimmte Winkelbereiche bzgl. der Faserorientierung eine Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt werden. Für die abschließende Beurteilung der Ultraschallmessergebnisse in Faserrichtung, welche nicht mit den Zugversuchen übereinstimmen, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Einführung

Das Bauen und Konstruieren mit Holz ist keine Erfindung der Neuzeit. Befördert, unter anderem durch den Klimawandel und einen nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen, hat das Konstruieren mit Holz in den letzten Jahren eine Renaissance erlebt. In dem IGF-Vorhabens 21210 BR / 2 „Entwicklung von Verfahren zum lastpfadgerechten Design textilverstärkter Furnierlagenverbundwerkstoffe“ erarbeiteten das Fraunhofer IKTS, die Professur Textile Technologien der TU Chemnitz sowie das Institut für Holztechnologie Dresden (IHD) Methoden, um Holzwerkstoffe für hochbelastete Anwendungen, bspw. im Automobil- oder Sportbereich, zu optimieren und so einen Beitrag zur Reduktion von



Kohlenstoffdioxid zu leisten. Um sich diesem Ziel anzunähern, gilt es den Werkstoff und dessen Besonderheiten zu kennen.

Holz ist ein heterogener, anisotroper Werkstoff mit unterschiedlichen strukturellen Eigenschaften im Querschnitt und in den drei anatomischen Grundrichtungen (longitudinal, radial, tangential). Zusätzlich handelt es sich um einen natürlichen Werkstoff, der aufgrund verschiedenster Einflüsse Wuchsbesonderheiten aufweisen kann. Die Kombination aus Anisotropie, Heterogenität und Wuchsbesonderheiten erschweren eine standardisierte Qualitätskontrolle von natürlich gewachsenem Holz. Dem gegenüber zeichnen sich Holzverbundwerkstoffe durch einen homogenen Aufbau aus. Beispielsweise werden bei Furnierschichtholz dünne Holzlagen miteinander verklebt, wodurch Fehlstellen wie Astlöcher zufällig über das gesamte Bauteil verteilt werden [1]. Für hochbelastete Bauteile aus Holzverbundwerkstoffen ist jedoch keine zufällige Verteilung von Fehlstellen angestrebt, sondern eine gezielte Verstärkung. Bevor es zu einer solchen Ausbesserung kommen kann, müssen die Fehlstellen zunächst detektiert und charakterisiert werden. Identifizierte Schwachstellen können bspw. durch das gezielte Einbringen textiler Verstärkungen, in Form von Flachs- oder Basaltfasern, kompensiert werden [2].

Die Herausforderung besteht darin, Furniereigenschaften gezielt zu charakterisieren, indem ein zerstörungsfreies Prüfverfahren angewendet wird. Dabei handelt es sich um elastische Wellen im Ultraschallbereich. Anhand von ausgesendeten Messsignalen sollen Materialparameter wie Elastizitäts- oder Schubmodul, sowie der Faserverlauf im Furnier ermittelt werden. Insbesondere die Anwendung von luftgekoppeltem Ultraschall besitzt für die zerstörungsfreien Prüfungen von Holzwerkstoffen großes Potenzial. Für eine Messung muss kein direkter Kontakt zum Probekörper hergestellt werden, da die Luft als Verbindungsmedium fungiert. Dadurch sind hohe Messgeschwindigkeiten möglich, die insbesondere für die industrielle Anwendung von entscheidender Bedeutung sind. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Prüfstand zu Luft-Ultraschallmessung an Holz aufgebaut. An diesem Prüfstand werden winkelabhängig Messdaten aufgenommen und die Ergebnisse validiert. Anschließend erfolgt eine Abschätzung der Materialparameter und Diskussion der Ergebnisse.

1. Messtechnik

In Vorversuchen ging es darum, ein Messsetup zu entwickeln, mit dem in anschließenden Hauptversuchen die Charakterisierung des Furniers vorgenommen werden kann. Der Versuchsstand wurde aufgrund der Resultate der Vorversuche stetig weiterentwickelt und verändert, wobei sich das grundlegende Messprinzip (Sendempfangsmessung zur Laufzeitermittlung) nicht verändert hat. Parallel zu der Entwicklung des Messsetups wurde daran gearbeitet, wie es möglich ist, die Ergebnisse auszuwerten.

Für das Ziel der Arbeit, das Charakterisieren eines gesamten Furniers hinsichtlich E- und G-Modul, ist es sinnvoll, große Bereiche abzudecken, um umfangreiche Informationen zu den Materialparametern zu erhalten. Die etablierten zerstörungsfreien Messmethoden mit Ultraschall sind für Tiefenmessungen geeignet (Impulsechoverfahren [3]) oder durchschallen senkrecht den gesamten Probekörper in seiner Materialstärke. Im hier angewendeten Fall der Furnieruntersuchung würde die Durchschallung lediglich Informationen über einen sehr punktuellen Bereich liefern. Die Tiefenmessung mit dem Impulsechoverfahren ist bei den geringen Materialstärken nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wurde eine Methode basierend auf geführten elastischen Wellen angewandt, bei der ein Aktor eine Welle anregt, welche sich in der Furnierebene ausbreitet und von einem Sensor empfangen wird. Mit dieser Methode ist es möglich, Informationen von der Laufstrecke zwischen Aktor und Sensor zu erhalten. Für die Anregung der Signale wurde, die am Fraunhofer IKTS entwickelte „MAS“-

Messeinheit (Multi Channel Acoustic Measurement System) verwendet [4]. Die Messeinheit wird von einem Rechner über eine Software gesteuert. In der Software können u. a. die Parameter Anregungsfrequenz, Verstärkung des Signals und die Sendeleistung eingestellt werden. Neben der Verstärkung in der Software gibt es noch einen zusätzlichen Vorverstärker, welcher sich zwischen MAS-Messeinheit und Ultraschallwandler befindet und das empfangene Signal des Sensors verstärkt. Für die Untersuchungen stehen Piezo-Wandler¹ und Luftultraschallwandler² bereit. Beide Wandler-Typen können senden und empfangen. Für eine Anwendung des Messprinzips in der Praxis ist es vorteilhaft, wenn eine Messapparatur mit zwei Luftultraschallwandlern ausgestattet ist, um kontaktlose Messungen zu ermöglichen. Die Abbildung 1 zeigt schematisch das angewendete Messsetup und die verwendete Messtechnik.

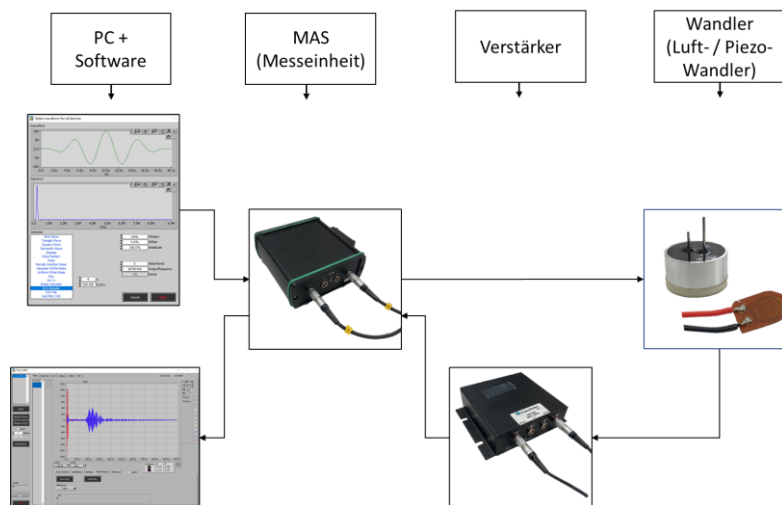


Abbildung 1 – Messsetup mit verwendeter Messtechnik

Mit Vorversuchen sollte das zuvor gezeigte Messsetup auf das Furniermaterial übertragen werden, daher gab es verschiedene Entwicklungsstufen des Messsetups in den Vorversuchen.

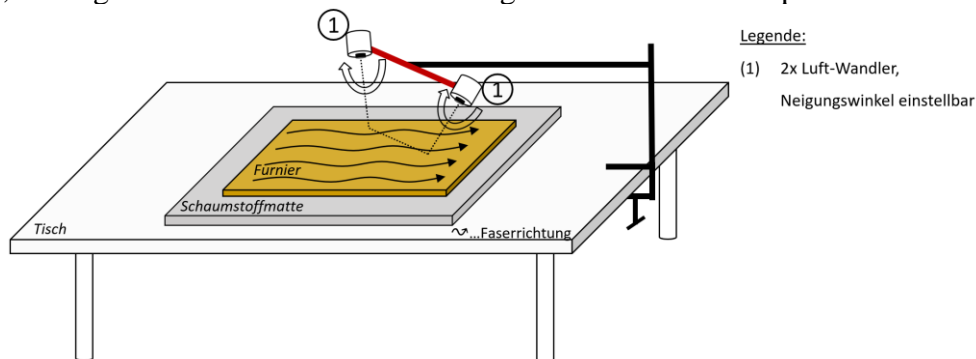


Abbildung 2 – Messsetup mit zwei Luftultraschallwandlern

Die Abbildung 2 zeigt ein Versuchssetup, in dem zwei Luftultraschallwandler verwendet wurden. Der abgebildete Versuchsstand zeigt den optimalen Fall einer zerstörungsfreien Untersuchung, bei dem das Koppelmedium Luft verwendet wird, wodurch es sich um eine kontaktlose und zerstörungsfreie Messung handelt.

¹ Das technische Datenblatt ist „https://www.piceramic.de/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/datasheets/P-876-Datenblatt.pdf“ zu entnehmen. Der verwendete Piezo-Wandler entspricht den technischen Daten von P876.SP1 (der verwendete Wandler ist eine Sonderanfertigung für das Fraunhofer IKTS Dresden). (Stand: 07.02.2023)

² Das technische Datenblatt ist „<https://www.farnell.com/datasheets/3771821.pdf>“ zu entnehmen. (Stand: 07.02.2023)

Nach der Betrachtung der Ergebnisse erster Versuche war deutlich, dass es nicht möglich ist, zwei Luft-Wandler für die Messungen zu verwenden. Die empfangenen Signale wiesen in Faserrichtung nur geringe Amplituden auf und bei Abweichungen von der Faserrichtung war es nicht möglich, ein Amplitudenausschlag in den Messergebnissen zu identifizieren, trotz größtmöglicher Verstärkungseinstellungen am Messsystem. Die Anregung wurde mit maximal 150 V durchgeführt und einer anschließenden Verstärkung von 40 dB des empfangenen Signals. Hinzu kommt, dass Impedanzunterschiede zwischen Luft und Furnier zu einer signifikanten Signalschwächung führen. Nachfolgend gab es weitere Anpassungen am Versuchsstand, mit dem Ziel größere Amplituden in den Messsignalen zu erhalten. Dabei wurde ein Luft-Ultraschallwandler durch einen Piezo-Wandler ausgetauscht. Der jeweilige Piezo-Wandler befindet sich in diesem Fall direkt auf dem Furnier, wodurch eine verbesserte Signaleinkopplung vorliegt.

Als Ergebnis der Versuchsreihen hat sich ergeben, dass zwei Piezo-Wandler auf dem Furnier appliziert werden müssen, damit in allen Winkeln in der Furnierebene, abweichend zur Faserrichtung, Messsignale detektiert werden können. Die Abbildung 3 zeigt den finalen Versuchsstand mit zwei Piezo-Wandlern, welche mithilfe von handelsüblichen Poster-Powerstrips auf dem Furnier appliziert wurden.

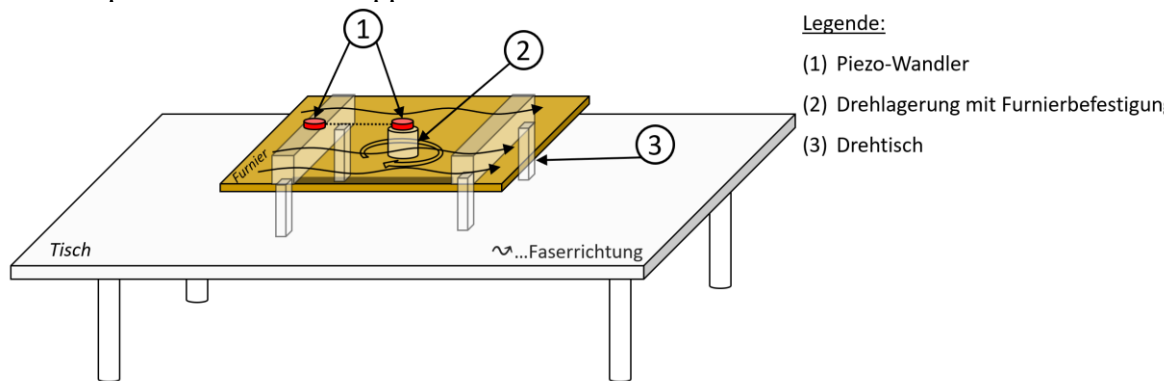


Abbildung 3 – Messsetup für die Durchführung der Hauptversuche

2. Messprinzip

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls, des Schubmoduls sowie der Faserrichtung im Furnier standen im Fokus der Untersuchungen. Für diese mechanischen Kennwerte galt es, ein geeignetes Messprinzip zu ermitteln und umzusetzen. Die zur Verfügung stehende Messtechnik wurde im vorherigen Abschnitt vorgestellt. Die Verwendung der Messtechnik sah wie folgt aus.

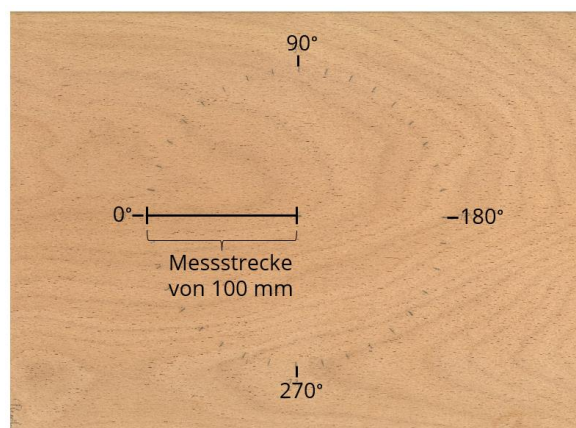


Abbildung 4 – Messkreis auf dem Furnier mit 360° Markierungen in der Furnierebene

Die Abbildung 4 zeigt einen 360°-Messkreis in der Furnierebene. Im Zentrum des Messkreises wurde ein Piezo-Wandler fixiert, der als Aktor verwendet wurde. In einem Abstand von 100 mm befand sich ein zweiter Piezo-Wandler. Der zweite Wandler wurde in 10° Schritten entlang des Messkreises appliziert, wodurch der gesamte 360°-Messkreis mit 36 Einzelmessung vermessen wurde. Die angeregte Ultraschallwelle legte bei jeder einzelnen Messung die Messstrecke von 100 mm zurück und wurde von dem zweiten Wandler detektiert. Für jede Messung wird ein Zeitsignal der sich ausbreitenden Welle aufgezeichnet. Vermessen wurde Furnier der Rotbuche mit einer Materialstärke von 0,5 mm. Als Anregungssignal wurde ein Raised-Cosine mit 3 Schwingungen und einer Mittenfrequenz von 200 kHz verwendet.

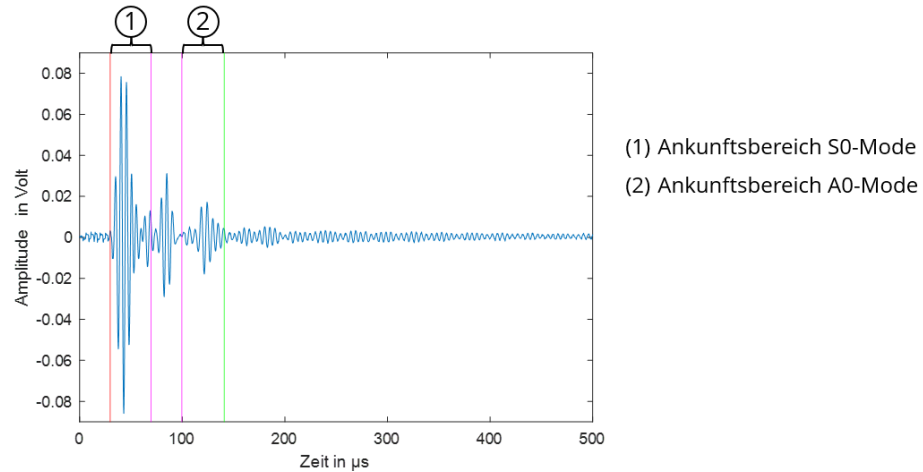


Abbildung 5 – Amplituden Diagramm eines angeregten Signals nach 100 mm Laufweg

Die Laufstrecke der Welle zwischen den beiden Piezo-Wandlern ist mit 100 mm bekannt und anhand des Amplitudenpeaks lässt sich die für die Laufstrecke benötigte Zeit ermitteln. Die Abbildung 5 zeigt ein detektiertes Signal, bei dem die Amplitude über der Zeit aufgetragen ist. Aus analytisch berechneten Dispersionsdiagrammen ist bekannt, zu welchen Zeitpunkten die verschiedenen Wellenmoden ihre Amplitudenpeaks haben, aufgrund unterschiedlicher Gruppengeschwindigkeiten. Die Amplitudenpeaks werden in zeitlichen Ankunftsgebieten gesucht, welche in der Abbildung 5 in den Bereichen 1 und 2 zu sehen sind. Die Bereiche 1 und 2 sind je nach Messwinkel in der Furnierebene angepasst, für einen konkreten Winkel waren die Bereiche konstant. Bei korrekter Modendetektion lässt sich mithilfe der Ultraschallgeschwindigkeit und der Rohdichte das E-Modul und Schubmodul näherungsweise berechnen. Grundlage dieser Berechnung sind die Formeln (1) und (2) [5] [6]. Die Rohdichte der einzelnen Furniere wurde anhand von Probekörpern separat gemessen und nachfolgend als Konstante festgelegt. Der Mittelwert der Rohdichte betrug 565 kg/m³ und zum Zeitpunkt der Rohdichtebestimmung herrschte ein Klima von 23°C und eine relative Luftfeuchte von 40 %.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1 - \mu}{1 - \mu - 2\mu^2}} \cong \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1}{2(1 + \mu)}} \cong \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

c_L ... Ausbreitungsgeschwindigkeit Longitudinalwelle
 c_T ... Ausbreitungsgeschwindigkeit Transversalwelle
 E ... Elastizitätsmodul

G ... Schubmodul
 ρ ... Rohdichte
 μ ... Poissonzahl

Die hier aufgeführten Formeln gelten näherungsweise für die Longitudinal- und Transversalwellengeschwindigkeit. Die tatsächlichen Geschwindigkeiten der beiden Wellenformen können je nach angeregter Frequenz abweichen und hängen mit der Anisotropie sowie der Materialstärke des Werkstoffes zusammen. Des Weiteren gelten die Formeln für einen unendlich ausgedehnten Festkörper. Die geringen geometrischen Abmessungen des Furniers widersprechen der Randbedingungen der Formeln. Es wird angegeben, dass zur Reduzierung des störenden Einflusses der Geometrie die Ausdehnung des Probenkörpers in jede Raumrichtung die zweifache Wellenlänge nicht unterschreiten darf [3]. Diese Bedingung lässt sich mit Furnier nicht erfüllen. In Voruntersuchungen war es möglich, durch Anregung mehrerer Frequenzen, ein experimentell bestimmtes Dispersionsdiagramm für eine Stahlplatte mit einer Stärke von 2,5 mm zu erstellen. Ausgehend davon war es möglich, auf Materialparameter zu schließen [7]. Der entwickelte Algorithmus konnte mit dem o. g. Messsetup mit 2 Luft-Wandlern nicht auf den Werkstoff Furnier übertragen werden. Es ergaben sich Probleme beim Detektieren der Amplitudenpeaks, wodurch das Dispersionsdiagramm nicht erstellt werden konnte. Daher fanden die Formeln dennoch Anwendung, um ein grundlegendes Konzept zur Charakterisierung von Furnier zu entwickeln, welches in folgenden Schritten verfeinert werden kann. Des Weiteren galt es herauszufinden, inwiefern die Formeln auf einen solch dünnen Werkstoff angewendet werden können. Eine Validierung der Messergebnisse mit einem etablierten Prüfsystem (Zugversuch) wurde durchgeführt.

3. Ergebnisse

Die Abbildung 6 zeigt die Ergebnisdarstellung eines gemessenen 360°-Messkreises. Das Diagramm auf der linken Seite zeigt die berechneten Elastizitätsmodule und auf der rechten Seite sind die Schubmodule aufgetragen.

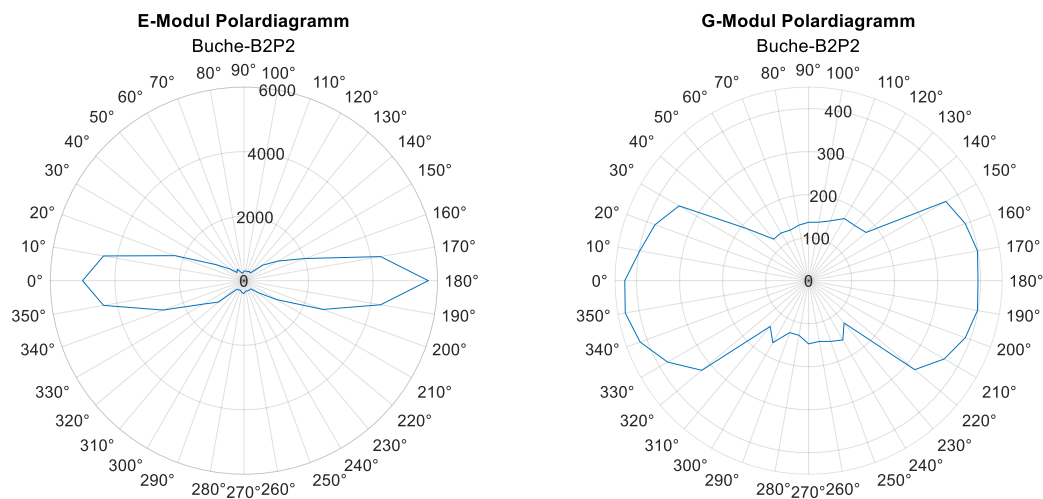


Abbildung 6 – E- und G-Modul Polardiagramme in MPa, 360°-Messkreis in der Furnierebene

Es ist deutlich zu sehen, dass, wie zu erwarten war, in Faserrichtung (0° und 180°) das Buchenfurnier ein wesentlich höheres E-Modul aufweist als senkrecht zur Faserrichtung. In Faserrichtung (180°) wird ein maximales E-Modul von 5713 MPa erreicht. Senkrecht zur Faserrichtung (90°) wird ein E-Modul von 294 MPa erreicht. Die E-Module in Faserrichtung liegen bei allen Messungen deutlich unterhalb der Literaturwerte von ca. 14000 MPa. Die Angaben aus der Literatur beziehen sich auf Vollholz und nicht explizite auf Furnier. Da zu den E-Modulen vergleichende Messungen mit Zugversuchen durchgeführt wurden, soll zur

Validierung der prinzipiellen Machbarkeit der Ultraschallcharakterisierung hier vorrangig auf das E-Modul eingegangen werden.

Die im Zugversuch, mittels Videoextensometer und Kraftmessung, bestimmten Elastizitätsmodule wurden den E-Modulen der Ultraschalluntersuchungen gegenübergestellt. Die Abbildung 7 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse für den Winkel von 40° in der Furnierebene. Laut Literatur bedingten Messungen mittels Ultraschalls 10 bis 20 % höhere E-Modul Werte [5]. Dieser Trend lässt sich in allen Diagrammen erkennen. Für die Validierung der Ultraschalluntersuchung ist dieser Trend positiv zu sehen. Die Messergebnisse der Ultraschallmessungen liegen in dem zu erwarteten Toleranzbereich. Zu beachten ist, dass es sich bei der Zugprüfung, im Vergleich zur Ultraschallprüfung, mit einer maximalen Prüfgeschwindigkeit von 0,4 mm/min um eine quasi statische Belastung handelt, wohingegen die Ausbreitung einer elastischen Welle im Ultraschallbereich durch dynamische, hochfrequente Teilchenschwingungen charakterisiert ist.

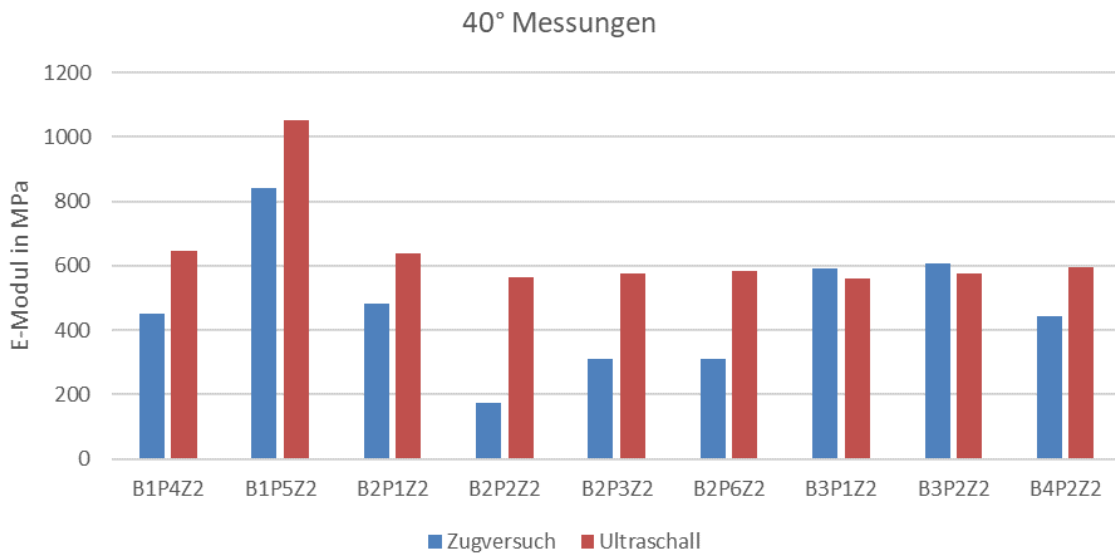


Abbildung 7 – Vergleich Ultraschallmessung und Zugversuch, 40°-Messwinkel in der Furnierebene

In Abbildung 8 sind die Messergebnisse der 0° Messung abgebildet. Abweichend vom bisherigen Trend sind die durch Ultraschall ermittelten E-Module deutlich geringer als die E-Module der Zugversuche. Der, für Rotbuche niedrig einzuordnende, Mittelwert der E-Module der Zugprüfungen beträgt 8637 MPa. Ausgehend von der Tatsache, dass die Furnierproben eine hohe Anzahl von strukturschwächenden Trockenrissen aufweisen, sind die ermittelten E-Module der Zugprüfungen als valide einzuschätzen. Der Mittelwert der E-Module der Ultraschalluntersuchungen beträgt 5428 MPa. Dieser Wert ist, trotz der Strukturschwächungen, als zu gering zu bewerten. Dies gilt insbesondere angesichts der Tatsache, dass bei den restlichen Messwinkeln (Bsp. 40° Messung) die Werte der Ultraschallmessung größer als die der Zugversuche ausfielen.

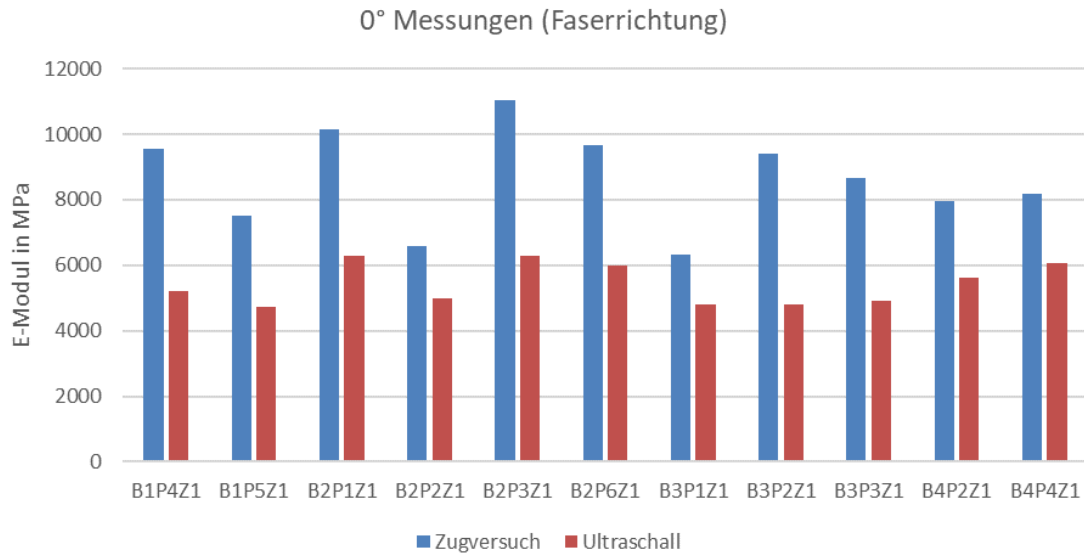


Abbildung 8 – Vergleich Ultraschallmessung und Zugversuch, 0°-Messwinkel in der Furnierebene

Zusammenfassung

Die Charakterisierung von Furnier mittels Ultraschalls ist erfolgreich gezeigt worden [8]. Einschränkungen bestehen darin, wie die elastischen Wellen in das Material eingekoppelt werden und in welchem Winkel zur Faserorientierung gemessen wird. Findet das Einkoppeln und Auskoppeln des Signals über die Luft statt, so wird eine große Verstärkung des Sendesignals benötigt, damit die Impedanzunterschiede (und die damit verbundene Signalschwächung) der verschiedenen Medien ausgeglichen werden. Hinzu kommt, dass bei Messungen, welche abweichend zur Faserrichtung erfolgen, die Ultraschallsignale zusätzlich, aufgrund des anatomischen Aufbaues des Holzes, stark geschwächt werden. Die Messung entlang einer Laufstrecke im Furnier ermöglicht es, einen Mittelwert für E-Modul und Schubmodul über die Laufstrecke zu berechnen. In der Ergebnisdarstellung werden die berechneten Materialparameter in Polardiagrammen dargestellt, die einen Messkreis in der Furnierebene von 360° widerspiegeln. Anhand von Polardiagrammen der maximalen Amplituden lässt sich darüber hinaus die Faserorientierung ablesen. Die Validierung der Ergebnisse der Ultraschallmessung mit der mechanischen Zugprüfung zeigte, dass die berechneten Materialparameter systematisch von den tatsächlichen E-Modulen und Schubmodulen abweichen, was jedoch in Übereinstimmung mit Erkenntnissen in der Literatur steht [5]. Grundsätzlich bietet die Verwendung von Ultraschallwellen ein vielversprechendes zerstörungsfreies Messverfahren für die Charakterisierung von Furnier.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des geförderten IGF-Vorhabens 21210 BR / 2 „Entwicklung von Verfahren zum lastpfadgerechten Design textilverstärkter Furnierlagenverbundwerkstoffe“.

Referenzen

- [1] K. J. Vössing, *Zerstörungsfreie Prüfung von Holzwerkstoffen mit luftgekoppeltem Ultraschall*, Berlin: Technischen Universität Berlin, 2022.
- [2] K. Tschöke, J. Schmidt, P. Baudach, J. Kaufmann, H. Cebulla und R. Scheffler, *Überwindung der natürlichen Inhomogenitäten von Schäl furnieren durch den Einsatz textiler Verstärkungsstrukturen und der Verwendung akustischer Messverfahren*, Tagungsband zur 17. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung Textiltechnik als Schlüsseltechnologie der Zukunft, 2022.
- [3] A. G. M. Hasenstab, *Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren*, Berlin: Fakultät VI der Technischen Universität Berlin, 2006.
- [4] „Fraunhofer IKTS,“ [Online]. Available: https://www.ikts.fraunhofer.de/de/industrieloesungen/zustandsueberwachung/technische_ausstattung.html. [Zugriff am 07 02 2023].
- [5] A. Wagenführ und F. Scholz, *Taschenbuch der Holztechnik*, München: Carl Hanser Verlag, 2018.
- [6] P. Niemz, *Physik des Holzes*, ETH Zürich: Institut für Baustoffe (IfB), 2004.
- [7] Q. Chen, K. Xu und D. Ta, *High-resolution Lamb waves dispersion curves estimation and elastic property inversion*, Elsevier, Ultrasonics Volume 115, 2021.
- [8] M. L. Kühmstedt, *Weiterentwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Charakterisierung von Furnier mit Hilfe von Ultraschallwellen*, Technische Universität Dresden: Fakultät Maschinenwesen, Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik, 2022.