



**IGF-Forschungsvorhaben**

**18241 BR**

**Tomographisches Abbildungssystem zur zerstörungsfreien Qualitätsbewertung von Nadelstammholz auf Basis von Ultraschall- und Radarverfahren (UltraLog)**



**Durchgeführt von**

**Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V.**

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFA)

Projektleiter: Dipl.-Ing. Martin Schickert

Bearbeiter: Frank Bonitz, Alexander Ulanov, Bernd Müller, Dr. Konrad Nitsche

Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD)

Projektleiter: Dipl.-Ing. (FH) Lars Blüthgen

Bearbeiter: Jens Wiedemann, Philipp Flade, Prof. Björn Weiß, Martin Schallhammer, Natalie Rangno, Ellen Faust, Stefan Feuersenger, Marcus Großmann

Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha, ThüringenForst AÖR (TF)

Projektleiter: Sergej Chmara

Bearbeiter: Nils Ruminski, Philipp-Emanuel Rehenning

**Laufzeit:**

**01.06.2014 bis 30.11.2016**

## **Ausgangssituation**

Der europäische Holzmarkt hat sich im Laufe der vergangenen 200 Jahre weitgehend zu einem Nadelholzmarkt entwickelt. Aufgrund der Schnellwüchsigkeit, Ertragsstärke sowie sehr guter physikalischer und chemischer Eigenschaften wird Nadelholz den vielen Bedürfnissen an den Rohstoff Holz gerecht. Die aus diesen Bedürfnissen resultierende Umgestaltung des Waldes zugunsten des Nadelholzes macht die Fichte heute zur mit Abstand häufigsten Baumart in Europa. Auch deutschlandweit gilt in diesem Zusammenhang die Fichte als „Brotbaum“ der Forstwirtschaft.

Die Ergebnisse der letzten Bundeswaldinventur (2012) zeigen jedoch, dass die Fichte sowohl an Vorrat als auch an Fläche verloren hat. Mit ca. 25 % der Waldfläche und ca. 33 % des Vorrats trug sie mit knapp 52 % überproportional zum Rohholzaufkommen bei. Die Bedeutung der Fichte bezüglich des potenziellen Gesamt-Rohholzaufkommens ist neben ihrer weiten Verbreitung auch auf ihren Zuwachs von durchschnittlich  $11,1 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{a}$  im Reinbestand zurückzuführen, der damit höher als der aller anderen Holzartengruppen ist. Angesichts der mit dem Klimawandel einhergehenden Risiken für die Fichte (Sturm, Trockenheit und Borkenkäfer) werden heute zunehmend Mischbestände mit einem geringem Nadelholzanteil gefördert. Die Menge des auf dem Markt verfügbaren Nadelholzes wird vermutlich geringfügig weiter zurückgehen, sodass die genaue Sortierung und wertoptimale Aushaltung und somit die Aufteilung an die unterschiedlichen Rohholzverbraucher immer wichtiger werden wird.

Die Stämme werden heute vor allem mechanisiert durch Harvester im Wald geerntet (Bild 1). Der Preis eines einzelnen Stammabschnittes ergibt sich aus seinem Volumen und seiner Qualität (Güte). Während das Volumen eines Baumes vorwiegend vom Alter und den Bedingungen seines Aufwachsens abhängt, bestimmen über seine Qualität vor allem Holz zerstörende Organismen und hier besonders Holzfäulepilze. Unter diesen ist die Rotfäule der am weitesten verbreitete Fäulepilz. Der Fäulebefall verursacht beim Verkauf von Stammholz aus dem Wald an ein Sägewerk einen Wertverlust von 30 % bis 50 %.

Die meisten Forstbetriebe und forstlichen Dienstleister wählen aus Rationalisierungsgründen das später im Werk ermittelte Werkseingangsmaß als Verkaufsvolumen für das gelieferte Holz. Zur Ermittlung dieses Werkseingangsmaßes sind heute allein in Deutschland 86 zertifizierte Rundholzvermessungsanlagen im Betrieb. Die Form jedes Stammabschnittes wird in diesen Anlagen geometrisch vermessen und daraus das Volumen berechnet. Die Bestimmung der Holzqualität erfolgt durch die sogenannte Qualitätsansprache getrennt und in der Regel unmittelbar vor der Vermessung. Da bisher noch kein Messverfahren für eine Bestimmung innerer Holzeigenschaften existiert, wird das angelieferte Holz visuell durch einen Menschen begutachtet und in eine definierte Güteklasse eingeordnet. Dabei rollen die Stammabschnitte wie im gezeigten Beispiel an dem Sortierer vorbei, der die Qualität visuell bestimmt und per Knopfdruck speichert. Volumen und Güte des Stammes erscheinen in einem Messprotokoll, das als Beleg für den Holzlieferanten und als Grundlage der Preisbildung dient. Einige Holzwerke stellen zusätzlich auch Fotos der Stirnflächen zur Verfügung. Weil die Holzqualität einen wesentlichen Einfluss auf den Holzpreis hat, infolge der subjektiven visuellen Klassifizierung aber Fehler entstehen, ist ihr Ergebnis ein oft herausgestellter Reibungspunkt zwischen Waldbesitzern und Holzindustrie.

## **Forschungsbedarf und Lösungsweg**

Im Forschungsvorhaben werden forstwirtschaftliche, messtechnische und holzphysikalisch/ holzbiologische Themen interdisziplinär bearbeitet, um ein tomographisches Messsystem zur automatisierten Qualitätsbewertung und Klassifikation der Holzqualität am Beispiel der Rotfäule zu entwickeln:

- Durchführung umfangreicher Messungen an Fichtenstammholz zur Klassifikation des Befalls von Rotfäule nach Holz-Güteklassen.
- Ermittlung und Spezifizierung der Anforderungen bezüglich Normen und Anforderungen möglicher Anwender sowie Katalogisierung relevanter Holzmerkmale.

- Untersuchung von Wellenausbreitung in Holz durch Ultraschall und Radar, Messtechnik und Abbildungsverfahren zum Aufbau eines tomographischen Demonstrators zur Abbildung von Holzfäulebereichen.
- Holzphysikalische und holzbiologische Untersuchungen zur Charakterisierung von Holzproben und zur Darstellung des holzphysikalischen und holzbiologischen Hintergrunds der tomographischen Anzeigen.

Die Zusammenführung der Erfahrungen und Untersuchungsmethoden aus Forstwirtschaft, Messtechnik und Holzphysik/Holzbiologie stellt einen neuartigen Forschungsansatz dar, um das komplexe Problem der zerstörungsfreien Qualitätsbewertung von Stammholz zu lösen.

## **Ergebnisse**

Im Forschungsprojekt wurde ein Verfahren zur zerstörungsfreien Qualitätsbewertung von Fichten-Stammholz mit Hilfe einer Kombination von tomographischen Ultraschall- und Radar-Abbildungssystemen entwickelt und an einem einkanaligen Funktionsmuster demonstriert. Durch Korrelation der Ultraschall- und Radar-Tomogramme kann Rotfäule im Holzquerschnitt detektiert und die Holzqualität nach Fäulegraden FG 0 bis FG 3 klassifiziert werden. Die Kombination der Ultraschall- und Radar-Tomographie mit holzbiologischen und holzphysikalischen Untersuchungen sowie Röntgen-tomographischen Messungen lieferte neue Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen dem auf forstwirtschaftlicher Basis definierten Fäulegrad, der Verteilung von Holzanomalien, dem mikroskopisch-holzbiologischen Erscheinungsbild sowie der Verteilung holzphysikalischer und holzbiologischer Eigenschaften über den Stammholzquerschnitt, die Korrelationen dieser Größen untereinander sowie Korrelationen dieser Größen mit dem Fäulegrad bestätigten. Das Projektergebnis ist für die Qualitätsbewertung von Stammholz geeignet und kann einen Beitrag zur effektiven Nutzung der Ressource Holz leisten.

Der Untersuchungsgegenstand wurde durch eine Reihe von Analysen aufbereitet und präzisiert. Im Einzelnen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Analyse und Klassifizierung der Regeln zur Gütesortierung von Rundholz sowie der normativen Anforderungen hinsichtlich der Bewertung von (Rot-) Fäule bei Rund- und Schnittholz in messbare Qualitätsklassen
- Katalog der relevanten Holzmerkmale in Bezug auf ihren Einfluss auf die Messungen
- Lastenheft für ein praxistaugliches Messsystem und ein Konzept zur Prozessintegration aufgrund der Analyse der kundenspezifischen Anforderungen
- Zurückführung der forstwirtschaftlichen Definition des Fäulegrades auf das mikroskopisch-holzbiologische Erscheinungsbild
- Modellrechnungen zur komplexen Preisbildung unterschiedlicher Holzqualitäten, die die wirtschaftliche Dringlichkeit einer objektiven Qualitätsbewertung verdeutlicht

## ***Ultraschall-, Radar- und Röntgen-Tomographie***

Beim Ultraschallverfahren ist die Ankopplung an das Holz essentiell. Dafür wurden Ankoppelnägel entwickelt und in ihrer Geometrie optimiert, die eine verlustarme und gleichmäßige Ankopplung ermöglichen. In einem praktisch einzusetzenden Messsystem können Wandler und Ankoppelnägel integriert aufgebaut werden. Eine berührungslose Messung mit Luftankopplung war exemplarisch möglich, setzt aber einen geschälten Stamm voraus, da das Transmissionssignal ansonsten stark von der Ausprägung und der Haftung der Rinde beeinflusst wird. Die Messungen wurden breitbandig mit einer Mittenfrequenz von 75 kHz durchgeführt. Die Systemlaufzeit war an einem Stufentestkörper zu 10  $\mu$ s bestimmt worden, wobei der effektive Schallaustritt nahe der Nagelspitze erfolgt. Die Anisotropie der Pulsgeschwindigkeit wurde im Splintholz zu maximal 8 % und im Kernholz zu maximal 26 % bestimmt. Für die Laufzeitmessungen wurde in bipolares Schwellenwertverfahren eingesetzt, da die Empfangssignale ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis aufwiesen. Bei Stammdurchmessern größer 300 mm sollte der Einsatz von Pulskompressionsverfahren (z. B. M-Sequenzen) erwogen werden.

Das Radarverfahren wurde erstmalig zur Tomographie von Stammholz eingesetzt. Durch Referenzmessungen der Permittivität von Holzproben und in zweidimensionalen Simulationen der Wellenausbreitung in Stammholz wurde festgestellt, dass die Transmission durch Stammholz mit mehr als 300 mm Durchmesser ein Messsystem mit einem sehr hohen Dynamikbereich von 60 dB bei 2 GHz erfordert. Im Demonstrator wurde dies durch ein UWB-Messsystem (*Ultra Wide Band*) sichergestellt, das auf Basis von Maximalfolgen (M-Sequenzen) arbeitet. Dafür verwendbare Algorithmen wurden zusätzlich separat erarbeitet und zu Testzwecken implementiert. Es wurden mehrere breitbandige Planar-Antennenpaare mit guter Anpassung an Holz simuliert, aufgebaut und vermessen. Die Ankopplung konnte damit wahlweise in Kontakt zum Holz oder mit einem Luftspalt realisiert werden, wobei letzteres den Vorteil der berührungslosen Messung hat. Bei weiteren Untersuchungen kann versucht werden, die Sensitivität durch polarimetrische Messungen weiter zu erhöhen. Die Simulationen zeigten einen starken Wellenanteil, der sich entlang der Grenzfläche Holz/Luft ausbreitet und sich am Empfangsort mit dem direkten Transmissionssignal überlagert. Mit Hilfe der Simulationen konnte ein Picking-Algorithmus für die Laufzeitmessung gefunden werden, der die transmittierte Welle auswertet und nur wenig von der umlaufenden Welle beeinflusst wird.

Der im zylindrischen Koordinatensystem aufgebaute Demonstrator-Versuchsstand erwies sich als gut geeignet für die Messdurchführung. Mit der Laser-Distanzmessung konnte die Stamm- und Messgeometrie schnell und genau aufgenommen werden. Die hier einkanalig realisierte Messanordnung kann direkt zu einer Multikanalanordnung erweitert werden.

Die Fächeranordnung (*Fan Beam*) der Tomographie war gut für die Vermessung der mehr oder weniger kreisrunden Stammgeometrien geeignet. Die schließlich gewählte Anordnung mit 36 Sendepositionen in 10-Grad-Schritten bei jeweils neun Empfängerpositionen im Bereich  $\pm 40^\circ$  gewährleistete eine gute Abdeckung des Stammquerschnitts und dabei vor allem des wichtigen Kernbereichs. Die Reziprozität der Messungen wurde beispielhaft nachgewiesen. Der SIRT-Tomographie-Algorithmus bewährte sich insgesamt (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*). Weitere Untersuchungen bezüglich einer stabilen Konvergenz zum globalen Optimum sowie des Einflusses der Holz-Anisotropie erscheinen aber angebracht.

Die Röntgen-Computertomographischen Aufnahmen (Röntgen-CT) der Stammabschnitte wurden mit einem kommerziellen Messsystem an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) in Freiburg durchgeführt. Ihre Auswertung lässt Möglichkeiten zur indirekten, qualitativen Rotfäuleerkennung aufgrund der abgebildeten Feuchteverteilung erkennen. Vor allem die Fäulegrade FG 2 und 3 unterscheiden sich deutlich von ungeschädigten Stämmen. Die Bilder dienen außerdem als Dichtereferenz für die Interpretation der Ultraschall- und Radar-Tomogramme.

### ***Vergleichsmessungen, Korrelation und Klassifikation***

Das Probenortiment umfasste eine Vielzahl von Standort- und Wuchsbedingungen und alle Fäulegrade von FG 0 bis FG 3. Durch die enge logistische Abstimmung konnten alle Messungen innerhalb eines kurzen Zeitfensters durchgeführt werden. So lag die Zeitspanne vom Holzeinschlag bis zur Durchführung der letzten Messung bei der Messkampagne 3 bei 14 Tagen. Dadurch konnte eine Veränderung der Holzigenschaften insbesondere durch Austrocknung weitgehend vermieden werden. Durch die Dokumentation aller Verarbeitungsschritte in einer zentralen Tabelle war die Nachvollziehbarkeit der Messungen für jeden Stammabschnitt gewährleistet.

Insgesamt wurden 110 Stammabschnitte im Wald entnommen. Neben Vor- und Begleituntersuchungen wurden in drei Messkampagnen insgesamt 33 Stammabschnitte mit jeweils 11 Messgrößen aller Verfahren quantitativ erfasst. Dadurch standen für die Auswertung durch Korrelation und Klassifikation 291 Bilder (Fotos, Tomogramme) und 1060 Datensätze mit den Rasterwerten je einer Messgröße in einem Stammquerschnitt zur Verfügung.

Auf Grundlage der Vielzahl verschiedener Untersuchungen konnte ein umfangreicher, in der Art für Fichtenstammholz bisher nicht vorhandener Datenpool an holzphysikalischen, holzbiologischen sowie Röntgen-, Ultraschall- und Radar-tomographischen Messwerten generiert werden. Vermutete korrelative Zusammenhänge zwischen den untersuchten holzphysikalischen Größen untereinander

sowie Korrelationen dieser Größen mit dem Fäulegrad konnten bestätigt werden, fallen jedoch zum Teil relativ schwach aus, was im Wesentlichen der dem Holz als natürlichen Rohstoff immanenten Eigenschaftsstreuung geschuldet ist. Hier zeigt sich breite Streuung der Holzeigenschaften, die durch die variierenden Standort- und Wuchsbedingungen sowie dadurch bedingt waren, dass in einem Stammabschnitt auch mehrere Fäulegrade auftraten. Bei separater Betrachtung der erfassten Größen erlauben die Messwerte einzelner Prüfkörper daher in der Regel auch keine verlässlichen Rückschlüsse auf den Fäulegrad. Erste Korrelationsansätze legen jedoch nahe, dass dies unter Einbeziehung mehrerer Größen zumindest auf Stammebene möglich sein sollte und davon auszugehen ist, dass weiterführende Untersuchungen des bisher noch nicht erschöpfend ausgewerteten Datenpools unter Einbeziehung komplexerer Korrelationsansätze zusätzlichen Erkenntnisgewinn sowie verbesserte Möglichkeiten zur Klassifikation liefern werden.

Zur Klassifizierung der Holzqualität aus Ultraschall- und Radarmessungen wurden integrale, kombinierte und modellbasierte Klassifikatoren entwickelt und getestet. Die umfangreichen holzbiologischen und holzphysikalischen Referenzmessungen sowie die Ergebnisse der Röntgen-Computertomographie erwiesen sich dabei für die Interpretation, Korrelation und Klassifikation der Ultraschall- und Radar-Tomogramme als ausgesprochen wertvoll. Während mit den integralen und kombinierten Klassifikatoren auch bei Verwendung nur eines Verfahrens bereits einfache Abgrenzungen der Holzqualität möglich werden, erlaubt der modellbasierte Ansatz einer zweidimensionalen Gaußverteilung eine quantifizierbare Klassifikation mit Betrachtung der Erkennungs- und Falscherkennungsraten. So konnte zum Beispiel der Fäulegrad 3 zu 78 % korrekt identifiziert werden bei einer Falscherkennungsrate von nur 3 %. Die geplante zerstörungsfreie Qualitätsbewertung von Fichten-Stammholz mit Hilfe einer Kombination von tomographischen Ultraschall- und Radar-Abbildungssystemen kann damit realisiert werden. Weitere Verbesserungen sind bei Einbeziehung komplexerer Klassifikatoren zu erwarten.

### ***Konzept für ein marktfähiges Multikanalsystem***

Als Grundlage für die spätere praktische Anwendung wurde ein automatisiertes Multikanal-Abbildungssystem konzipiert, das sowohl als stationäre Lösung für die Rohholzsortierung im Werk eingesetzt werden kann, als auch für den mobilen Harvester-Einsatz im Wald geeignet ist. Durch Auswertung mehrerer Querschnittsmessungen kann die Lage von Trennschnitten im Stammholz optimiert werden. Aufgrund der technischen Parameter wie Kompaktheit und kurzer Messdauer ist zu erwarten, dass die eruierten Kundenanforderungen an ein derartiges Messsystem erfüllt werden können.

### **Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen**

Die im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse zu Struktur-Signal-Beziehungen zur Detektion von Rotfäule sowie zur Sensorsignalgewinnung und bildgebenden Auswertung garantieren den das Know-how erwerbenden Unternehmen effiziente Qualitätssicherungsmethoden der Holzsortierung und des Holzzuschnitts sowie effiziente Methoden der Weiterverarbeitung (Sägewerke, Holzbau, Holz verarbeitende Industrie, Holzwerkstoffindustrie).

Die steigende Nachfrage nach Holz kann in Zukunft die generelle Nachhaltigkeit von Holz als wettbewerbsfähigen erneuerbaren Rohstoff für unsere Gesellschaft bedrohen. Auch in diesem Zusammenhang erscheint die Aktivierung bisher ungenutzten Wertschöpfungspotenzials in der Sortierung als eine große Herausforderung. Die Entwicklung einer Gütemessung kann so auch als Chance für neue Vorgehensweisen in der Holzaushaltung angesehen werden. Die Bereitstellung von Grundlagen für moderne Technologien der Gütebestimmung, wie sie im vorliegenden Projekt erarbeitet wurde, kann demnach auch nach einer neuen Bewertung für eine mögliche Verlagerung von Entscheidungen über den Einzelbaum vom Wald in das Holzwerk verlangen. Oftmals werden bei der hoch mechanisierten Holzernte beim Auftreten von Rotfäuleflecken IS-Abschnitte z. B. in einer Länge von 2,5 m abgetrennt, obwohl die Rotfäule nur einen Meter oder weniger in das Innere des Stammes hinein reicht. Aufgrund der erzielten Ergebnisse steht in Aussicht, dass das Gesundschneiden im Wald unterbleiben

kann und im Werk nur der von der Fäulnis befallene Teil abgetrennt bzw. der Fäulnisgrad für die weiteren Verarbeitungsprozesse erfasst wird, so dass sich hieraus eine deutliche Steigerung der Wertschöpfung für die Holz verarbeitende Industrie ergeben kann. Eine auf die stationäre Lösung aufbauende Harvestervariante, die dies sogar bereits im Wald erledigt und so einen noch höheren Mehrwert erzeugt, erscheint machbar.

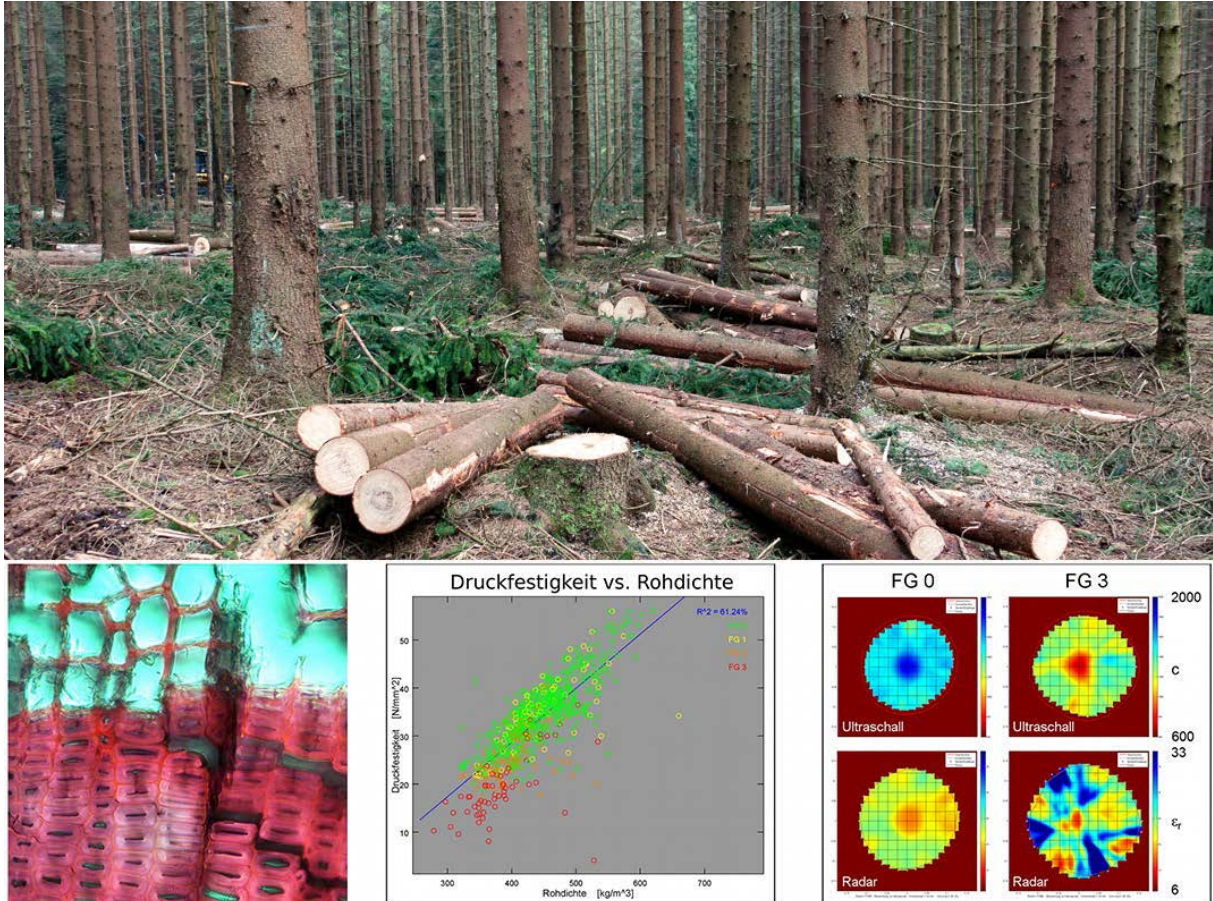


Abbildung: v.l.n.r. mikroskopische Aufnahme einer stark rotfaulen Holzprobe, Korrelation von Druckfestigkeit und Rohdichte, beispielhafte Tomogramme für die Fäulegrade 0 und 3

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben 18241 BR der Forschungsvereinigung Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V. (TIHD) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei:

**Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V.**  
**Zellescher Weg 24**  
**01217 Dresden**

## Veröffentlichungen

Schickert, M.; Bonitz, F.: A transmission-tomographic imaging setup combining elastic and electromagnetic wave functionality. In: *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, Munich, 13–17 June 2016, pp. 1–8

Bonitz, F.; Kuhne, M.; Kühne, H.; Blüthgen, L.: Long term monitoring of roof constructions with spatial time domain reflectometry (STDR). In: *Proc. 11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances – ISEMA 2016*, Florence, May 23–27, 2016, pp. 383–389

Schickert, M.; Bonitz, F.; Ulanov, A.; Müller, B.; Ruminski, N.; Rehenning, Ph.-E.; Blüthgen, L.; Flade, Ph.; Wiedemann, J.: Tomographische Abbildung mit Ultraschall, Radar und Röntgen zur Detektion von Fäule in Holzstämmen. In: *DGZfP Jahrestagung 2017*, Koblenz, 22.–24.05.2017 (eingereicht)

Schallhammer, M.: Entwicklung eines Algorithmus zum automatischen Abgleich von holzphysikalischen bzw. holzbiologischen Kennwerten mit tomographischen Bilddaten. *Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Dresden*, Studienrichtung Holz- und Holzwerkstofftechnik, Bachelorarbeit, 2016

Bonitz, F.; Rehenning, Ph.-E.: Das Kooperationsforschungsprojekt UltraLog: Erkennung der Rotfäule im Fichtenstammholz mit Hilfe von Ultraschall- und Radarverfahren. *13. Fachkolloquium des Forstlichen Forschungs- und Kompetenzzentrums Gotha*, Gotha, 16.09.2015

Weiß, B.: Mikroskopische Untersuchungen an durch den Fichtenwurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*) geschädigtem Fichtenholz. *13. Fachkolloquium des Forstlichen Forschungs- und Kompetenzzentrums Gotha*, Gotha, 16.09.2015