

# Grundlegende Untersuchung zur Anwendung der Millimeterwellen- und Terahertz-Technologie an Holz und Holzwerkstoffen

Matthias DEMMING\*\*, Konrad SOLBRIG\*, Katja FRÜHWALD\*, Torsten HILGER\*\*

\* Hochschule Ostwestfalen-Lippe FB7, Lemgo

\*\* Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR, Wachtberg

**Kurzfassung.** Die Anwendung der Millimeterwellen- und Terahertz-Technologie zur Untersuchung der Eigenschaften und zur Prüfung von Bauteilen aus Holz hat bis dato wenig Verbreitung und Relevanz in der Praxis. In der Holzwerkstoffindustrie (OSB, Spanplatte, MDF etc.) existieren keine auf dieser Technologie basierenden Messsysteme zur Qualitätssicherung im Herstellungsprozess. Lediglich Mikrowellen kommen zur Feuchtemessung zum Einsatz - jedoch mit allenfalls minder befriedigender Genauigkeit der Ergebnisse. Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen an Holz waren zumeist auf einen kleinen Frequenzbereich bis maximal 10 GHz beschränkt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer systematischen Untersuchung zur Anwendung der Millimeterwellen- und Terahertz-Technologie an Holz und Holzwerkstoffen vorgestellt. Dazu wurden die Untersuchungen über einen großen Frequenzbereich (8 - 325 GHz) durchgeführt. Diese Frequenzen werden mit Hilfe eines Netzwerkanalysators und verschiedener Mischer-Module erzeugt, womit sich sowohl Transmissions- als auch Reflexionsmessungen durchführen lassen. Ziel dieser Untersuchung ist es, erste grundlegende Erkenntnisse über die Wechselwirkung der elektromagnetischen Welle mit dem inhomogenen, anisotropen Werkstoff Holz über einen großen Frequenzbereich zu gewinnen. Dabei wird sowohl die Struktur als auch die Rohdichte und der Feuchtegehalt des Werkstoffes berücksichtigt. Dies ist nötig, da bisherige Untersuchungen gezeigt haben, dass gerade diese Faktoren einen massiven Einfluss auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle innerhalb von Holz haben. Weiterhin beschäftigt sich dieser Beitrag mit den einstellbaren Messparametern des Netzwerkanalysators und der Einspeisung der elektromagnetischen Welle (mit/ohne Kontakt) und deren Auswirkungen auf die Wechselwirkung zwischen der elektromagnetischen Welle und dem Werkstoff. Ziel ist es, den optimalen Messaufbau mit passenden Einstellungen der Messparameter für eine Hochfrequenzmessung an Holz und Holzwerkstoffen zu finden. Im letzten Abschnitt dieses Beitrags werden die gewonnenen Kenntnisse speziell auf einen möglichen Anwendungsfall in der Holzwerkstoffindustrie übertragen.

## Einführung

In der Holz- und Holzwerkstoffindustrie stellt die Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Qualität sowie die Vermeidung von fehlerhaften oder nicht den Anforderungen genügenden Produkten eine wichtige Herausforderung dar. Dabei spielen die zerstörungsfreien und berührungslosen Prüfverfahren eine besondere Rolle, da diese den Fertigungsprozess nicht negativ beeinflussen. Die heutigen Systeme für die Qualitäts- und



Prozesskontrolle basieren dabei zumeist auf optischen, akustischen oder Röntgensensoren, die die Möglichkeiten bei der Qualitäts- und Prozesskontrolle z. T. stark limitieren bzw. erschweren. So können mittels optischer Sensoren nur Oberflächenveränderungen detektiert werden, da diese Sensoren optisch intransparente Materialien nicht durchdringen können. Dadurch lassen sich auch keine Materialeigenschaften wie Flächengewicht oder Feuchtigkeit rekonstruieren. Röntgensysteme durchdringen Materialien wie z. B. Holz oder Holzwerkstoffe zwar, können wegen der ionisierenden Strahlung aber nur mit großem Sicherheitsaufwand betrieben werden. Zusätzlich dazu detektieren die heutigen Röntgensysteme nur die Dämpfung des Signals, die bei den meisten nicht metallischen Objekten – hier insbesondere Holz und Wasser – sehr ähnlich ist. Dadurch ist eine Unterscheidung feiner Änderungen im Material (Rohdichte und Feuchtegehalt) oft schwierig. Darüber hinaus lassen sich mit Röntgensystemen nur Bandgeschwindigkeiten bis zu einigen Metern pro Sekunde realisieren.

Durch neue Technologien lassen sich seit einigen Jahren Hochfrequenzsensoren zwischen 1 GHz und 110 GHz preiswert herstellen, wodurch die Qualitäts- und Prozesskontrolle durch sogenannte Radarsysteme immer beliebter werden. Der Vorteil dieses Frequenzbereiches liegt zum einen in der Transparenz der meisten nichtmetallischen Materialien für die elektromagnetische Welle (EMW). Zum anderen bietet die Messung der Laufzeit durch die Phase einen weiteren großen Vorteil. Durch die zusätzliche Aufnahme der Phase ist ein Radarsystem so sensitiv, dass sogar der Briefaufkleber auf einem Brief erkennbar ist und separiert werden kann. Dadurch lassen sich bereits geringe Schwankungen im Herstellungsprozess leicht detektieren. Des Weiteren sind Bandgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s problemlos von heutigen Radarsystemen realisierbar. Durch die geringe Sendeleistung eines Radarsystems zur Qualitäts- und Prozesskontrolle, die nur einem Bruchteil der eines mobilen Telefons entspricht, werden keine zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen wie z. B. bei Röntgensystem benötigt. Durch diese Vorteile und der Möglichkeit preiswerte Sensorsysteme herstellen zu können, bietet die Radartechnologie ein großes Potenzial für die Online-Qualitäts- und Prozesskontrolle in der Industrie.

Die in diesem Beitrag durchgeführten Untersuchungen können in zwei Teilbereiche unterteilt werden. Ziel des ersten Teilbereichs ist das Sammeln erster Erfahrungen mit dem Werkstoff Holz und der Radartechnologie, um daraus die optimalen Messparameter für den gewählten Messaufbau zu identifizieren. Es soll darüber hinaus eine grundlegende Aussage getroffen werden, bis zu welchen Frequenzen das Material transparent ist. Im zweiten Teilbereich werden die gewonnenen Erfahrungen auf den Holzwerkstoff MDF (Medium Density Fibreboard) angewendet, um dessen Transparenz für zukünftige Anwendungen zu identifizieren.

## **1 Stand der Technik zur Anwendung von Radar an Holz und Holzwerkstoffen**

Die dielektrischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen werden umfassend von [1] dargestellt und deren Abhängigkeiten von der Frequenz und materialspezifischen Einflussfaktoren wie Faserverlauf, Rohdichte, Feuchtegehalt und Temperatur verdeutlicht. So steigt die Dämpfung der EMW mit zunehmender Rohdichte und Feuchte des Materials. Selbiges gilt für die Temperatur, wobei der Einfluss vergleichsweise gering ist und bei höheren Frequenzen abnimmt. Die Abhängigkeit der Streueigenschaften der EMW vom Faserverlauf ist bei variierender Polarisationsrichtung zur Ausrichtung der Holzfasern im Material gegeben. Diese Zusammenhänge werden von zahlreichen Autoren bestätigt, deren spezielle Untersuchungen beispielsweise einiger Holzarten sich vorwiegend lediglich bis 10 GHz erstrecken, während von [1] Ergebnisse bis 100 GHz vorliegen.

Praxisnahe wissenschaftliche Untersuchungen zur Anwendung von Radar an Holz und Holzwerkstoffen beschränken sich meist auf zwei Frequenzbereiche – Ground Penetrating Radar (GPR) mit 1 - 1000 MHz und Mikrowellen mit maximal 10 GHz. Dies ist der schlichten, versuchsweisen Anwendung etablierter Systeme an neuen Untersuchungsgegenständen geschuldet. GPR wird in den Untersuchungen als bildgebendes Verfahren beispielsweise zur Lokalisierung von Defekten (Risse, Äste, Fäulnis) oder Verbindungsmitteln in großen Materialquerschnitten an stehenden Bäumen (vgl. [2]), Stammholz im Sägewerk (vgl. [3]) oder bestehenden Tagwerken (vgl. [4, 5]) eingesetzt. Alle Abweichungen im Material von der fehlerfreien Holzsubstanz liefern bei sprunghaften Änderungen der Permittivität eine deutliche Anzeige im Reflexionssignal. Der Mikrowellenbereich wird vornehmlich zur Feuchtemessung an Schnittholz herangezogen (vgl. [6-8]). Im Freiraumtransmissionsverfahren sind bei bekanntem Feuchtegehalt oder darrtrockenem Holz auch Bestimmungen der Rohdichteverteilung möglich. Darüber hinaus erfolgen mit gleichem Messaufbau auch Faserwinkelmessungen (vgl. [9, 10]). Die innere Struktur von Rundholz wird weiterhin von [11] in einem Laboraufbau mittels Mikrowellenpolarisationstomografie rekonstruiert und visualisiert.

Eine nennenswerte industrielle Verbreitung der Millimeterwellen- und Terahertz-Technologie im Holz- und Holzwerkstoffsektor liegt bis dato nicht vor. Lediglich Mikrowellen bis ca. 10 GHz kommen zur Feuchtemessung an Schnittholz, Holzwerkstoffplatten und Schüttgütern (Hackschnitzel, Späne) zum Einsatz – jedoch mit allenfalls minder befriedigender Genauigkeit der Ergebnisse. Andere Radarsysteme zur Qualitäts- und Prozesssicherung existieren in der europäischen Holz- und Holzwerkstoffindustrie nicht. Ein klassisches Terahertz-System basierendes auf den Arbeiten von [12] kommt als Pilotprojekt in Kanada bei der OSB-Produktion zur Bestimmung der Dichteverteilung in Plattenebene und der mittleren Orientierung der Strands in der gestreuten Matte zum Einsatz. Über einen nachhaltigen Praxiserfolg liegen jedoch keine aktuellen Informationen vor.

## **2 Material**

Das bei den Untersuchungen verwendete Material ist entsprechend der zwei Teilbereiche zu unterteilen. Es entstammt dem Holzlager der HS OWL oder wurde eigens im Labor hergestellt. Alle Probekörper wurden bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte klimatisiert, woraus resultierend sich im Material eine konstante Ausgleichsfeuchte einstellt. Mit dieser Vereinheitlichung soll der Einfluss unterschiedlicher Mengen im Material enthaltenen Wassers auf die Streuparameter der EMW ausgeklammert werden.

### *2.1 Massivholz (Teilbereich 1)*

Im ersten Teilbereich der Untersuchungen an Massivholz kam sowohl Nadelholz (Fichte) als auch Laubholz (Eiche) zum Einsatz. Maße und Rohdichte der Probekörper sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Abmessungen wurden hinreichend groß unter Berücksichtigung des vorhandenen Rohmaterials und des geplanten Messaufbaus gewählt. In Tabelle 1 ist des Weiteren die Jahrringlage (tan, rad, long) angegeben, die auch aus Abbildung 1 ersichtlich wird, da hiervon zahlreiche mechanisch-physikalische Eigenschaften von Holz und beispielsweise auch die Durchdringung mittels Ultraschall abhängen. Der Prüfkörper Eiche wurde nicht kerngetrennt eingeschnitten und weist somit im Querschnitt sowohl tangential als auch radiale Jahrringlagen auf. Bei den Probekörpern TRIO 1/2 (Triobalken®) handelt es sich um drei verleimt Massivholzlamellen (Fichte). Dies ist ähnlich wie Brettschichtholz (BSH) der Definition nach ein Holzwerkstoff, wird aber aufgrund der Abmessungen diesem Versuchsteil zugeordnet. Die Klebefugen liegen parallel zur Breite und senkrecht zur Höhe des Querschnittes.

Tabelle 1: Probekörper Massivholz, mit Maßen, Rohdichte und Jahrringlage bei 20 °C/65 % RF

PK	Bezeichnung	Breite (3-4) [mm] tangential (tan)	Höhe (1-2) [mm] radial (rad)	Länge [mm] longitudinal (long)	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Fichte (FI)	112	92	300	491,39
2	TRIO 1	98	98,7	298	499,58
3	TRIO 2	98	98,7	298	506,17
4	Eiche (EI)	125	125	284	685,52



Abbildung 1: Probekörper Massivholz, Querschnitt

## 2.2 Holzwerkstoffe (Teilbereich 2)

Für erste grundlegende Untersuchungen an Holzwerkstoffen kommt i. d. R. MDF zum Einsatz, da eine unkomplizierte Herstellung im Labor möglich ist und selbst bei Platten industrieller Herkunft der Homogenisierungsgrad im Vergleich zu Massivholz am größten ist. MDF ist ein Holzwerkstoff, der im einfachsten Fall aus mittels Harnstoffformaldehydharz (UF) beleimten Fasern (Nadel- und Laubholz) in einer Heißpresse zu großformatigen Platten verpresst wird (vgl. [13]). Für die Untersuchungen im zweiten Teilbereich kam eigens im Labor hergestelltes MDF zum Einsatz.

Die neun verschiedenen Platten weisen eine definierte Dicken- und Rohdichte- bzw. Flächengewichtsabstufung auf. Die jeweils daraus entnommenen Probekörper sind mit relevanten Materialparametern in Abbildung 2 dargestellt. Zur Herstellung kamen unbeleimtes Fasermaterial industrieller Herkunft und KAURIT Leim 335 (UF, Festharzgehalt der fertigen Platte 10 %) zum Einsatz. Die im Pflugscharmischer beleimten Fasern wurden gleichmäßig von Hand gestreut, vorverdichtet und in einer hydraulischen Labor-Heißpresse so zur fertigen Platte verpresst (Druck- und Temperatursteuerung), dass über den Querschnitt eine homogene Dichteverteilung entsteht. Auf dieses homogene Rohdichteprofil wurde Wert gelegt, da handelsübliche MDF ein ausgeprägtes Rohdichteprofil mit höheren Deckschichtdichten aufweist, dessen Einfluss auf die Streuparameter der EMW jedoch an dieser Stelle noch unklar ist und deshalb bei diesen ersten Untersuchungen ausgeklammert werden sollte.

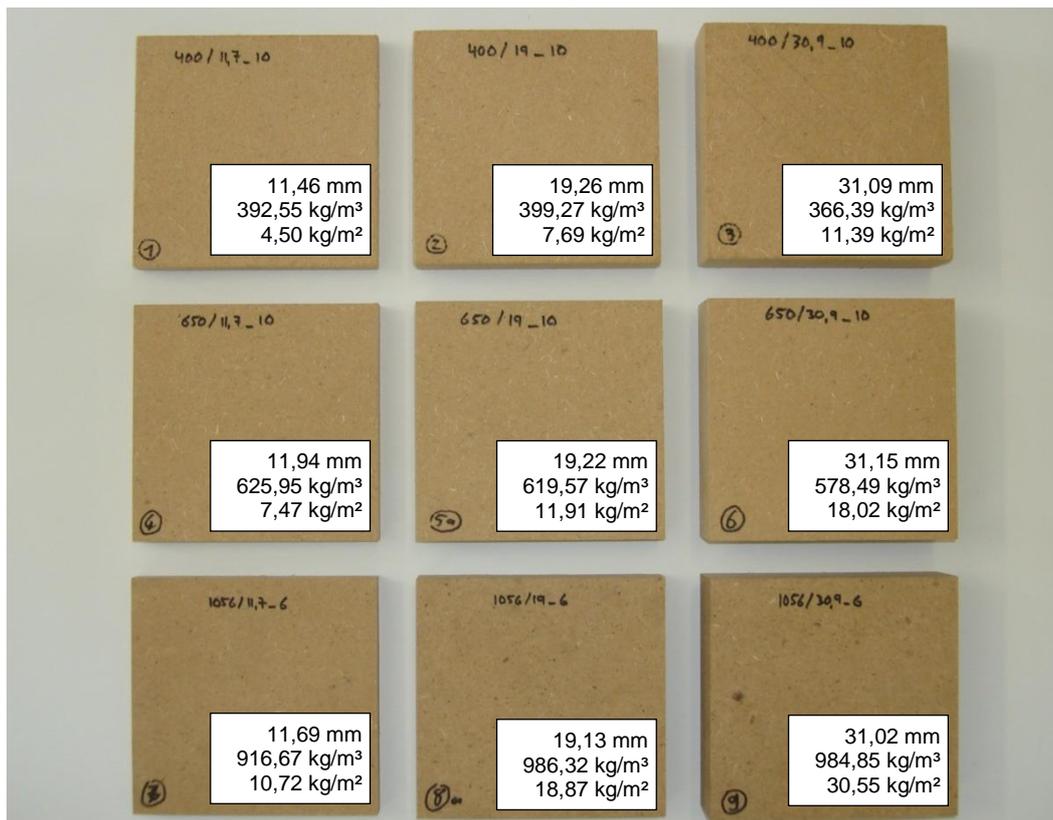


Abbildung 2: Probekörper Holzwerkstoff homogene MDF, mit Dicke [mm], Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>] und Flächengewicht [kg/m<sup>2</sup>] bei 20 °C/65 % RF

### 3 Hochfrequenz-Messsystem zur Datenaufnahme und Messmethoden

Das Hochfrequenz-Messsystem besteht aus dem Netzwerkanalysator PNA E8361 C der Firma Agilent, der ein elektromagnetisches Signal von 10 MHz bis 70 GHz generieren und detektieren kann. Mit Hilfe von erweiterbaren Modulen, in denen Frequenzvervielfacher enthalten sind, können die Frequenzbereich von 75 GHz bis 110 GHz, 140 GHz bis 220 GHz und 220 GHz bis 325 GHz abgedeckt werden. Dabei kann der Netzwerkanalysator eine Sendeleistung bis 5 dBm aussenden. Der Netzwerkanalysator bestimmt bei einer Messung die Differenz der Amplitude und der Phase zwischen dem gesendeten und dem empfangenen Signal und gibt diese als Messwerte aus. Für diese Untersuchungen wurden jedoch nur die Amplitudenmessungen betrachtet, da diese ausreichend sind um zu überprüfen, ob die elektromagnetische Welle durch das Material gedrungen ist oder nicht.

#### 3.1 Teilbereich 1 (Massivholz)

Für die Untersuchung dieses Beitrags wurden Messungen in dem Frequenzbereich von 8 GHz bis 325 GHz in Transmission mit einer Sendeleistung von -10 dBm durchgeführt (Abbildung 3). Dabei wurde erst ab der Frequenz von 8 GHz begonnen, da bei dieser Frequenz die meisten bisherigen Untersuchungen geendet haben. Als Einspeisungsarten wurden Hornantennen und Hohlleiter gewählt. Dabei dienen Hohlleiter als Praxisbeispiel zur Einspeisung der EMW direkt in das Medium Holz und die Hornantennen als berührungslose Einspeisung, die jeweils in allen drei Raumrichtungen (tan, rad, long) erfolgte. In dieser Untersuchung wurden die Messparameter der Sendeleistung und der Bandbreite der Zwischenfrequenz variiert, um deren Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse zu untersuchen.

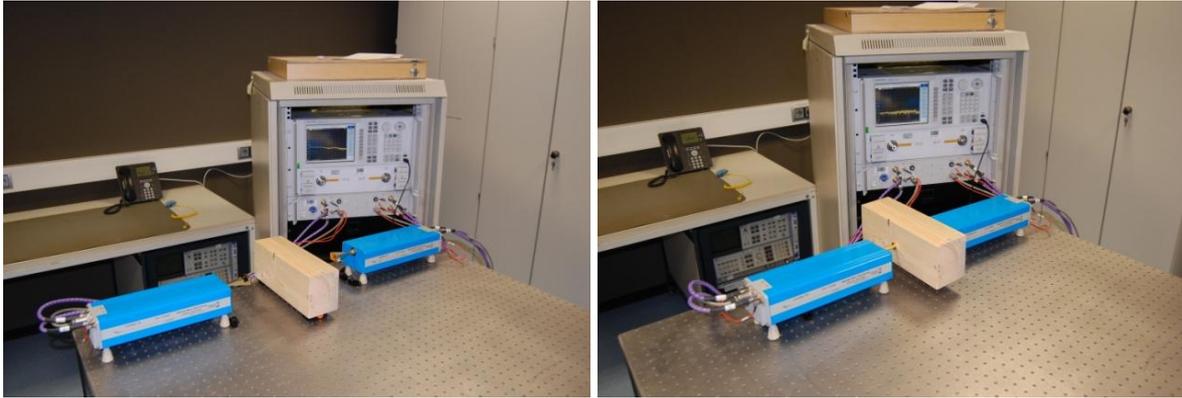


Abbildung 3: Aufbau der Transmissions-Messungen am Fraunhofer-FHR  
(links: Hornantennen, rechts: Hohlleiterübergänge)

### 3.2 Teilbereich 2 (Holzwerkstoff homogene MDF)

Die Messungen am Holzwerkstoff MDF wurden mit einem ähnlichen Messaufbau, wie in Abbildung 3 (links) dargestellt durchgeführt, jedoch erfolgte aufgrund der Erkenntnisse aus dem ersten Teilbereich (Massivholz) eine Beschränkung auf die Einspeisung durch Hornantennen. Die Messungen erstreckten sich über einen Frequenzbereich von 0,75 GHz bis 110 GHz, wobei die Einspeisung lediglich senkrecht zur Plattenebene erfolgte.

## 4 Untersuchungen an Holz und Holzwerkstoffen

### 4.1 Ergebnisse Teilbereich 1 (Massivholz)

In den ersten Untersuchungen wurden die Massivhölzer Fichte, TRIO und Eiche in dem Frequenzbereich von 8 GHz bis 325 GHz untersucht. Die Ergebnisse werden in den Abbildung 4 bis Abbildung 6 dargestellt. Eingespeist wurde die elektromagnetische Welle durch einen Hohlleiter, damit die gesamte Energie in das Medium Holz übertragen wird. Bei dem Probekörper Eiche wurden nur in zwei Richtungen (Breite und Länge) der Probe gemessen, da der Querschnitt in beiden Richtungen die gleichen Maße und Jahrringlagen besitzen.

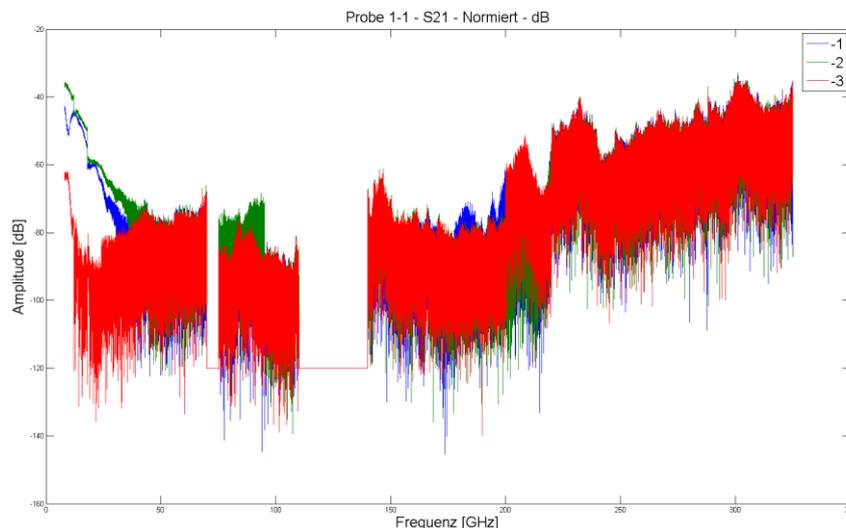


Abbildung 4: Amplitudenverlauf über die Frequenzen von 8 GHz bis 325 GHz, über alle drei Dimensionen des Probekörpers 1 Fichte (1 = tan, 2 = rad, 3 = long)

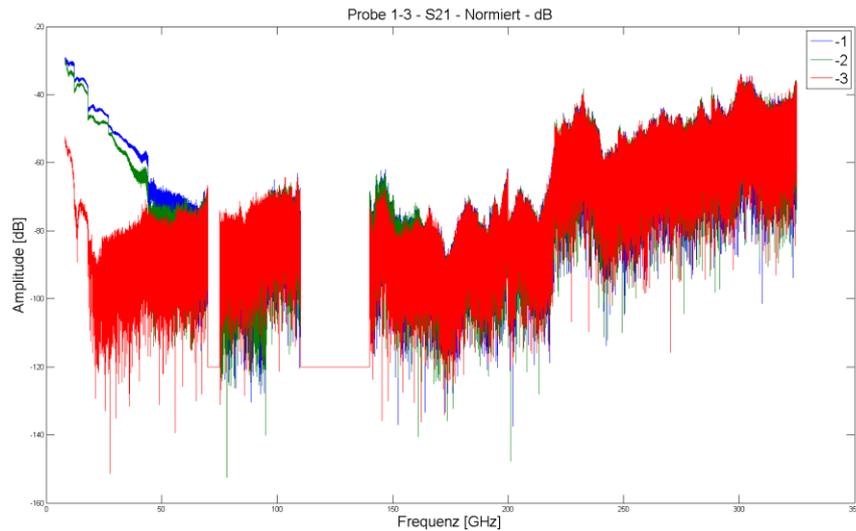


Abbildung 5: Amplitudenverlauf über die Frequenzen von 8 GHz bis 325 GHz, über alle drei Dimensionen des Probekörpers 3 TRIO 2 (1 = tan, 2 = rad, 3 = long)

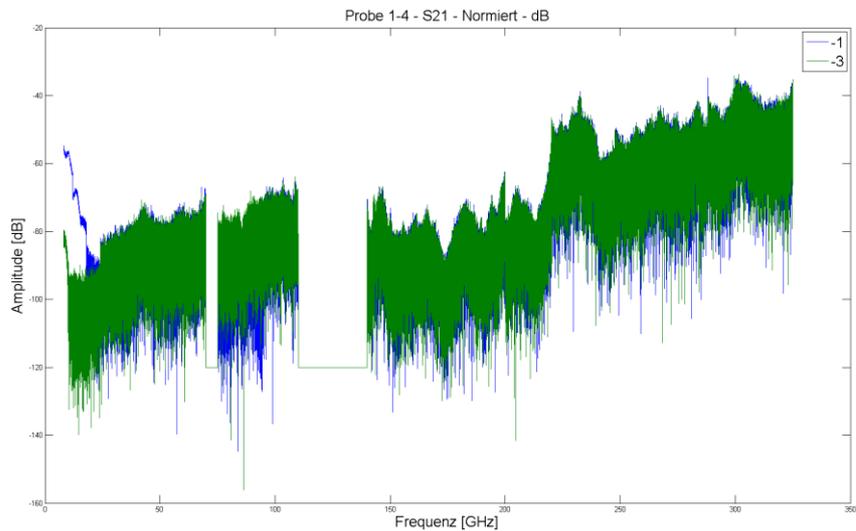


Abbildung 6: Amplitudenverlauf über die Frequenzen von 8 GHz bis 325 GHz, über alle drei Dimensionen des Probekörpers 4 Eiche (1 = Breite, 3 = long)

Anhand der Abbildungen können die maximalen Frequenzen festgestellt werden, bis zu denen der jeweilige Probekörper bei der jeweiligen Dicke transparent für die EMW ist. Diese werden auch in der Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Grenzfrequenz für die Durchdringung der Probekörpertypen in der jeweiligen Richtung

	<b>Breite (tan)</b>	<b>Höhe (rad)</b>	<b>Länge (long)</b>
<b>Material:</b>	Dicke: 112 mm	Dicke: 92 mm	Dicke: 300 mm
<b>PK 1:Fichte</b>	Bis 35 GHz	Bis 40 GHz	Bis 12 GHz
<b>Material:</b>	Dicke: 98 mm	Dicke: 98,8 mm	Dicke: 298 mm
<b>PK 3:TRIO 2</b>	Bis 60 GHz	Bis 55 GHz	Bis 20 GHz
<b>Material:</b>	Dicke: 125 mm	-	Dicke: 284 mm
<b>PK 4:Eiche</b>	Bis 22 GHz		Bis 10 GHz

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Frequenzen über 60 GHz die elektromagnetische Welle soweit durch das jeweilige Holz absorbiert wird, dass das Messsystem nichts mehr detektieren kann. Aus diesem Grund, und da kostengünstige Radarsystem aktuell nur bis 110 GHz realisiert werden können, wird der Frequenzbereich über 110 GHz für zukünftige Untersuchungen nicht mehr betrachtet.

Nachdem festgestellt wurde, bis zu welcher Frequenz das jeweilige Massivholz durchlässig ist, wird überprüft, welchen Einfluss die Sendeleistung auf die Messergebnisse hat. Dazu wurde an der gleichen Position der Probekörper jeweils mit -10 dBm und mit 5 dBm Sendeleistung eingespeist. Das Ergebnis des Probekörpers TRIO 2 ist in Abbildung 7 dargestellt, das exemplarisch für alle Probekörper ist.

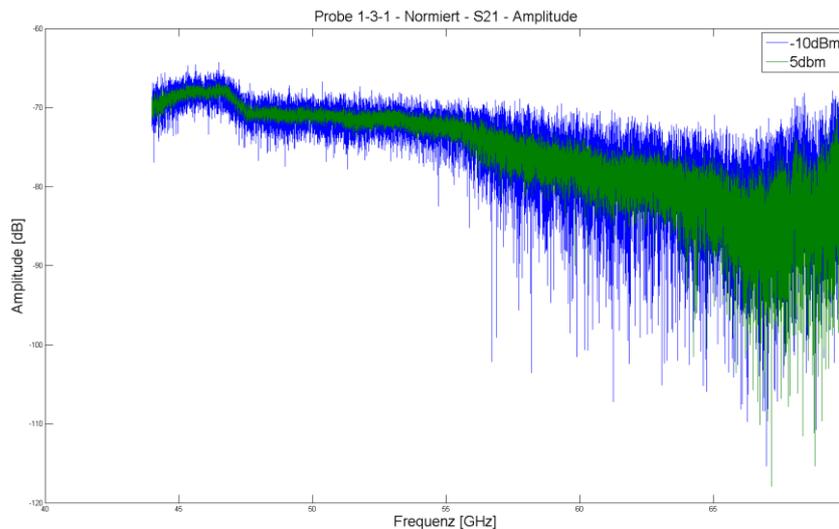


Abbildung 7: Amplitudenverlauf über die Frequenzen von 45 GHz bis 70 GHz, über die Breite (tan) des Probekörpers 3 TRIO 2 mit einer Sendeleistung von -10 dBm und 5 dBm, bei sonst gleichen Messparametern

Anhand Abbildung 7 ist zu erkennen, dass der Rauschanteil im Signal weniger wird, wenn mit mehr Leistung gesendet wird. Dies ist damit begründet, dass das Signal zu Rausch Verhältnis (SNR) durch eine höhere Sendeleistung steigt und somit das eigentliche Signal deutlicher erkannt wird.

Als zweiter Messparameter wird die Bandbreite der Zwischenfrequenz untersucht, mit dem das Signal gefiltert wird. Dafür wurde wieder dieselbe Stelle der Probekörper gemessen, nur diesmal mit unterschiedlichen Zwischenfrequenzen (100 Hz und 5 Hz). Exemplarisch für alle Ergebnisse ist in Abbildung 8 das Ergebnis am Probekörper TRIO 2 dargestellt. Mit Hilfe Abbildung 8 ist zu erkennen, dass der Rauschanteil bei einer Zwischenfrequenz von 5 Hz deutlich gesunken ist, im Vergleich zu der Zwischenfrequenz von 100 Hz. Das hat damit zu tun, dass bei einer kleineren Zwischenfrequenzbandbreite weniger Rauschen betrachtet wird. Dadurch steigt das SNR. Der Nachteil einer kleinen Zwischenfrequenzbandbreite ist jedoch die wesentlich längere Messzeit.

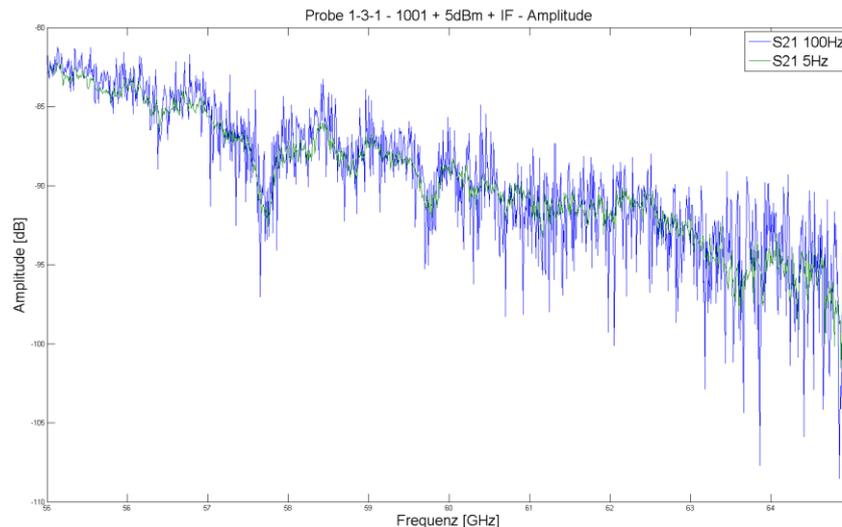


Abbildung 8: Amplitudenverlauf über die Frequenzen von 55 GHz bis 65 GHz, über die Breite (tan) des Probekörpers 3 TRIO 2 mit einer Zwischenfrequenz-Bandbreite von 100 Hz und 5 Hz, bei sonst gleichen Messparametern

Als letztes wird überprüft, welche Einspeisungsform (Hohlleiter oder Hornantennen) besser geeignet ist für den Werkstoff Holz. Dafür wird an der gleichen Stelle die EMW mit einem Hohlleiter direkt am Probekörper und mit einer Hornantenne in drei verschiedenen Entfernungen zum Probekörper eingespeist. In Abbildung 9 ist das Ergebnis am Probekörper TRIO 2 zu sehen, das wieder exemplarisch für alle Probekörper ist.

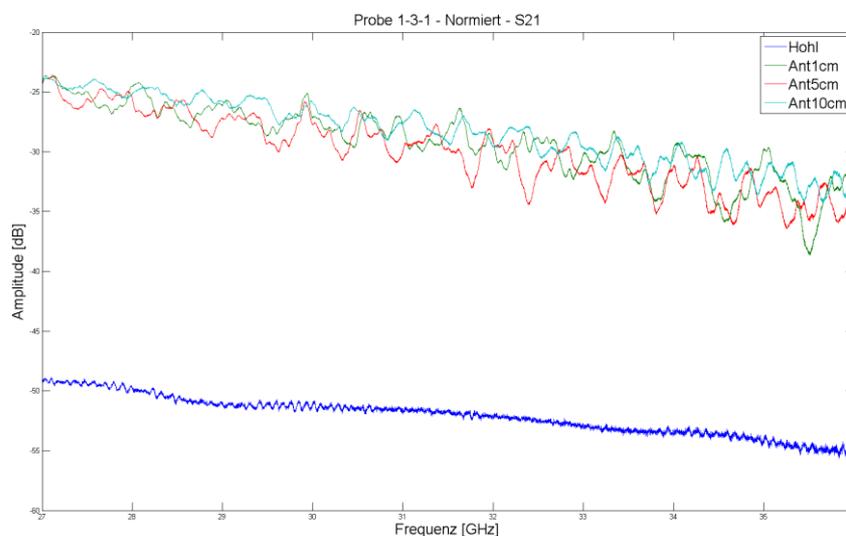


Abbildung 9: Amplitudenverlauf über die Frequenzen von 27 GHz bis 36 GHz, über die Breite (tan) des Probekörpers 3 TRIO, Einspeisung durch Hohlleiter und Hornantennen (in 1 cm, 5 cm und 10 cm Entfernung vom Probekörper), bei sonst gleichen Messparametern

Anhand Abbildung 9 ist zu erkennen, dass durch Hornantennen deutlich mehr Energie übertragen wird, als durch Hohlleiter. Dies liegt darin begründet, dass Hornantennen eine bessere und gebündeltere Abgabe und Aufnahme der elektromagnetischen Welle besitzen, als Hohlleiter.

#### 4.2 Ergebnisse Teilbereich 2 (Holzwerkstoff homogene MDF)

Mit den zuvor gewonnenen Erkenntnissen für die besten Messparameter und den Messaufbau werden im zweiten Teilbereich Messungen an dem Holzwerkstoff homogene MDF durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 10 exemplarisch für die Probekörper 1, 5 und 9 dargestellt, die die Grenz- und Mittelwerte von Dicke- und Rohdichtebereich der hergestellten Platten widerspiegeln.

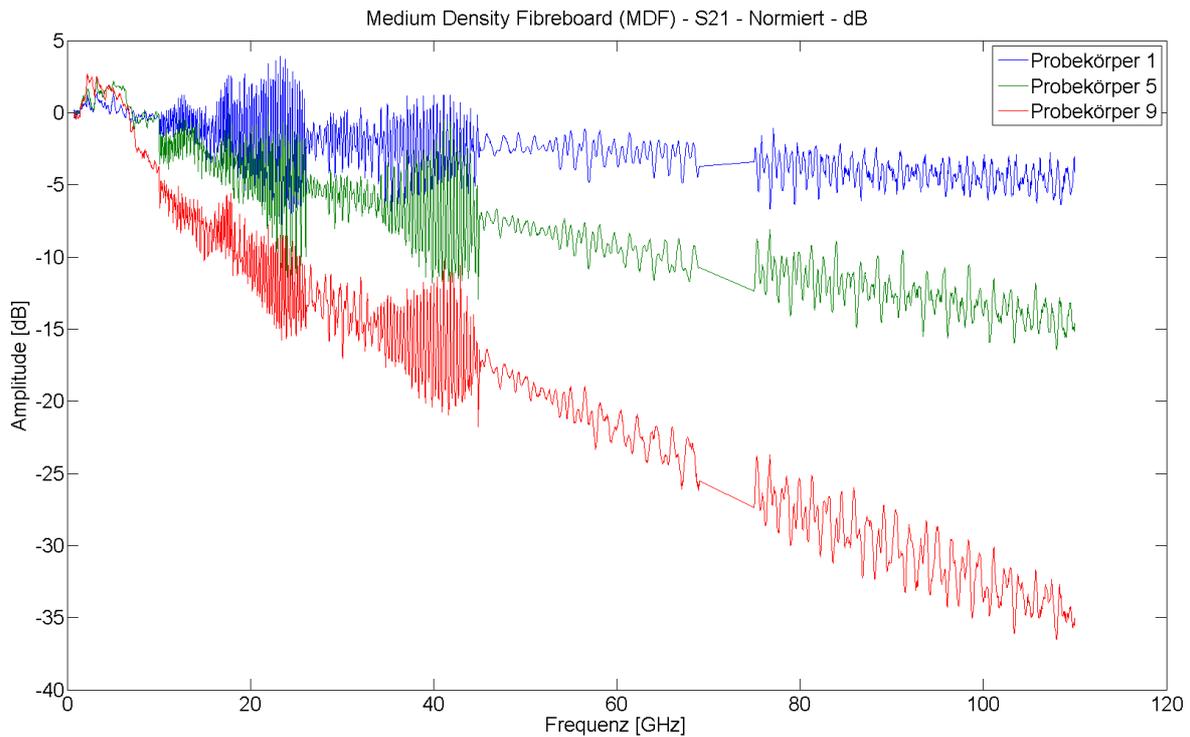


Abbildung 10: Amplitudenverlauf über die Frequenzen von 0,75 GHz bis 110 GHz, Holzwerkstoff homogene MDF, Probekörper 1, 5, 9

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass der Holzwerkstoff MDF über die untersuchte Spanne von Dicke und Rohdichte für den gesamten Frequenzbereich transparent ist. Somit ist der Holzwerkstoff MDF besonders gut geeignet für Hochfrequenz-Messsysteme bis 110 GHz, die dank der Automobilindustrie kostengünstig hergestellt werden können.

### 5 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, ob die Anwendung der Millimeterwellen- und Terahertz-Technologie an Holz und Holzwerkstoffen möglich ist. Dabei haben die Ergebnisse gezeigt, dass großes Potenzial in dieser Technologie für die Qualitäts- und Prozesskontrolle in der Holzwerkstoffindustrie steckt. Dabei sprechen gerade der nicht benötigte Sicherheitsaufwand, die bessere Sensibilität für Produktschwankungen und die mögliche höhere Bandgeschwindigkeiten für ein Radarsystem als mögliche Alternative zu Röntgensystemen, die bisher zur Kontrolle der fertigen Platte nach der Heißpresse ohnehin wenig verbreitet sind.

Insbesondere der obere Millimeterwellenbereich bis 300 GHz ist für die industrielle Qualitäts- und Prozesskontrolle besonders geeignet, da Messsysteme in diesem Bereich im Gegensatz zu den klassischen Terahertz-Technologien, wie sie in den Untersuchungen von

[12] verwendet werden, kostengünstig produziert werden können, für höhere Bandgeschwindigkeiten geeignet sind und unempfindlicher gegenüber Umweltschwankungen, wie z. B. Vibrationen, sind.

Im nächsten Schritt sind weitere Untersuchungen zur Feststellung des Einflusses material- und prozessrelevanter Parameter, wie z. B. Flächengewicht oder Materialfeuchte, durchzuführen. Aus den daraus gewonnenen Informationen sollen künftig Verfahren und Methoden entwickelt werden, um eine Qualitäts- und Prozesskontrolle mittels Radarsystemen in der Holzwerkstoffindustrie durchführen zu können.

## Referenzen

- [1] Torgovnikov, G. I. – Dielectric properties of wood and wood based materials. Springer: Berlin Heidelberg, 1993. 217 Seiten.
- [2] 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) 5. S. 309-322.
- [3] Halabe, U. B.; Agrawal, S.; Gopalakrishnan, B. – Nondestructive evaluation of wooden logs using ground penetrating radar. *Nondestructive Testing and Evaluation* 24 (2009) 4. S. 329-346.
- [4] Hasenstab, A.; Homburg, S.; Maierhofer, C.; Arndt, R. – Holzkonstruktionen mit Radar und Thermografie zerstörungsfrei untersuchen. In: *DGZfP-Jahrestagung 2007 Fürth*. 2007. S. 1-11.
- [5] Müller, W. – Timber Girder Inspection using Ground Penetrating Radar. In: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering - NDT-CE*. Berlin. DGZfP, 2003. S. 1-4.
- [6] Johansson, J.; Hagman, O.; Fjellner, B.-A. – Predicting moisture content and density distribution of Scots pine by microwave scanning of sawn timber. *Journal of Wood Science* 49 (2003) 4. S. 312-316.
- [7] Schajer, G. S.; Orhan, F. B. – Measurement of wood grain angle, moisture content and density using microwaves. *European Journal of Wood and Wood Products* 64 (2006) 6. S. 483-490.
- [8] Okamura, S. – Microwave Technology for Moisture Measurement. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 1 (2000) 2. S. 205-227.
- [9] Shen, J.; Schajer, G.; Parker, R. – Theory and practice in measuring wood grain angle using microwaves. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 43 (1994) 6. S. 803-809.
- [10] Malik, S. A.; Ghodgaonkar, D. K.; Hambaly, A. M. B. A.; Majid, W. M. W. A.; Nuruddin, M. F. – Measurement of wood grain angle using free-space microwave measurement system in 8-12 GHz frequency range. In: *Sensors and the International Conference on new Techniques in Pharmaceutical and Biomedical Research, 2005 Asian Conference on*. 2005. S. 213-218.
- [11] Kaestner, A. P.; Baath, L. B. – Microwave polarimetry tomography of wood. *Sensors Journal, IEEE* 5 (2005) 2. S. 209-215.
- [12] Reid, M.; Fedosejevs, R. – Terahertz birefringence and attenuation properties of wood and paper. *Applied Optics* 45 (2006) 12. S. 2766-2772.
- [13] Dunky, M.; Niemz, P. – *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Springer-Verlag: Berlin [u.a.], 2002. 954 Seiten.