

Materialcharakterisierung mit Ultraschall- und Radar-Tomographie – Fäuleerkennung in Holzstämmen

Martin SCHICKERT, Frank BONITZ, Alexander ULANOV, Bernd MÜLLER
Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar

Kontakt E-Mail: martin.schickert@mfpa.de

Kurzfassung. Zur Detektion und Klassifikation von Rotfäule in Fichtenstämmen wurde ein kombiniertes tomographisches Messsystem für Ultraschall- und Radarwellen entwickelt und aufgebaut, mit dem die elastischen und elektromagnetischen Materialeigenschaften von Holzstämmen abgebildet werden können. Das Messsystem unterstützt tomographische Transmissionsmessungen in einer Fächerstrahl-Anordnung, die anschließend zu zweidimensionalen Ultraschall- und Radar-Tomogrammen der Holzstämmen rekonstruiert werden.

Mit dem Messsystem wurden umfangreiche vergleichende Messungen durchgeführt. Für die anschließenden Korrelationsuntersuchungen standen Messergebnisse von 11 Messgrößen an identischen Querschnittsebenen in 33 Stammabschnitten zur Verfügung. Röntgentomographische Messungen dienten als Referenz für die Dichteverteilung im Material. Außerdem wurden die Ergebnisse mit holzphysikalischen und holzbiologischen Untersuchungen z. B. der Materialfeuchte, Druckfestigkeit und Dichte abgeglichen.

Die Resultate werden bezüglich der Detektion von Fäule in den Holzstämmen und ihrer Klassifikation in Fäulegraden diskutiert. Darauf aufbauend wird ein automatisiertes Messsystem zur Bestimmung der Holzfäule vorgeschlagen, mit dem die wirtschaftliche Verwertung der Holzstämmen optimiert werden kann.

Einführung

Zerstörungsfreie Verfahren zur Untersuchung von Holz werden seit Jahren erforscht. Während die meisten Methoden Informationen über lokale oder integrale Holzeigenschaften liefern, können tomographische Methoden [1] orts aufgelöste Bilder bestimmter Eigenschaften von Stammholzabschnitten generieren. Ein weit entwickeltes Beispiel ist das kommerzielle Röntgen-Computertomographiesystem (Röntgen-CT) für die Abbildung kompletter Holzstämmen [2]. Dieses Abbildungssystem kann dreidimensionale Dichtebilder des Stammes generieren, die zur Optimierung des Sägeprozesses verwendet werden können.

Um Schädigungen im Stammholz zu detektieren, sind weitere Materialeigenschaften von Interesse, da bestimmte Abbauprozesse im Holz nicht mit Dichteveränderungen einhergehen. Vor allem die Untersuchung auf Holzfäule, die auf Pilzbefall zurückgeht, verlangt eine Sensitivität für andere Holzparameter und damit die Verwendung anderer Wellenarten.

In einer Reihe von Untersuchungen wurden elastische Ultraschallwellen eingesetzt. Tomographische Messungen und Rekonstruktionen in Transmission wurden von Sambuelli *et al.* [3] durchgeführt. Brancheriau *et al.* zeigten einen automatisierten Laboraufbau für Rückprojektions-Tomographie (*Backprojection*) [4]. Turpening *et al.* rekonstruierten die



longitudinale Pulsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung gekrümmter Ausbreitungswege [5]. Wang *et al.* implementierten den tomographischen ART-Algorithmus (*Algebraic Reconstruction Technique*) und wandten diese Technik auf mehrere Ebenen in Holzstämmen an, woraus sie ein dreidimensionales Bild berechneten [6].

Elektromagnetische Mikrowellen wurden bisher wesentlich seltener eingesetzt. Sambuelli *et al.* führten Radarmessungen in Reflexionsanordnung durch [3]. Ihre Resultate zeigten genauso wie die von Nicolotti *et al.* [7] die Möglichkeit, gesundes und geschädigtes Holz durch Radarmessungen qualitativ unterscheiden zu können. Butnor *et al.* heben die Anwendbarkeit von Radarmessungen zur Qualitätsbestimmung von Holz hervor, betonen aber auch den Einfluss von Querempfindlichkeiten, die durch Kalibrierung beseitigt werden müssen [8].

In der vorliegenden Arbeit werden Bildinformationen aus Transmissions-Tomogrammen von elastischen Ultraschallwellen (Ultraschall) und von elektromagnetischen Mikrowellen (Radar) kombiniert. Ziel ist die Qualitätsbewertung von Fichten-Stammholz in Bezug auf die Schädigung mit Rotfäule. Röntgen-Tomogramme sowie holzphysikalische und holzbiologische Ergebnisse dienen als Referenzmessungen.

Holzfäule und Fäulegrad

Die Fichte (*Picea abies*) ist heute die mit Abstand häufigste Baumart in Deutschland und in Europa. 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 und dabei vor allem *Heterobasidion annosum* der am weitesten verbreitete Fäulepilz. Die Bäume werden häufig über die Wurzel infiziert. Bei Fichten wächst das Myzel vor allem in vertikaler Richtung von unten nach oben, während seine radiale Ausbreitung im Kernholz von innen nach außen relativ langsam verläuft. Das Splintholz wird erst sehr spät angegriffen. Der Fäulebefall verursacht beim Verkauf von Stammholz aus dem Wald an ein Sägewerk einen Wertverlust von 30 % bis 50 %. Eine zerstörungsfreie Detektion und Klassifizierung der Holzfäule noch im Stammholz könnte daher zu einer Optimierung der Verarbeitung und damit Erhöhung des wirtschaftlichen Ertrages genutzt werden.

Der Fäulegrad eines Stammes wird anhand des Schnittbildes nach forstlichen Kriterien bestimmt. Dazu wird die Querschnittsfläche visuell makroskopisch nach einem Schema für Fäulegrade bewertet, das sich an die forstlichen Sortierregeln der RVR (Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland) anlehnt. Das Ausmaß der Holzschädigung wird dabei durch den Fäulegrad beschrieben, der von FG 0 (gesund) über FG 1 (verfärbt) und FG 2 (mechanische Beeinträchtigung) bis FG 3 (verfault) reicht. Bild 1 zeigt typische Ausprägungen der unterschiedlichen Fäulegrade.



Bild 1. Schnittflächen von Fichtenstämmen mit Fäulegrad 0, 1, 2 und 3 (von links nach rechts)

Messanordnung

Die Kombination des Ultraschall- und des Radarverfahrens zur Detektion und Klassifikation von Holzfäule erscheint vielversprechend, da beide Verfahren unterschiedliche Sensitivitäten aufweisen, die sich in ihrer Kombination ergänzen können. Ultraschallwellen sind elastische Wellen, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit vor allem von den elastischen Holzeigenschaften beeinflusst wird und damit auf die Holzfestigkeit reagiert. Das Radarverfahren arbeitet mit elektromagnetischen Wellen, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit vor allem von der Permittivität und damit, aufgrund der hohen relativen Permittivität von Wasser, der Holzfeuchte abhängt.

Die Messanordnungen und Messverfahren für das Ultraschall- und das Radarverfahren wurden in Vorversuchen erarbeitet und optimiert. Zur Ankopplung der Ultraschallwellen an das Stammholz wurden Ankoppelnägel mit verschiedenen Geometrien untersucht (Bild 2, links). Kriterien für die Auswahl waren eine gute Energieübertragung, geringe Amplitudenschwankungen, eine geringe Streuung der Laufzeiten und eine gute Handhabung. Während die Spitzen der Ankoppelnägel mit einem speziell entwickelten Werkzeug bis zu einer definierten Tiefe in das Holz eingeschlagen wurden, wurden die Prüfköpfe auf der planen Seite mit Öl angekoppelt. Die Systemlaufzeit des Messsystems durch alle Komponenten inklusive der Ankoppelnägel muss von den gemessenen Laufzeiten abgezogen werden, um die Laufzeiten der Ultraschallwellen im Holz zu erhalten. Die Systemlaufzeit konnte nicht berechnet werden, da der effektive Schallaustrittspunkt der Ankoppelnägel nicht bekannt war. Sie wurde daher an einem Stufentestkörper ermittelt (Bild 2, rechts). Aus den Laufzeitmessungen bei variiert Position und Länge der radialen Schallwege konnte die Systemlaufzeit dann mit Hilfe einer Ausgleichsgeraden bestimmt werden. Damit konnte der effektive Schallaustrittspunkt der Ankoppelnägel ermittelt werden; er lag noch im geraden Teil nahe ihrer Spitze.



Bild 2. Ankoppelnägel für die Ultraschallwellen (links) und Stufentestkörper zur Bestimmung der Ultraschall-Systemlaufzeit (rechts)

Die Patch-Antennen für das Radarverfahren wurden selbst entwickelt; dafür wurden mehrere Antennenpaare simuliert, aufgebaut und mit einem Netzwerkanalysator vermessen. Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen durch den Holzstamm wurde vorab simuliert. Dabei wurde neben der Ausbreitung durch das Stammvolumen ein zweiter Ausbreitungspfad entlang der Stammoberfläche beobachtet [9]. Für die Laufzeitbestimmung des direkten Signalpfades aus beiden überlagerten Signalen wurde ein spezieller Picking-Algorithmus entwickelt.

Für die tomographischen Messungen beider Verfahren wurde ein Vertikalprüfstand (Bild 3, links) mit zentraler Aufnahme der Stammabschnitte und zwei Schwenkarmen (Auslegern) für die Sende- und Empfangssensoren konzipiert [9].

Zur Messung werden die Stämme an ihren Stirnseiten mit Adaptern versehen und in die Messmechanik eingebracht. Die Antennen sind radial verschiebbar an den Auslegern befestigt. Die Geometrieerfassung der Positionen von Sende- und Empfangssensor erfolgt in einem zylindrischen ρ - φ - z -Koordinatensystem durch eine mechanische Höheneinstellung, eine mechanische Winkeleinstellung mit einer Skala in 2° -Schritten sowie eine laseroptische, radiale Abstandsmessung. Die Datenaufnahme läuft als manueller Scanvorgang mit je einem Sende- und Empfangssensor ab.

Im Messablauf werden zunächst die Radarmessungen mit einem UWB-M-Sequenz-Messsystem (*Ultra Wide Band*) der Fa. Meodat, Ilmenau, und selbstentwickelten Antennen im Frequenzbereich 1,2 bis 2,5 GHz aufgenommen. Die Ankopplung erfolgt entweder über einen variablen Luftspalt, wobei sich alle Antennenpositionen auf einen Kreis befinden, oder im Kontakt mit der Stammoberfläche bei variabler Geometrie der Antennenpositionen (Bild 3, oben rechts).

Die Ultraschallmessungen werden an denselben Messpunkten wie bei den Radarmessungen durchgeführt. Die Ultraschallwandler mit 75 kHz Nennfrequenz werden dabei über die Ankoppelnägel an das Holz angekoppelt (Bild 3, unten rechts); als Messsystem wird ein Niederfrequenz-Ultraschallgerät der Fa. Ing.-Büro Dr. Hillger, Braunschweig, eingesetzt. Die Ultraschallmessungen finden nach der Geometrievermessung außerhalb des Versuchstands statt, so dass zwei Holzstämme mit beiden Verfahren parallel gemessen werden können.

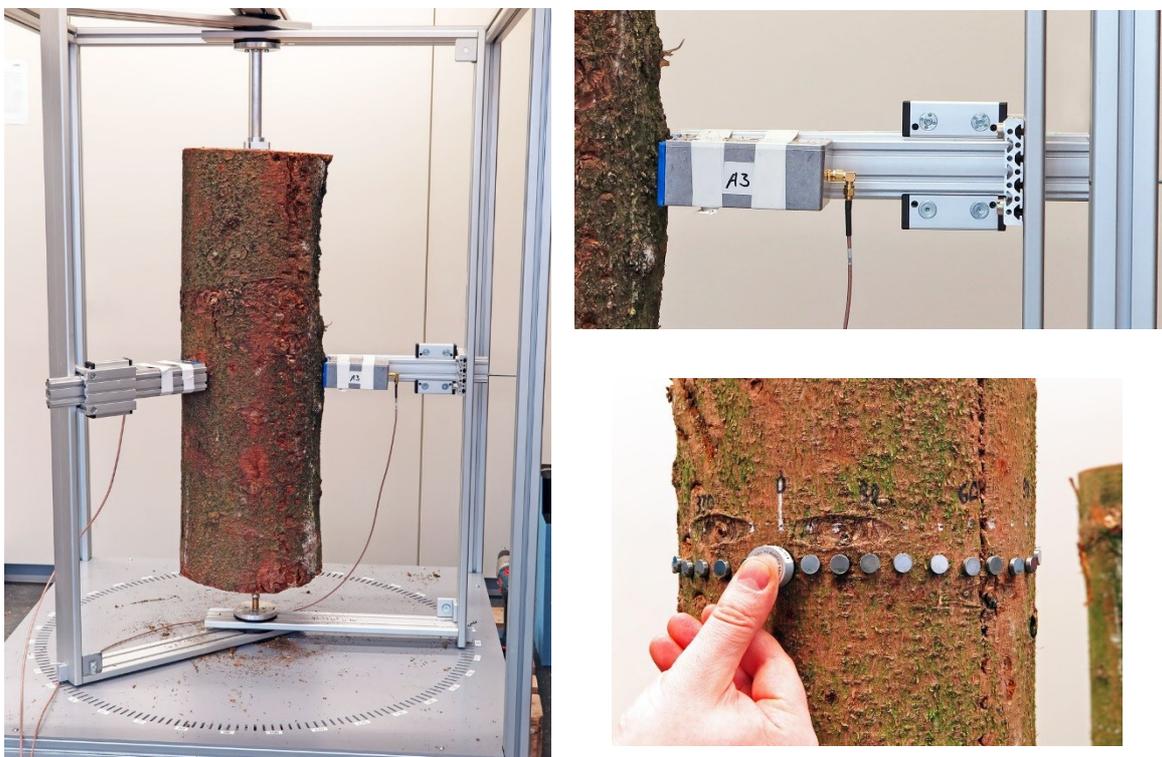


Bild 3. Versuchsstand für die Ultraschall- und Radar-Tomographie (links), Ausleger mit Radarantenne (oben rechts) und Ultraschallwandler mit Ankoppelnägeln (unten rechts)

Die tomographischen Messungen mit dem Ultraschall- und dem Radarverfahren wurden in Transmission in einer Fächerstrahlenanordnung (*Fan Beam Tomography*) durchgeführt. Die Ultraschall- und Radarmessungen wurden jeweils nach dem folgendem Schema

durchgeführt: Für jede Sendeposition wurden 9 Empfängerpositionen in 10°-Schritten von -40° bis +40° aufgezeichnet (Bild 4, links). Anschließend wurde die gesamte Anordnung jeweils in 10°-Schritten gedreht und die nächsten Fächerstrahlanordnungen gemessen, bis der gesamte Querschnitt erfasst wurde. Unter Ausnutzung der Reziprozität der Wellenausbreitung, die anhand von Testmessungen auch nachgewiesen wurde, ergaben sich je Stammquerschnitt 162 Transmissionsmessungen, für die je Verfahren ca. 60 Minuten benötigt wurden. Die Gesamtheit der Messungen führte zu der in Bild 4, rechts, dargestellten Abdeckung des Stammquerschnitts mit Signalfaden. Der innere Kernbereich der Holzstämmen, in dem der Fäulebefall bevorzugt erwartet wird, wird fein aufgelöst. In Richtung der Randbereiche der Stämme ist mit einer verringerten Auflösung zu rechnen.

Zur Auswertung der Ultraschall- und Radarmessungen wurden selbstentwickelte Verfahren zur Laufzeitbestimmung (*Picking*) eingesetzt. Die tomographischen Rekonstruktionen wurden mit dem kommerziellen Programm ReflexW im 2 mm x 2 mm Raster berechnet. Das Programm verwendet den SIRT-Algorithmus (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*) zur Bildberechnung. Die Anisotropie wurde bei beiden Verfahren in der Rekonstruktion vernachlässigt.

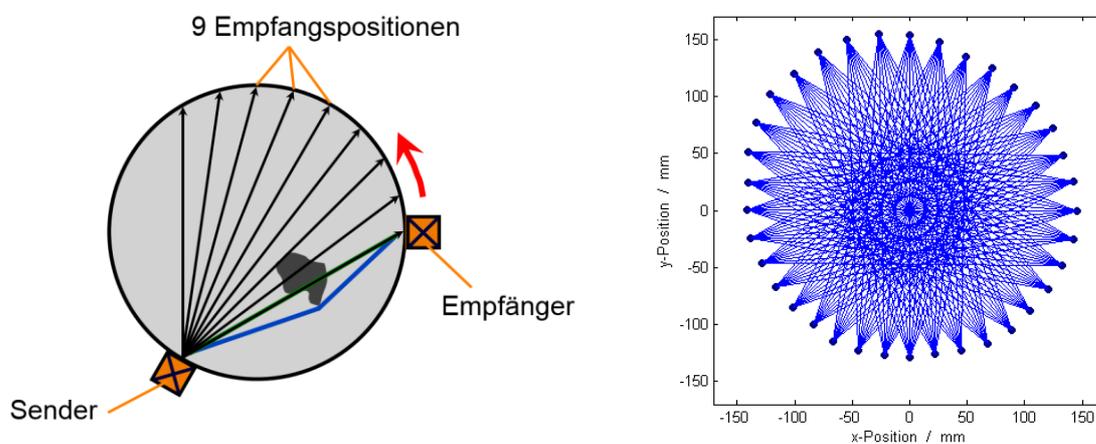


Bild 4. Prinzipielle Messanordnung der Transmissionsmessungen in Fächerstrahlanordnung (links) und Abdeckung des Stammquerschnitts mit Signalfaden (rechts)

Vergleichsmessungen

Mit diesen Verfahren wurden umfangreiche Untersuchungen an Fichtenholzstämmen mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen durchgeführt. Als Probekörper wurden Stammabschnitte mit 80 cm Länge und 20 bis 30 cm Durchmesser verwendet. Im Rahmen der Hauptuntersuchungen wurden insgesamt 33 Stammabschnitte in drei Messkampagnen mit allen Verfahren untersucht. Dafür wurden jeweils 11 Messgrößen auf einem Messraster in einer gemeinsamen Querschnittsfläche bestimmt. Neben den Abbildungsverfahren Ultraschall-Tomographie (Pulsgeschwindigkeit), Radar-Tomographie (relative Permittivität) und Röntgen-CT (Grauwert, Splint-Kern-Unterscheidung) waren dies holzphysikalische Größen (Rohdichte, Holzfeuchte, Druckfestigkeit, Nagelfestigkeit, Jahrringbreite) und holzbiologische Größen (Fäulegrad, Splint-Kern-Unterscheidung).

Die Vergleichsmessungen mit Hilfe der Röntgen-Computertomographie (Röntgen-CT) wurden mit dem CT LOG der Fa. Microtec durch die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) in Freiburg durchgeführt [10]. Die resultierende Pixelauflösung im Stammquerschnitt betrug 1,107 mm x 1,107 mm.

Die holzphysikalischen und holzbiologischen Größen wurden zerstörend an Proben mit einem Querschnitt von 20 mm x 20 mm gemessen, die aus einem Probenraster von

24 mm × 24 mm (Probenquerschnitt plus Verschnitt) auf dem Stammquerschnitt entnommen wurden. Für den Vergleich mit den Ergebnissen an diesen Proben wurden die Bildwerte der Tomogramme der drei zerstörungsfreien Abbildungsverfahren jeweils über die Probenquerschnitte (ganz oder in Teilbereichen) gemittelt.

In Bild 5 sind beispielhafte Computer-Tomographien der Verfahren Ultraschall, Radar und Röntgen abgebildet; sie werden in vereinfachter Form auch in Bild 6 dargestellt. In die Tomogramme ist das Probenraster eingezeichnet, in die Ultraschall- und Radar-Tomogramme sind zusätzlich die Stammkontur und die Messpositionen mit aufgenommen. Der Abbildungsbereich der Ultraschall-Tomogramme ist kleiner als der Stammquerschnitt, da sich die Sende- und Empfangspunkte nahe den Spitzen der Ankoppelnägel befinden. Die Farbskala umfasst in allen Bildern einen Bereich der Pulsgeschwindigkeit von 600 bis 2000 m/s. Der Abbildungsbereich der Radar-Tomogramme erstreckt sich bei direkter Ankoppelung an den Stamm bis zur Stammoberfläche (Bild 7) und bei Ankopplung über einen Luftspalt über die Stammoberfläche hinaus (Bild 5, Bild 6). Die Farbskala zeigt einen Bereich der relativen Permittivität von 6 bis 33.

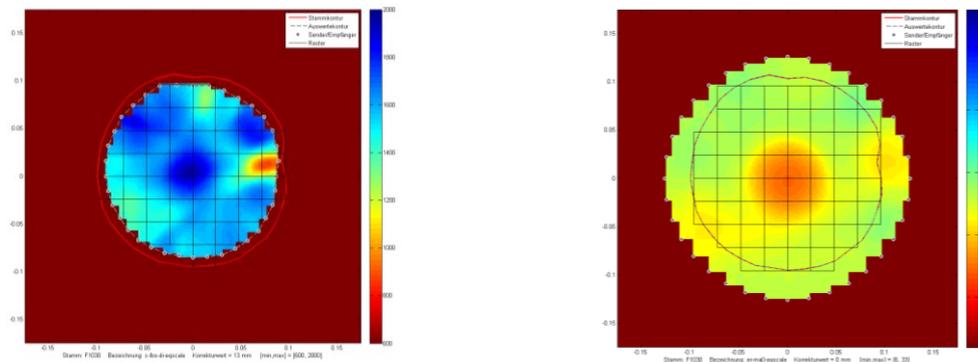


Bild 5. Beispiel-Tomogramme der Verfahren Ultraschall (links) und Radar (rechts)

Bild 6 zeigt für einen repräsentativen Fäulegrad 0 die vier Verfahren Ultraschall, Radar, Röntgen-CT und visuelle Darstellung. Aus der visuellen Darstellung und dem Röntgen-CT ist die Splint-Kern-Verteilung deutlich erkennbar. Dies kann auch durch die Radar- und Ultraschall-Tomogramme abgebildet werden. Auf der Drei-Uhr-Position wurde eine Einkerbung zur Markierung erzeugt. An dieser Position ist der Stammabschnitt stärker ausgetrocknet. Im Röntgen- und im Ultraschall-Tomogramm wird dies deutlich erkennbar, ebenso sind im Ultraschall-Tomogramm auf der 12-Uhr-Position und zwischen sieben und neun Uhr deutlich verminderte Pulsgeschwindigkeiten erkennbar. Beim Abgleich mit der visuellen Darstellung wird deutlich, dass in diesen Bereichen die Rinde gefehlt hat, was wiederum zu einer Austrocknung führte. Dem Radar-Tomogramm liegt eine berührungslose Messung zugrunde. Die rote Linie zeigt die Stammkontur. In den Außenbereichen verschmiert das Tomogramm aufgrund der geringeren Auflösung. Die ausgetrockneten Bereiche werden auch hier deutlich, wobei die 12-Uhr-Position nur einen leichten Gradienten zeigt.

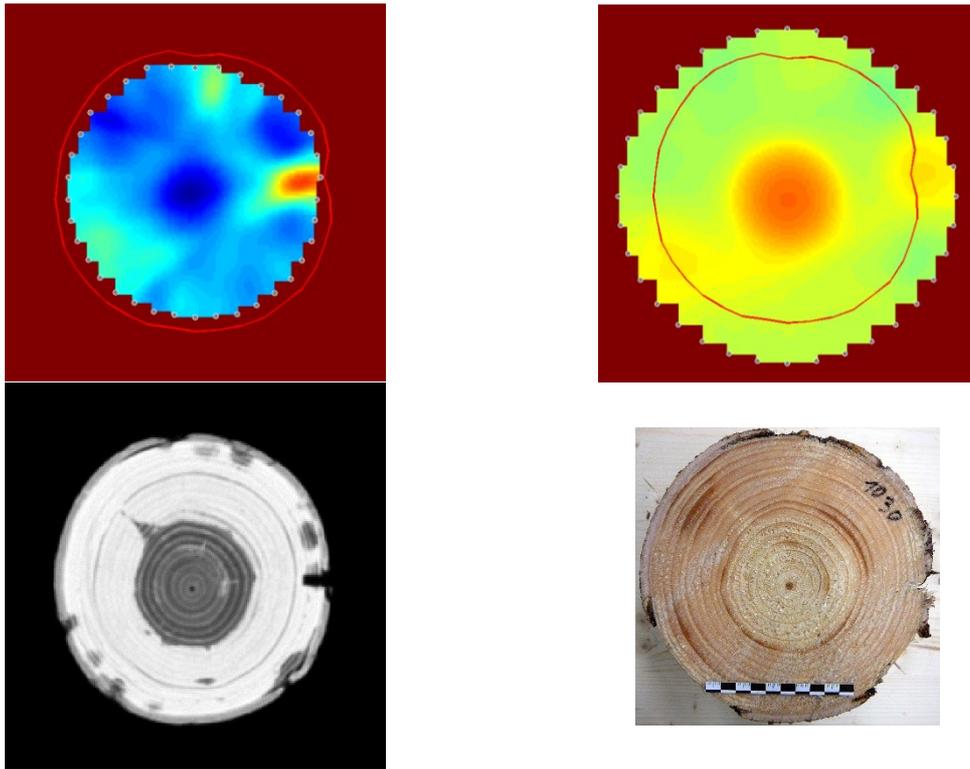


Bild 6. Bildvergleich Fäulegrad 0: Ultraschall (oben links), Radar (oben rechts), Röntgen (unten links) und visuell (unten rechts)

Ein teilweise abweichendes Ergebnis von den zu erwartenden Tomogrammen eines Fäulegrad 3 wird in Bild 7 gezeigt. Sowohl das Radar- als auch das Ultraschall-Tomogramm zeigen deutliche Abweichungen von der normalen Splint-Kern Verteilung. Eine niedrigere Pulsengeschwindigkeit im Kern mit Ausdehnung in Richtung Zwei-Uhr-Position deutet auf einen Fäulegrad 3 hin. Das Radar-Tomogramm zeigt sehr trockene Bereiche sowie die Splint-Kern-Verteilung. Bei der Betrachtung des Röntgen-Tomogramms und des visuellen Bildes wird deutlich, dass der Stammabschnitt stark von einer homogenen Splint-Kern-Verteilung abweicht. Das trockenere Kernholz erstreckt sich an der Sieben-Uhr-Position weit nach außen, was sich im Radar-Tomogramm entsprechend abzeichnet. Der Fäulebefall insgesamt ist weit fortgeschritten, so dass sich im Kern ein fast homogen fauler Bereich befindet, dessen Ausdehnung in Richtung Zwei-Uhr-Position sich im Ultraschall-Tomogramm wiederfindet.

Klassifikation

Nach Abschluss der Vergleichsmessungen standen 1060 Datensätze mit den Rasterwerten je einer Messgröße in einem Stammquerschnitt zur Auswertung zur Verfügung. Ein Ziel der Auswertung war die Fäuledetektion in den Holzstämmen auf Basis der Ultraschall- und der Radar-Tomographie. Die Ergebnisse der Röntgen-CT sowie der holzphysikalischen und holzbiologischen Untersuchungen dienten dabei als Referenzwerte. Weitere interessante Korrelationsergebnisse zwischen den Messergebnissen können hier nicht dargestellt werden.

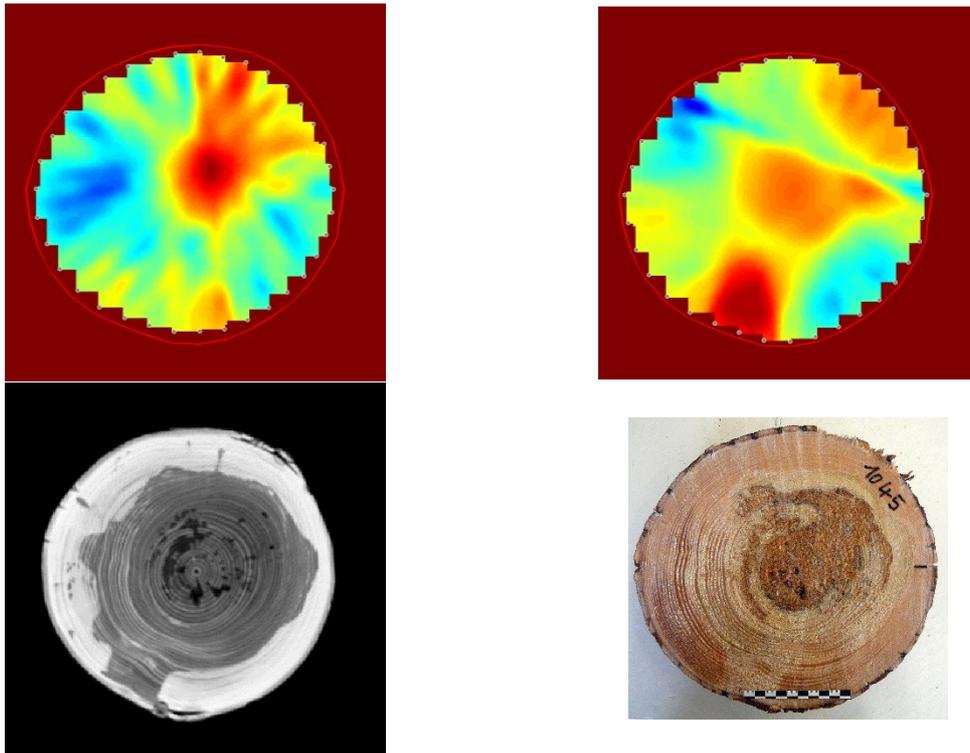


Bild 7. Bildvergleich Fäulegrad 3: Ultraschall (oben links), Radar (oben rechts), Röntgen (unten links) und visuell (unten rechts)

Zur Fäuledetektion und -klassifikation wurden mehrere Ansätze getestet, die auf der Korrelation der Pulsgeschwindigkeit und/oder Permittivität mit dem Fäulegrad bzw. auf einer Klassifikation dieser Größen beruhen.

Bei der integralen Auswertung werden alle tomographisch ermittelten Schallgeschwindigkeiten bzw. Permittivitäten aller Stammquerschnitte zu einem Mittelwert zusammengefasst und in Abhängigkeit der festgelegten Fäulegrade betrachtet. Als Beispiel zeigt Bild 8, links, die integrale Korrelation der Ultraschall-Schallgeschwindigkeit zum Fäulegrad. Die Schallgeschwindigkeit zeigt einen deutlichen Trend von Fäulegrad FG 0 zu FG 3. Je fauler das Holz ist, desto geringer ist die Schallgeschwindigkeit; allerdings überlappen sich die Ergebnisse der einzelnen Fäulegrade.

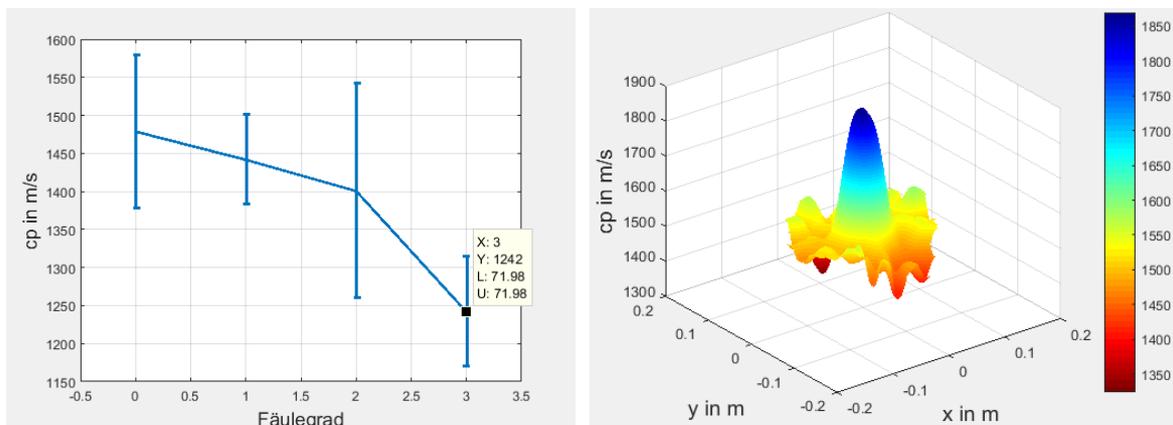


Bild 8. Integrale Korrelation der Ultraschall-Schallgeschwindigkeit zum Fäulegrad über den gesamten Stammquerschnitt (links), modellbasierte Klassifikation der Ultraschall-Schallgeschwindigkeit durch eine zweidimensionale Gaußverteilung (rechts)

Ein modellbasierter Ansatz zur Klassifikation von Pulsgeschwindigkeit oder Permittivität zum Fäulegrad wurde verfolgt, indem die Parameter einer zweidimensionalen Gaußverteilung an Splint- und Kernbereich der entsprechenden Tomogramme angepasst wurden. Dies ist in Bild 8, rechts, exemplarisch für ein Tomogramm der Ultraschall-Pulsgeschwindigkeit dargestellt. Werden beide Korrelationen kombiniert, kann allein mittels Ultraschall-Tomographie der Fäulegrad FG 3 zu 78 % korrekt identifiziert werden bei einer Falscherkennungsrate von 3 %. Damit ist bereits durch Klassifikation der Ultraschall-Pulsgeschwindigkeit eine praktisch verwendbare Erkennung des Fäulegrades FG 3 möglich. Weitere Verbesserungen sind zu erwarten, wenn die Permittivität aus Radar-Tomogrammen in die Auswertung mit einbezogen wird [10]. Dafür sind Untersuchungen mit weiteren Klassifikatoren notwendig.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde ein Verfahren zur zerstörungsfreien Qualitätsbewertung von Fichten-Stammholz mit Hilfe einer Kombination von transmissionstomographischen Ultraschall- und Radar-Abbildungssystemen dargestellt und an einem einkanaligen Messaufbau demonstriert. Es wurden Vergleichsmessungen mit 11 Messgrößen an identischen Querschnittsebenen in 33 Stammabschnitten beschrieben. Darüber hinaus wurden Ansätze zur Detektion von Rotfäule im Holzquerschnitt und zur Klassifikation nach Fäulegraden durch Korrelation der Ultraschall- und Radar-Tomogramme vorgestellt. Die Kombination der primären Sensitivitäten der beiden Verfahren für Holzfestigkeit bzw. Holzfeuchte ist dabei zukunftsweisend. Für die Untersuchungen war der Abgleich mit Röntgen-Tomogrammen sowie holzphysikalischen und holzbiologischen Untersuchungen wesentlich.

Zukünftige Arbeiten werden die Kompensation der Anisotropie der elastischen und elektromagnetischen Wellenausbreitung, die in den Arbeiten untersucht, aber hier nicht dargestellt wurde, zum Ziel haben. Die Einbeziehung weiterer Klassifikatoren soll die Detektionswahrscheinlichkeit der einzelnen Fäulegrade weiter verbessern.

Als Grundlage für die praktische Realisierung wurde ein automatisiertes, kombiniertes Multikanal-Ultraschall-/Radar-Tomographiesystem konzipiert, das für den mobilen Harvester-Einsatz im Wald geeignet ist (Bild 9). Ziele waren ein kompakter, robuster Aufbau und eine kurze Messzeit.

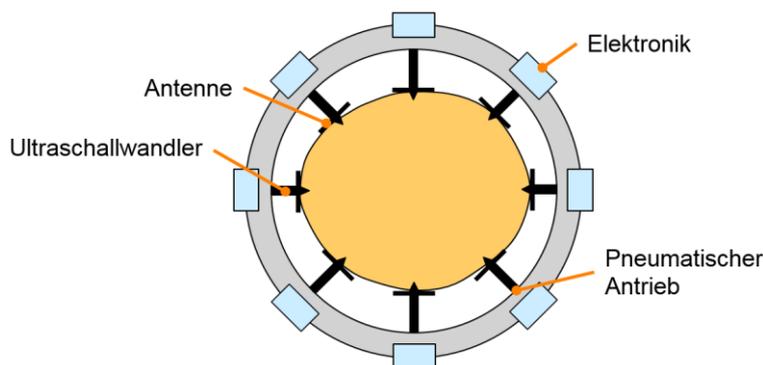


Bild 9. Grundlegendes Konzept für ein automatisiertes Messsystem zur Bewertung der Holzqualität mit Ultraschall- und Radar-Tomographie

Das grundlegende Konzept sieht kombinierte Sensorträger für die Ultraschallwandler und Radarantennen vor, die radial bewegt werden können. Aus der gemessenen Verschiebung der Sensorträger kann die Stammgeometrie der Querschnittsfläche bestimmt werden. Die Ankopplung für die Ultraschallwandler ist hier mit Einstechspitzen realisiert;

die Arbeitsergebnisse ergaben auch vielversprechende Ergebnisse bei Luftankopplung. Die Kanalzahl von z. B. 5 bis 64 Kanälen hängt von der für die Anwendung erforderlichen Auflösung ab. Durch die elektronische Umschaltung der Sende- und Empfangskanäle und die parallele Durchführung der Ultraschall- und Radarmessungen erscheint eine Mess- und Auswertzeit von wenigen Sekunden realisierbar. Aus der Auswertung mehrerer Querschnittsmessungen kann der Fäulebefall dreidimensional abgeschätzt und die Lage von Trennschnitten im Stammholz optimiert werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des AiF/IGF-Vorhabens 18241 BR durchgeführt. Die Autoren danken den Fördergebern und den Projektpartnern, vor allem L. Blüthgen, P. Flade und J. Wiedemann vom Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH sowie S. Chmara, N. Ruminski und P.-E. Rehpenning vom Forstlichen Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha, ThüringenForst AöR. Die Firmen Ing.-Büro Dr. Hillger, Braunschweig, und Meodat, Ilmenau, sowie die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), Freiburg, haben die Arbeiten durch Ausleihe von Geräten und Beratung unterstützt.

Referenzen

- [1] Kak, A.C.; Slaney M.: *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. New York: IEEE Press, 1988.
- [2] MiCROTEC CT Log: <http://www.microtec.eu/en/catalogue/products/ctlog>, last access 2016-03-29.
- [3] Sambuelli, L.; Socco, L.V.; Godio, A.; Nicolotti, G.; Martinis, R.: Ultrasonic, Electric and Radar Measurements for Living Trees Assessment. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 44 (2003) 253–279.
- [4] Brancheriau, L.; Gallet, Ph.; Lasaygues, Ph.: Ultrasonic Imaging of Defects in Standing Trees. In: *17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Sopron, Hungary, 14.–16.9.2011. Sopron, Hungary: University of West Hungary, 2011.
- [5] Turpening, R.; Asiala, C.; Diebel, J.; Done, Ch.; Brown, A.: Acoustic Imaging of Sandalwood (*Santalum album*) Logs. In: *17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Sopron, Hungary, 14.–16.9.2011. Sopron, Hungary: University of West Hungary, 2011.
- [6] Wang, L.; Wang, N.; You, X.; Yan, Z.; Yang, X.: Reconstruction of Three-dimensional Stress Wave Tomography for Detecting Inner Defects in Logs. In: *17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Sopron, Hungary, 14.–16.9.2011. Sopron, Hungary: University of West Hungary, 2011.
- [7] Nicolotti, G.; Socco, L.V.; Martinis, R.; Godio, A.; Sambuelli, L.: Application and Comparison of three Tomographic Techniques for Detection of Decay in Trees. *Journal of Arboriculture* 29 (2003) 66–78.
- [8] Butnor, J. R., Pruyne, M. L., Shaw, D. C., Harmon, M. E., Mucciardi, A. N., Ryan, M. G.: Detecting Defects in Conifers with Ground Penetrating Radar: Applications and Challenges. *Forest pathology* 39 (2009) 309–322.
- [9] Schickert, M.; Bonitz, F.: A transmission-tomographic imaging setup combining elastic and electromagnetic wave functionality. In: *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT)*, Munich, 13–17 June 2016. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2016, 1–8.
- [10] Schickert, M.; Bonitz, F.; Ulanov, A.; Müller, B.; Chmara, S.; Ruminski, N.; Rehpenning, P.-E.; Blüthgen, L.; Flade, P.; Wiedemann, J.: Tomographische Abbildung mit Ultraschall, Radar und Röntgen zur Detektion von Fäule in Holzstämmen. In: *DGZfP-Jahrestagung*, Koblenz, 22.–24.05.2017. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2017, 1–11.