

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 153 (2002)

Heft: 6

Artikel: Die Eignung von Schallgeschwindigkeit und Bohrwiederstand zur Beurteilung von simulierten Defekten in Fichtenholz

Autor: Niemz, Peter / Bues, Claus-Thomas / Herrmann, Steffen

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098233>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Eignung von Schallgeschwindigkeit und Bohrwiderstand zur Beurteilung von simulierten Defekten in Fichtenholz

PETER NIEMZ, CLAUDIUS THOMAS BUES und STEFFEN HERRMANN

Keywords: Sound velocity; drilling resistance; artificial defects; detection from defects. FDK 823 : 852.1 : 174.7 Picea

Abstract: The influence of stem thickness and artificially made defects (drill holes and cracks of different sizes) was tested in spruce for sound velocity using two different instruments; an Impulshammer with 300 Hz and a BP 5 with 50 kHz). Comparative drilling resistance was measured with a Resistograph 1410, and we were able to identify very small defects.

Abstract: An Fichtenholz wurde der Einfluss des Stammdurchmessers und von künstlich erzeugten Defekten (Bohrlöcher und Risse mit variabler Abmessung) auf die Schallgeschwindigkeit mit zwei verschiedenen Schallgeschwindigkeitsmessgeräten (Impulshammer, 300 Hz und BP 5, 50 kHz) getestet. Vergleichend wurde die Bohrwiderstandsmessung (Resistograph 1410) geprüft, wobei simulierte Defekte auch mit sehr geringen Ausmassen erkannt werden konnten.

1. Einleitung

Zur zerstörungsfreien Beurteilung der Holzqualität am stehenden Baum existiert eine Vielzahl kommerziell vertriebener Messgeräte auf Basis unterschiedlicher physikalischer Methoden (z.B. KUCERA & NIEMZ 1998). Erste grundlegende Arbeiten zum Mechanismus der Schallausbreitung in Bäumen führte QUIS (1999) durch. Eine umfassende Anwendung dieser Geräte, insbesondere zur Standfestigkeitsbeurteilung von Bäumen im städtischen Bereich scheiterte bisher vor allem an den unzureichenden wissenschaftlichen Grundlagen. Bestehende Richtlinien sind meist nur sehr allgemein verfasst. Eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in der Praxis ist daher nur bedingt möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Messung der Schallgeschwindigkeit sowie des Bohrwiderstands vergleichend getestet. Als Versuchsmaterial diente Fichtenholz. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen, wurde zunächst fehlerfreies Holz getestet, in welches danach künstliche Defekte (Bohrungen, Risse) mit verschiedener Dimension eingebracht wurden.

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsmaterial

Für die beiden Hauptteile der Untersuchung – die Messungen an fehlerfreiem Holz und an Holz mit definierten Defekten – wurde eine mittelalte (etwa 80-jährige), gesunde, relativ frei stehende Fichte, mit einem BHD von 35 cm und einer Höhe von 25 m ausgewählt.

Direkt nach der Fällung des Baumes wurde dieser in 60 Scheiben geschnitten. Dadurch war ein Durchmesserbereich von 10 cm bis 40 cm messbar. Diese Scheiben wurden auf der dem Stammfuss zugewandten Seite nummeriert und in Plastiksäcke verpackt. Für den Verlauf der Untersuchung wurden sie in der Klimakammer (Temperatur 2 °C, Luftfeuchtigkeit 90%) der Professur für Holzwissenschaften an der ETH Zürich gelagert und unmittelbar vor den Messungen im angrenzenden Laborraum herausgenommen.

Vor den einzelnen Messungen erfolgte die Ermittlung des Feuchtigkeitsgehaltes von Kern- und Splintholz. Die mittels Darrmethode bestimmte mittlere Holzfeuchte betrug im Kernholz 32%, im Splintholz 62%. Die mittlere Raumdichtezahl betrug 410–500 kg/m³.

Um Erkenntnisse über das Verhalten der Schallgeschwindigkeit im durch die Labormessungen nicht abgedeckten Durchmesserbereich oberhalb von 45 cm zu gewinnen wur-

den ergänzende Feldmessungen im Erdstammbereich liegender, gesunder Fichten durchgeführt. Dafür wurden durch den Orkan Lothar geworfene Fichten verwendet. Die Messung erfolgte acht Wochen nach dem Sturm, also praktisch im frischen Zustand.

2.2 Verwendete Geräte

Als Messgeräte dienen:

- für die Schallgeschwindigkeitsmessung: Impulshammer, Firma IML, Wiesloch, Deutschland (Messfrequenz etwa 300 Hz) und BP 5, Firma Steinkamp, Bremen, Deutschland (Messfrequenz 50 kHz) und
- für die Bohrwiderstandsmessung: Resistograph 1410, Firma IML.

Der Impulshammer arbeitet auf der Basis von Stosswellen. Diese werden durch Anschlagen erzeugt. Der Frequenzbereich (f) beträgt etwa 300 Hz, die Wellenlänge (λ) bei einer Schallgeschwindigkeit (c) von 1000 m/s etwa 3,3 m ($\lambda = c/f$). Beim Impulshammer erfolgt das Anschlagen manuell, beim stress wave timer der Firma Metriguard, USA wird der Anschlag über ein aus konstanter Höhe fallendes Pendel realisiert und so normiert. Die Stärke des Anschlages beeinflusst beim verwendeten Gerät das Messergebnis geringfügig. Zur Ankopplung wurden zwei Schrauben etwa 3 cm tief in die Probe eingeschraubt. In eine Schraube wurde der Signalempfänger eingeschraubt, die andere wurde mit dem zum Gerät gehörenden Messhammer angeschlagen. Die Laufzeit der Schallwelle wird an der zum Gerät gehörenden Elektronikeinheit angezeigt. Aus der Laufzeit und dem Abstand zwischen den beiden Schrauben (= Durchmesser minus 2x Einschraubtiefe der Schrauben) wurde die Geschwindigkeit berechnet.

Beim Messgerät BP 5 werden die Schallsignale durch den piezoelektrischen Effekt erzeugt. Etwa im Abstand von einer Sekunde werden Schallwellen mit einer Frequenz von etwa 50 kHz erzeugt. Als Sender und Empfänger dienen konusförmige Sensoren. Vor der Messung wurden Löcher durch die Rinde gebohrt, über die die Sensoren angekoppelt wurden. Die Wellenlänge beträgt bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von 1000 m/s 2 cm.

Beim Resistograph 1410 wird eine Stahlnadel mit 1,5 mm Schaftdurchmesser (Durchmesser an der Nadelspitze 3 mm) unter definierter Vorschubgeschwindigkeit in das Holz eingebohrt und die erforderliche Leistungsaufnahme gemessen. Als Kennwert dienen Bohrwiderstandseinheiten (maximal 6000 Bohrwiderstandseinheiten, BWE).

Im Vergleich zu einem Spiralbohrer erfolgt keine Abführung des Bohrmehls, so dass sich eine Überlagerung des Einflusses der Reibung des Bohrers ergibt.

2.3 Versuchsmethodik

Der Einfluss des Durchmessers wurde unter Berücksichtigung der sich durch die Abholzigkeit des Stammes ergebenden Durchmessererringerung in Richtung Krone ermittelt. Dabei blieb die Veränderung der Holzeigenschaften über die Länge des Stammes unberücksichtigt. Zusätzlich wurden ergänzende Feldmessungen an geworfenen Fichten mit einem Durchmesser von über 45 cm durchgeführt.

Die Labormessungen wurden nach dem in *Abbildung 1* dargestellten Schema durchgeführt. Die Wahl der Abstände von der Querschnittsfläche bzw. zwischen den Messgeräten erfolgte nach vorherigen Tests zur Ausschaltung des Randeinflusses auf die Schallgeschwindigkeit. Beim Auftreten von Ästen oder ähnlichen ersichtlichen Störungen in der Holzstruktur wurden die Messpositionen entsprechend variiert. Für die Messungen mit dem Impulshammer wurde, um den Einfluss des Anschlages zu minimieren, pro Messposition der Mittelwert aus 10 aufeinander folgenden Einzelmessungen (10-maliges Anschlagen) gebildet. Die Messungen mit dem Resistographen erfolgten mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 15 cm/min (Vorschubstufe 3).

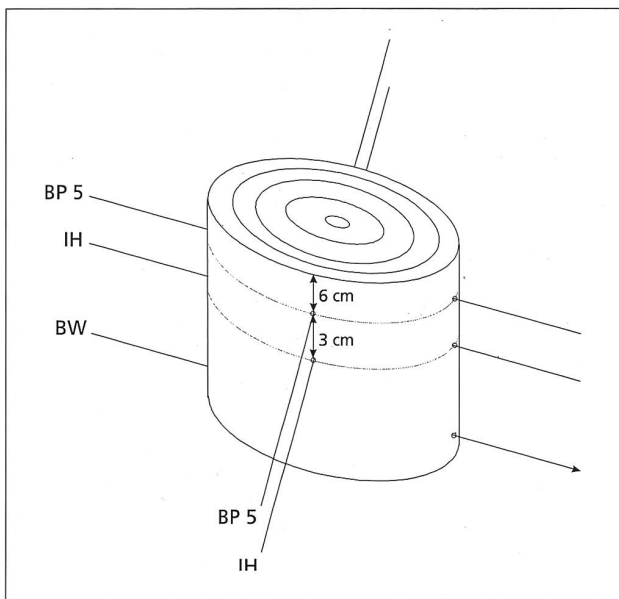


Abbildung 1: Versuchsanordnung für die Messung an fehlerfreiem Holz.

Figure 1: Experimental arrangement for defect free wood.

Für die Messungen an Holz mit definierten Defekten wurden sechs verschiedene Defektgrößen in Relation zum Stammscheibendurchmesser simuliert (5, 10, 15, 25, 50 und 70%). Die Versuchsanordnung zur Defektart Loch zeigt *Abbildung 2*. Bei der Simulation der Defektart Riss wurde eine Rechteckform gewählt. Bei konstanter Rissbreite (Abmessung parallel zur Durchschallungsrichtung) wurden die Risslängen (Abmessung senkrecht zur Durchschallungsrichtung) entsprechend variiert (*Abbildung 3*). Die Rissbreite betrug 5, 10, 15, 25, 50%, die Risslänge 10, 15, 25, 50, 70% des Stammdurchmessers.

Für alle Varianten wurden drei Wiederholungen durchgeführt, daraus der Mittelwert berechnet und der Auswertung zugrunde gelegt. Bei den einzelnen Variantengruppen der

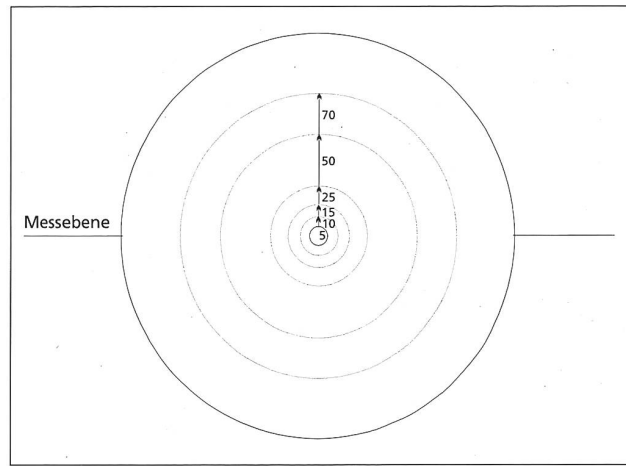


Abbildung 2: Versuchsanordnung für die Messung zur Defektart Loch.

Figure 2: Experimental arrangement of hole.

simulierten Defekte wurde darauf geachtet, dass sich die Stammscheibendurchmesser soweit möglich nur geringfügig unterscheiden.

Die Schallmessungen an fehlerfreiem Holz erfolgten an den gleichen Messpositionen wie bei den Proben.

3. Ergebnisse

3.1 Schallgeschwindigkeit

3.1.1 Einfluss des Stammdurchmessers

Bei den Messungen mit dem Impulshammer steigt die Schallgeschwindigkeit mit zunehmendem Stammdurchmesser bzw. Abstand zwischen den Sensorspitzen (*Abbildung 4*). Zwischen Schallgeschwindigkeit und Messentfernung (Stammdurchmesser) besteht eine lineare Korrelation. Das Bestimmtheitsmass betrug 0,88. Die vorhandene Unstetigkeit im mittleren Bereich muss durch weiterführende Arbeiten mit einem größeren Probenumfang geprüft werden. Die mittlere Schallgeschwindigkeit aller 60 Scheiben betrug beim Impulshammer 833 m/s ($s = 146$ m/s). Die ermittelte Tendenz deckt sich mit früheren eigenen Messungen (NIEMZ & KUCERA 1999, NIEMZ 2001) sowie Angaben des Herstellers des Impulshammers.

Mit BP 5 ergab sich eine uneinheitliche Punkteverteilung, die sich in zwei tendenziell gegensätzliche Abschnitte gliedert (*Abbildung 5*). Bis 30 cm Messentfernung nimmt die Schallgeschwindigkeit mit steigender Messentfernung ab, im weiteren Verteilungsverlauf ist dagegen ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit zu beobachten. Hierzu müssten ergänzende Untersuchungen durchgeführt werden. Auf eine statistische Auswertung (Regressionsanalyse) wird verzichtet. Gemäss SANDOZ & LORIN (1994) steigt beim Sylvatest (Frequenz 16 kHz) die Schallgeschwindigkeit mit abnehmendem Durchmesser. Die für dieses Gerät angegebenen Referenzwerte sind ebenfalls wesentlich höher als diejenigen für den Impulshammer. Sandoz gibt für eine 60 cm dicke Fichte 1600 m/s an. MATTHECK & BETHGE geben in der Gebrauchsanweisung für den Impulshammer bei Fichte 900–1100 m/s an (Geschwindigkeit mit Durchmesser steigend).

Die mittlere Schallgeschwindigkeit aller 60 Scheiben mit dem Messgerät BP 5 betrug 1457 m/s ($s = 114$ m/s). Die Werte liegen damit deutlich über den mit dem Impulshammer gemessenen. Diese Differenz macht den erheblichen Einfluss des Messgerätes deutlich. Die mit verschiedenen Messgeräten bestimmten Werte sind also nicht vergleichbar. Dies zeigen auch andere Arbeiten (siehe NIEMZ 2001).

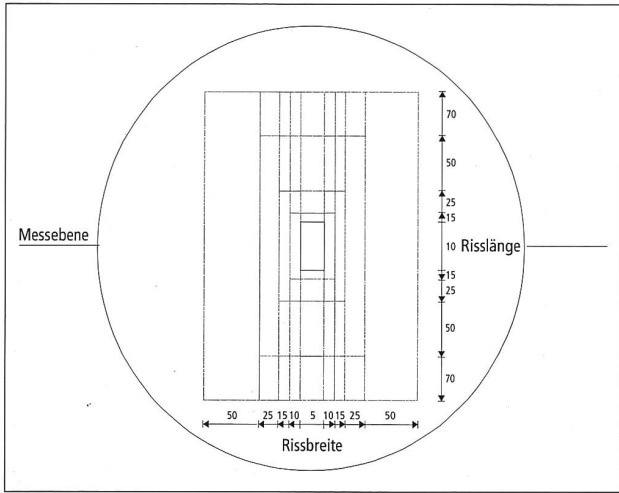


Abbildung 3: Versuchsanordnung für die Messung zur Defektart Riss.

Figure 3: Experimental arrangement of crack.

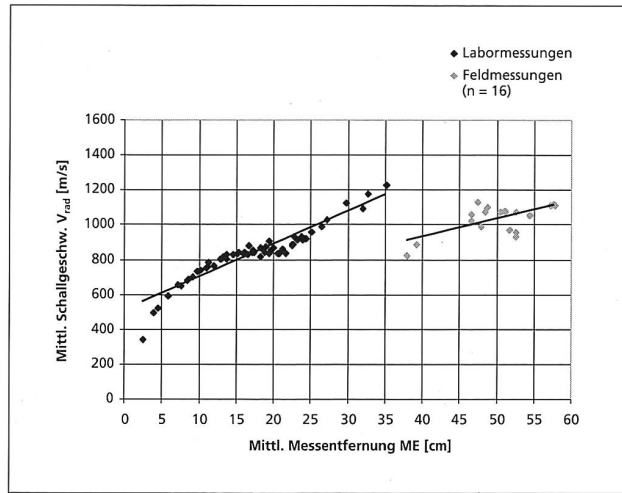


Abbildung 6: Vergleich der Abhängigkeit zwischen Stammdurchmesser und Schallgeschwindigkeit bei Labor- und ergänzenden Feldmessungen (Impulshammer).

Figure 6: Comparison between lab measurements and supplementary field measurements (Impulshammer).

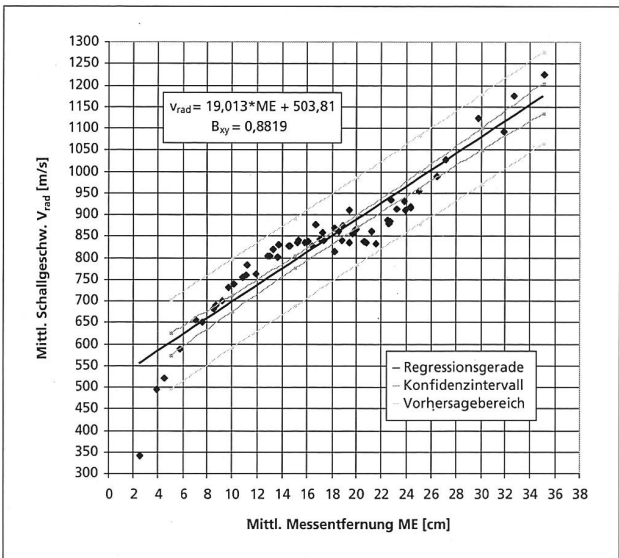


Abbildung 4: Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Stammdurchmesser für den Impulshammer (n=60).

Figure 4: Correlation between sound velocity and tree diameter for Impulshammer (n=60).

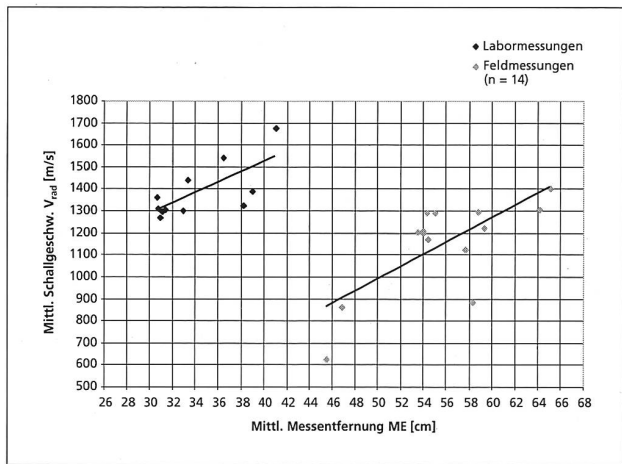


Abbildung 7: Vergleich der Abhängigkeit zwischen Stammdurchmesser und Schallgeschwindigkeit bei Labor- und ergänzenden Feldmessungen (BP 5).

Figure 7: Comparison between lab measurements and supplementary field measurements, BP 5.

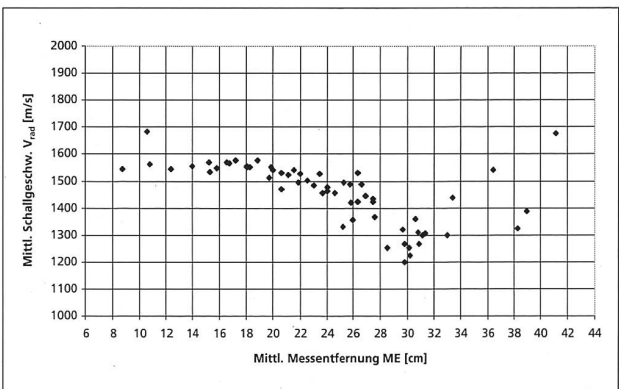


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Stammdurchmesser für BP 5 (n=60).

Figure 5: Correlation between sound velocity and tree diameter for BP 5 (n=60).

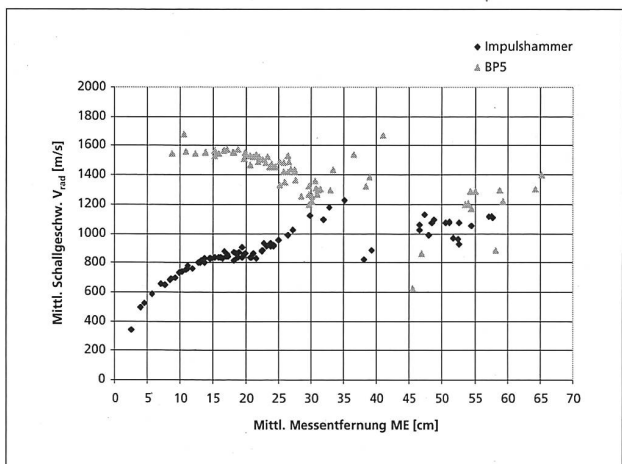


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Stammdurchmesser für Labor- und Feldmessungen beim Impulshammer und BP 5.

Figure 8: Correlation between sound velocity and measuring distance (lab- and field measurements) for Impulshammer and BP 5.

Die ergänzenden Feldmessungen haben die prinzipiellen Tendenzen der Labormessungen betreffend den Stammdurchmesser bestätigt. Das Gesamtniveau der Messwerte war allerdings etwas niedriger (*Abbildungen 6 und 7*). Oberhalb von 65 cm Stammdurchmesser war eine Durchschallung mit dem BP 5 unmöglich (unzureichendes Messsignal durch Dämpfung der starken Schallwellen).

Ein Gesamtvergleich der mit Impulshammer und BP 5 an fehlerfreiem Holz ermittelten Ergebnisse zeigt *Abbildung 8*.

3.1.2 Einfluss von simulierten Defekten

Simulierte Hohlräume

Bei den Messungen an Holz mit simulierten Hohlräumen ergibt sich bei beiden Messgeräten mit zunehmender Defektgrösse eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit (*Abbildungen 9 und 10*).

Beim Impulshammer ist die Streuung der Einzelwerte (max. 25 m/s) deutlich geringer als beim BP 5 (max. 230 m/s). Zudem ist beim Impulshammer bereits bei geringen Defektgrössen (5–15%) ein Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit erkennbar.

Die *Abbildungen 11 und 12* zeigen die Ergebnisse nach der Durchführung der Regressionsanalyse sowie der Bestimmung von Konfidenzintervall und Vorhersagebereich im Vergleich zur fehlerfreien Probe des gleichen Stammdurchmessers. Die Vorhersagebereiche sind ab 20% beim Impulshammer und ab 28% bei BP 5 von den fehlerfreien Proben getrennt. Bei Einzelmessungen ist somit ab diesen Defektgrössen eine sichere Defekterkennung möglich. Bei einer Defektgrösse von 70% betrug die mit dem Impulshammer gemessene Schallgeschwindigkeit in Relation zum Referenzwert der Gesamtverteilung noch 50%, mit BP 5 66%. Die Streuung der Messwerte war beim BP 5 höher als beim Impulshammer. Eine Prognose des Defektausmasses ist also durchaus möglich. Hier muss allerdings der sehr geringe Probenumfang der Versuche beachtet werden. Dieser konnte allerdings durch den erheblichen Aufwand für die Anfertigung der künstlichen Defekte nicht weiter erhöht werden.

Simulierte Risse

Die Messungen an simulierten Rissen bestätigten die Resultate der Defektart Loch weitgehend. Mit zunehmender Risslänge war ein Absinken der Schallgeschwindigkeit zu beobachten. Dies ist auf die Erhöhung des Weges der Schallwelle zurückzuführen, wodurch sich rechnerisch eine geringere Schallgeschwindigkeit ergibt.

Tabelle 1 zeigt die nach den Regressionsgleichungen ermittelten bzw. gemessenen Schallgeschwindigkeiten in Relation zum Referenzwert der Gesamtverteilung. Die Streuung der Einzelwerte war bei beiden Messgeräten mit Ausnahme von BP 5 bei 5% Rissbreite (Rissabmessung parallel zur Durchschallungsrichtung) gering. Mit BP 5 konnten im Gegensatz zum Impulshammer die Risslängen 10 und 15%, bei 5% Rissbreite nicht differenziert erkannt werden. Sämtliche an den simulierten Rissvarianten gemessenen Schallgeschwindigkeiten waren niedriger als die Referenzwerte der fehlerfreien Proben gleichen Durchmessers. Die Defekte waren mit dem Impulshammer bei 5% Rissbreite ab 30% Risslänge, bei BP 5 ab 38% Risslänge vollständig gesichert zu trennen.

Im Vergleich zur Defektart Loch waren die ermittelten Schallgeschwindigkeiten in Relation zum Referenzwert der fehlerfreien Proben bis 50% Rissbreite beim Impulshammer und bis 25% Rissbreite bei BP 5 geringer abgeschwächt. Ein Einfluss der Rissbreite war erst ab 15% Rissbreite und 70% Risslänge zu beobachten. Zwischen 15 und 50% Rissbreite reduzierte sich die ermittelte Schallgeschwindigkeit bei beiden Messgeräten um etwa 10%.

3.2 Bohrwiderstand

Anhand von Testmessungen ergab sich für die Holzart Fichte als geeignetste Vorschubvariante eine Geschwindigkeit von 15 cm/min – Vorschubstufe 3. Diese Geschwindigkeitsstufe bietet den besten Kompromiss hinsichtlich Auflösung und Bohrgeschwindigkeit sowie genügend Leistungsreserven zur Überwindung auftretender Äste.

Bei den Messungen an fehlerfreiem Holz wurde bis etwa zur dreissigsten Stammscheibe ein von den Stammaussenseiten zum Markröhrenbereich abfallendes Bohrwiderstandsniveau beobachtet (*Abbildung 13*). Dabei wurde die Scheibe 1 (= 40 cm Durchmesser) oberhalb des Fällkerbes entnommen, die Scheibe 60 (=12 cm Durchmesser) am Zopf. Im weiteren Verlauf waren dagegen mehrheitlich keine optisch ausgeprägten Niveauunterschiede feststellbar (*Abbildung 14*). Der mittlere Bohrwiderstand sowie der Verlauf über dem Bohrweg änderte sich also mit der Stammhöhe. Um dies zu untermauern wurde nach *Abbildung 15* das Niveau der Bohrwiderstandseinheiten (BWE) im Bereich des Nadeleintritts (NE) und -austritts (NA) sowie der Markröhre ermittelt. Dabei wurden als ein Bereich die Markröhre zuzüglich des ersten Jahrringes sowie als zweiter der Stammaussenbereich (auf der Nadeleintritts- und Nadelaustrittsseite; in einem Sektor der 1/3 abzüglich 15% vom Stammradius) definiert. *Abbildung 16* zeigt die Ergebnisse. Es ist die deutliche geringere Dichte im Markbereich zu erkennen. Mit steigender Stammhöhe erhöht sich tendenziell der Bohrwiderstand (eventuell auf erhöhte Feuchte und höheren Astanteil/Faserabweichungen zurückzuführen). Äste selbst waren im Bohrwiderstandsprofil durch einen Anstieg des Widerstandsniveaus eindeutig erkennbar (*Abbildung 17*).

Die simulierten Defekte zeichneten sich im Bohrwiderstandsprofil eindeutig ab und waren problemlos identifizierbar (*Abbildungen 18 und 19*). Der Defektdurchmesser kann aus dem Bohrwiderstandsprofil relativ genau abgelesen werden. Bei Defektdurchmessern ab etwa 7 cm sind Verfälschungen durch Aufschwingen der Bohrnadel (fehlende Führung) möglich. Bei einer Defektgrösse von 50% in Relation zum Stammdurchmesser (15,4 cm) musste die Messung infolge des unkontrollierten Bohrverlaufes abgebrochen werden. Ab etwa 200 mm Messentfernung glitt die Bohrnadel am Defektrand entlang (*Abbildung 19*). Dies zeigt das Problem grosser Hohlräume bei der Bohrwiderstandsmessung.

4. Diskussion

Mit Ausnahme der bei BP 5 ab 32 cm Stammscheibendurchmesser zu beobachtenden Trendumkehrung, welche im Widerspruch zu bisherigen Forschungsergebnissen steht (SANDOZ & LORIN 1994; NIEMZ & KUCERA 1999) und für die keine plausible Erklärung gefunden werden konnte, sind die Ergebnisse durch die Frequenz bzw. die unterschiedlichen Grundlagen bei der Schallausbreitung im Holz erklärbar. Sie sind im wesentlichen auf den Einfluss des Stammdurchmessers zurückzuführen und decken sich mit Angaben des Geräteherstellers (siehe auch MATTHECK & BETHGE).

Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass ein relativ geringer Probenumfang verwendet wurde und ein Trend der Eigenschaftsänderung des Holzes als Funktion der Stammhöhe vorhanden ist, der die Ergebnisse etwas überlagert. Der Niveauunterschied zwischen den Labor- und Feldmessungen resultiert aus der höheren Holzfeuchtigkeit der bei den Feldmessungen untersuchten Stämme (bei den Stammscheiben trat eine gewisse Trocknung auf) aber auch auf der natürlichen Variabilität des Holzes. Die Schallgeschwindigkeit wird durch den Quotienten von E-Modul/Rohdichte und die Holz-

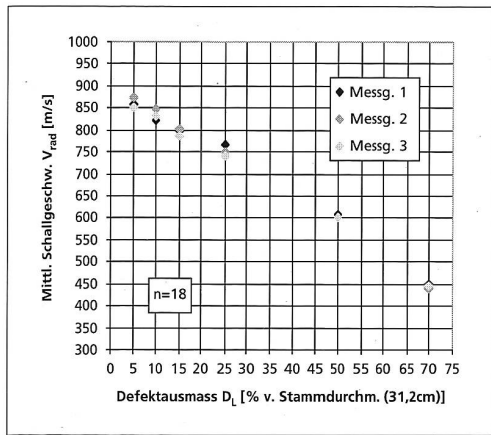


Abbildung 9: Einfluss des Lochdurchmessers auf die Schallgeschwindigkeit (Einzelwerte; mittlere Messentfernung 21,8 cm) für den Impulshammer.

Figure 9: Influence of hole diameter on sound velocity (single values; average measuring distance 21,8 cm) using the Impulshammer.

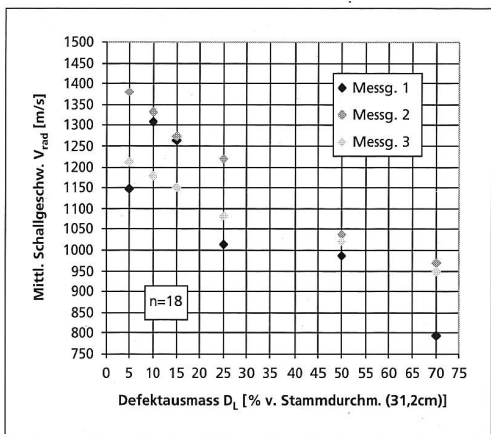


Abbildung 10: Einfluss des Lochdurchmessers auf die Schallgeschwindigkeit (Einzelwerte; mittlere Messentfernung 28,9 cm) für BP 5.

Figure 10: Influence of hole diameter on sound velocity (single values; average measuring distance 28,9 cm) using BP 5.

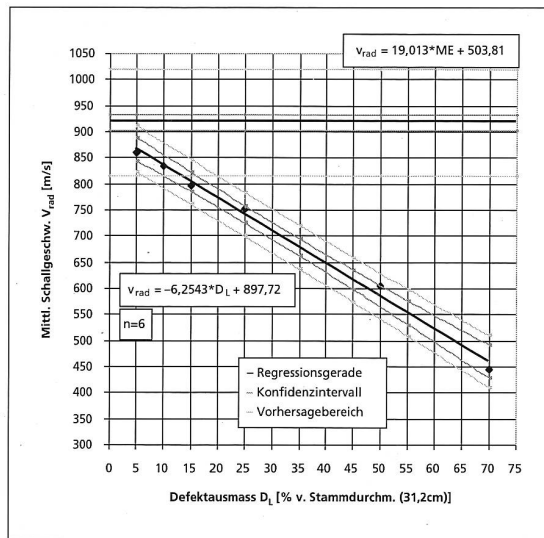


Abbildung 11: Einfluss des Lochdurchmessers auf die Schallgeschwindigkeit (Impulshammer, mittlere Messentfernung ME = 21,8 cm).

Figure 11: Comparative results of holes and reference value of the whole distribution (using the Impulshammer; average measuring distance ME = 21,8 cm).

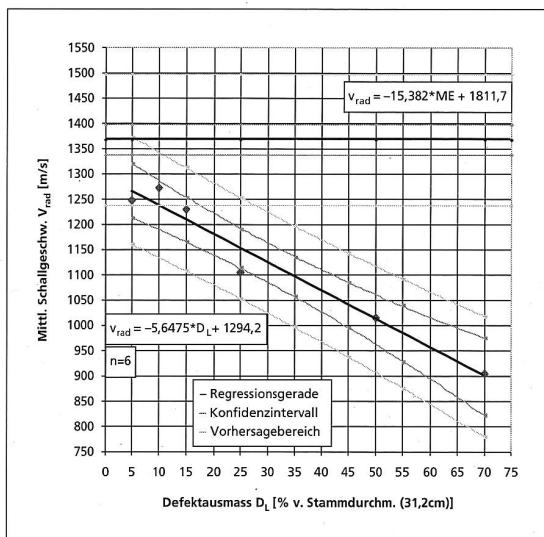


Abbildung 12: Einfluss des Lochdurchmessers auf die Schallgeschwindigkeit für BP 5 (mittlere Messentfernung ME = 28,9 cm; horizontale Linie fehlerfreie Probe).

Figure 12: Comparative results of holes and reference value of the whole distribution using BP 5 (average measuring distance ME = 28,9 cm).

Tabelle 1: Einfluss der Rissbreite und -länge auf die Schallgeschwindigkeit (bezogen auf fehlerfreie Probe) für Messgeräte Impulshammer und BP 5.

Table 1: Impulshammer and BP 5 - Faulty sort of tear, height of sound velocity with different faulty sizes in relation to the reference value free of defect of the whole distribution.

Rissbreite [% (v. Stammdurchm.)]	Risslänge RL [% (v. Stammdurchm.)]	Schallgeschwindigkeit v_{rad} [%] in Relation zum fehlerfreien Holz	
		Impulshammer ($n \cdot v_{rad} = -4,5388 \cdot RL + 868,97$)	BP 5 ($n \cdot v_{rad} = -4,7981 \cdot RL + 1344$)
5	10	94	93
	15	91	91
	25	86	87
	50	73	79
	70	63	72
		($n \cdot v_{rad} = -4,7456 \cdot RL + 872,33$)	($n \cdot v_{rad} = -5,9363 \cdot RL + 1402,3$)
10	15	92	93
	25	87	89
	50	73	78
	70	62	70
		($n \cdot v_{rad} = -5,2655 \cdot RL + 894,41$)	($n \cdot v_{rad} = -5,6593 \cdot RL + 1397,1$)
15	25	90	88
	50	74	78
	70	62	70
25	50	75	75
	70	57	66
50	70	51	61

n = 3 Messungen pro Defektart und -grösse.

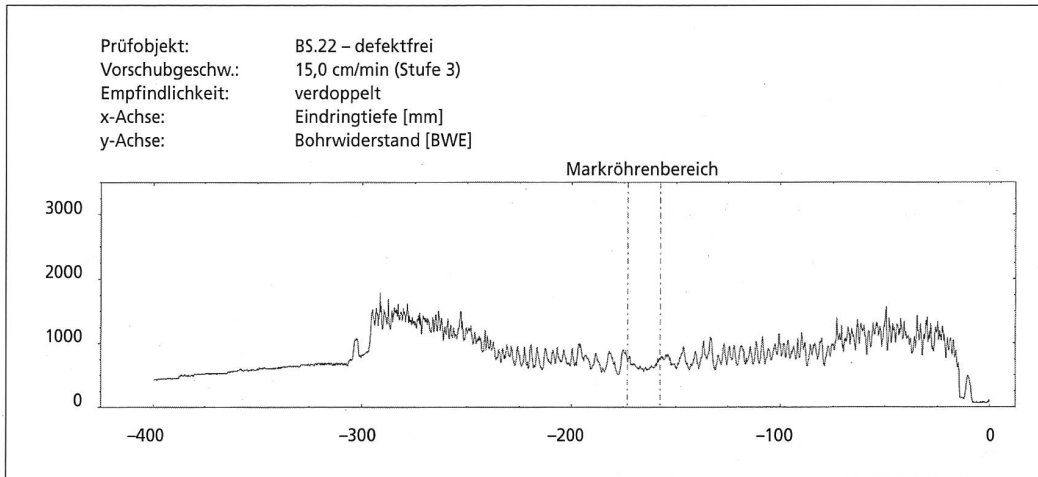


Abbildung 13: Bohrwiderstandsprofil von defektfreiem Holz (Baumscheibe 22).

Figure 13: Drilling resistance profile of defect free wood (tree disc 22).

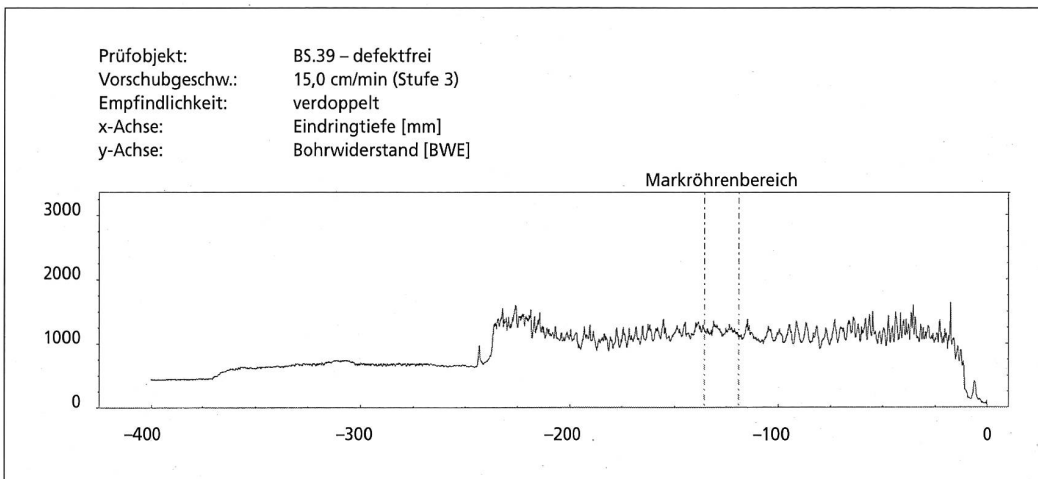


Abbildung 14: Bohrwiderstandsprofil von defektfreiem Holz (Baumscheibe 39).

Figure 14: Drilling resistance profile of defect free wood (tree disc 39).

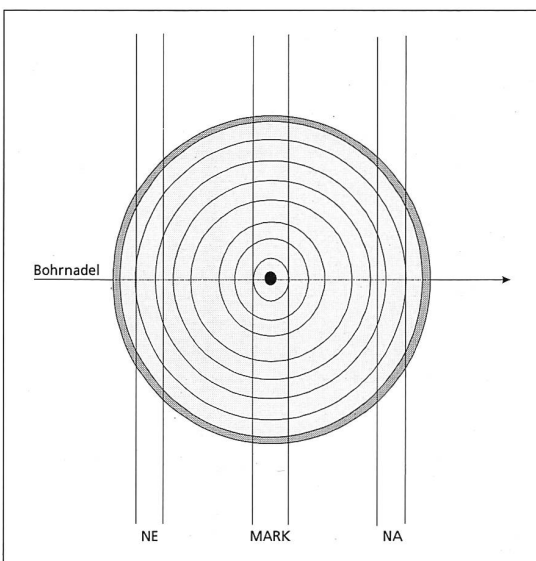


Abbildung 15: Prinzip der Ermittlung der Bohrwiderstandsniveauhöhen.

Figure 15: Determination of the drilling resistance height levels.

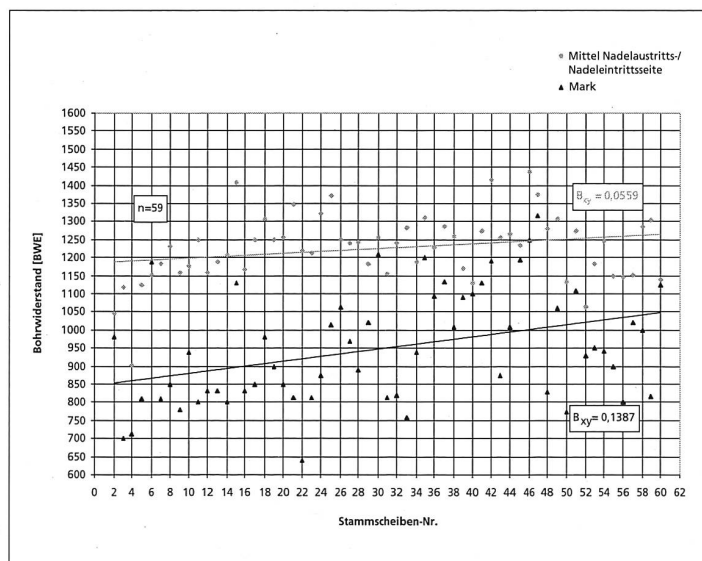


Abbildung 16: Mittleres Bohrwiderstandsniveau in den einzelnen Stammscheiben.

Figure 16: Average drilling resistance level of needle entry and needle resignation side and medullary ray zone in the separate tree discs.

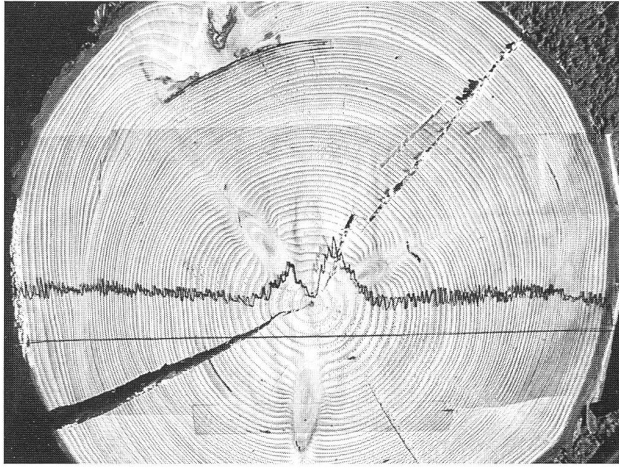


Abbildung 17: Bohrwindstandsprofil bei Vorhandensein eines Astes.

Figure 17: Drilling resistance profile with knot influence.

feuchte beeinflusst. Mit zunehmender Rohdichte steigt sie, mit zunehmender Feuchte sinkt sie. Es müssen also zuverlässige Referenzwerte und deren Streuung durch eine Vielzahl von Messungen ermittelt werden. Dies war aber nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit. Weiterhin müsste geklärt werden, ob eine Differenz zwischen den Messungen am stehenden Stamm und am gefällten Baum (z.B. durch die beim Fällen freigesetzten Wuchsspannungen) vorhanden ist.

Bei den Bohrwindstandsmessungen kann die mit zunehmender Nähe zur Stammspitze zu beobachtende Annäherung zwischen den Bohrwindstandsniveauhöhen im Markröhrenbereich und auf den Stammaussenseiten hauptsächlich auf eine Abnahme des sogenannten Alterstrends, welche mit einer gleichmässigeren Dichteverteilung in radialer Richtung einhergeht, zurückgeführt werden. Die bisher vorliegenden Erkenntnisse stehen im Wesentlichen im Einklang mit den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchung (ECKSTEIN & SASS 1994; RINN 1994).

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Für die Anwendung der getesteten Messgeräte in der Praxis konnten durch die vorliegende Untersuchung zumindest grobe Richtlinien erarbeitet werden. Die Wirkung wesentlicher Einflussfaktoren seitens des Holzes und der Messtechnik (Frequenz, Vorschubgeschwindigkeit) konnte deutlich gemacht werden.

Eine Prognose der zu erwartenden Schallgeschwindigkeit bei bekannter Messentfernung bzw. des zu erwartenden Defektausmasses bei bekannter Schallgeschwindigkeit ist im gewissen Masse möglich. Berücksichtigt werden muss die starke Variabilität zwischen den Bäumen (z.B. Rohdichteschwankungen) sowie auch Feuchteschwankungen. Da die Holzfeuchte im stehenden Baum aber generell auf einem relativ hohen Niveau liegt (im Bereich Fasersättigung und darüber), ist der Einfluss von Feuchteschwankungen geringer.

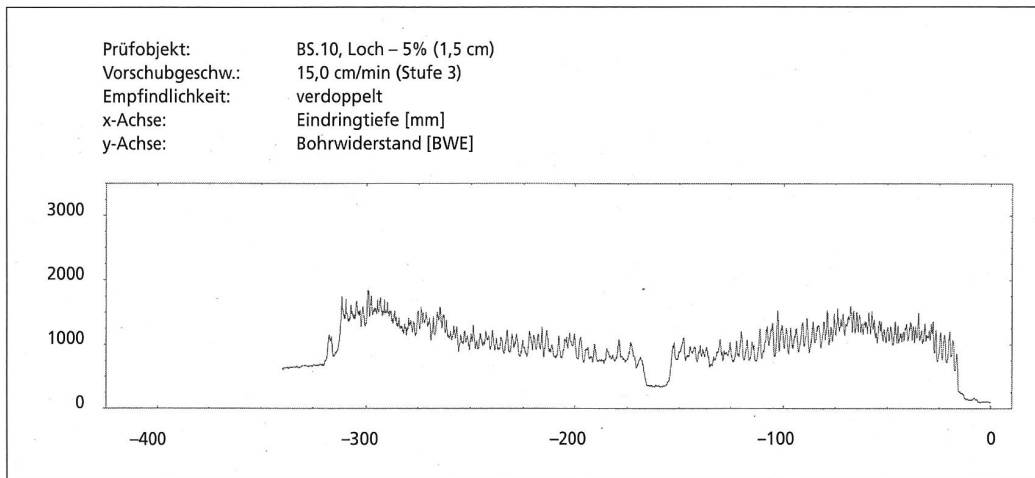


Abbildung 18: Bohrwindstandsprofil bei Holz mit kleinem Loch (Lochgrösse 5% in Relation zum Stammdurchmesser).

Figure 18: Drilling resistance profile of hole (hole size 5% in relation to the tree diameter).

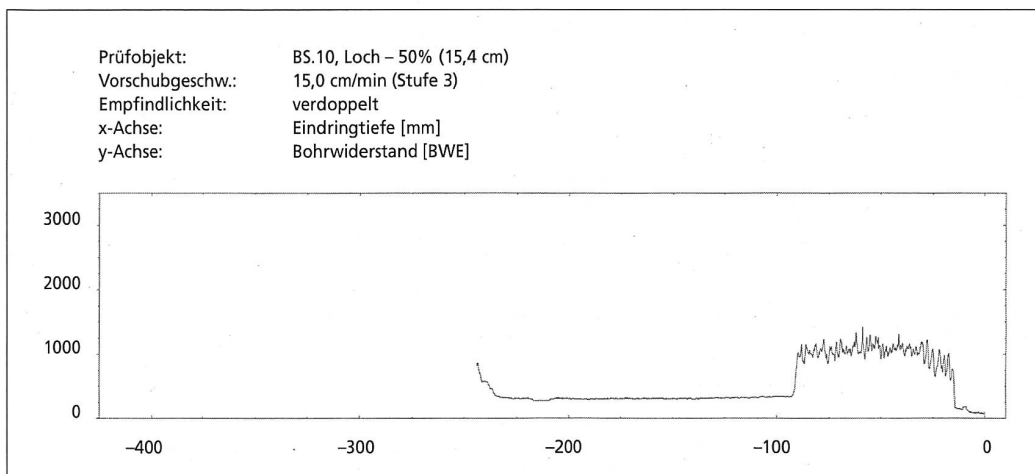


Abbildung 19: Bohrwindstandsprofil bei Holz mit grossem Loch (Lochgrösse 50% in Relation zum Stammdurchmesser).

Figure 19: Drilling resistance profile of hole (hole size 50% in relation to the tree diameter).

Für die Anwendung im Bereich der Baumpflege erwies sich nach der vorliegenden Untersuchung der Impulshammer (300 Hz) im Vergleich zu BP 5 (50 kHz) als das geeignetere Messgerät. Mit ihm war die Durchschallung von Durchmessern ab 60 cm problemlos möglich. Etwas Erfahrungen bedarf beim Impulshammer das zur Auslösung des Schallimpulses erforderliche gleichmässige, kräftige Schlagen mit dem Hammer.

Für Bohrwiderstandsmessungen mit dem Resistograph bieten die Referenzprofile für fehlerfreies Holz und Holz mit definierten Defekten und daneben die mittleren Bohrwiderstandsniveauhöhen eine Richtlinie.

Aufgrund der ergänzenden Eigenschaften beider Verfahren ergibt sich eine optimale Anwendung durch Kombination der entsprechenden Messgeräte.

Somit erscheint es empfehlenswert, eine Problemstelle zunächst mittels Schallmessung, welche grundsätzlich mindestens über Kreuz erfolgen sollte, zu beurteilen und bei entsprechendem Resultat eine zielgerichtete Überprüfung mittels Bohrwiderstandsverfahren durchzuführen.

Die gewonnenen Erkenntnisse können als Basis bzw. Ausgangspunkt für zukünftige Forschungen, welche vor allem für die Schallmessgeräte, speziell im Bereich der fehlerfreien Referenzwerte erforderlich sind, dienen. Insbesondere die aufgeworfenen Fragen zum Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Durchmesser müssen weiter untersucht werden. Ebenso sind grundlegende Untersuchungen sind zum Einfluss von Holzfeuchtigkeit und Temperatur bei Schallausbreitung in radialer Richtung erforderlich.

Für den Resistographen besteht bezüglich des minimal erkennbaren Defektausmasses weiterer Forschungsbedarf. Ansätze hierzu konnte die durchgeführte Untersuchung liefern. Neben den in der Arbeit untersuchten künstlich erzeugten Defekten sind in der Praxis hauptsächlich Holzfäulen, welche sich je nach Pilzart und Abbaucharakteristik in Verbindung mit dem Ausbreitungsmedium unterschiedlich auf die Schallgeschwindigkeit auswirken (SCHWARZE & FINK 1994), bedeutungsvoll. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Zusammenfassung

Bei den Schallgeschwindigkeitsmessungen an fehlerfreiem Holz war mit dem Messgerät Impulshammer bei zunehmender Messentfernung (Stammdurchmesser) ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit zu beobachten. Die mit BP 5 ermittelten Schallgeschwindigkeiten zeigten dagegen in Bezug zur Messentfernung eine uneinheitliche Tendenz. Bis 30 cm war mit zunehmender Messentfernung eine Verringerung, danach ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit zu beobachten. Die mittlere Schallgeschwindigkeit war beim Gerät BP 5 deutlich höher als beim Impulshammer.

Eine Erkennung der simulierten Defekte war mit beiden getesteten Schallmessgeräten möglich. An der Defektart Loch konnten bei Einzelmessungen mit dem Impulshammer Defektgrössen ab etwa 20%, mit BP 5 ab etwa 28% in Relation zum Stammdurchmesser sicher erkannt werden. Im Gegensatz zu BP 5 konnten mit dem Impulshammer bereits Lochgrössen zwischen 5 und 15% in Relation zum Stammdurchmesser differenziert erkannt werden. Zudem war die Streuung der Einzelwerte beim Messgerät Impulshammer geringer.

Die Messungen an der Defektart Riss bestätigten die Resultate der Defektart Loch weitgehend. Ein Einfluss der Rissbreite (parallel zur Durchschallungsrichtung) war erst ab 15% Rissbreite und 70% Risslänge (senkrecht zur Durchschallungsrichtung) zu beobachten. Zwischen 15 und 50% Rissbreite reduzierte sich die ermittelte Schallgeschwindigkeit bei beiden Messgeräten um etwa 10%.

Anhand der Bohrwiderstandsmessungen konnte zunächst der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit deutlich gemacht werden. Durch die Untersuchung konnten entsprechende Referenzprofile und Referenzwerte für fehlerfreies und defekthaltiges Fichtenholz erarbeitet werden. Neben den simulierten Defektgrössen waren auch Harztaschen unter einem Millimeter eindeutig identifizierbar.

Résumé

Utilisation de la vitesse du son et de la résistance à la pénétration dans l'évaluation de défauts simulés dans le bois d'épicéa

L'utilisation de l'appareil de mesure de la vitesse du son «Impulshammer» (un marteau à impulsions), a permis d'observer, dans le cas de bois sans anomalies, une augmentation de la vitesse corrélée avec une augmentation de la distance entre l'émetteur et le récepteur (diamètre de la bille). Dans le cas d'un autre appareil, le «BP 5», les vitesses mesurées ont montré une corrélation irrégulière en fonction de la distance entre les points de mesure. Lors d'une augmentation de cette distance, la vitesse du son a diminué jusqu'à 30 cm de diamètre, puis a augmenté pour des distances supérieures. La vitesse moyenne de l'onde de choc a été nettement supérieure avec l'appareil BP 5 par rapport au marteau à impulsions.

Les défauts créés artificiellement dans le bois (cavités, fissures) ont pu être détectés avec les deux appareils. Le marteau à impulsions a permis de détecter de manière certaine les cavités à partir d'un diamètre équivalent à 20% du diamètre de la bille, alors que le BP 5 les a repérées à partir de 28%. Le marteau à impulsions a permis, contrairement au BP 5, de reconnaître de façon différenciée des cavités aux diamètres compris entre 5 et 15% du diamètre de la bille. De plus, la dispersion des valeurs obtenues a été bien plus faible avec cet instrument de mesure.

Les mesures effectuées pour les fissures ont confirmé les résultats obtenus pour les cavités. Une influence de la largeur de la fissure (parallèlement au sens de la mesure) n'a été perceptible qu'à partir d'une largeur équivalant à 15% de la largeur totale et à 70% de la longueur (perpendiculairement au sens de la mesure). Pour les deux appareils de mesure, la vitesse du son a été réduite d'environ 10% pour des largeurs de fissures comprises entre 15 et 50%.

L'influence de la vitesse d'avancement de l'aiguille a d'abord pu être mise en évidence lors des mesures de résistance à la pénétration. L'étude a ensuite permis l'obtention de profils et de valeurs de référence pour des bois d'épicéa avec et sans défauts. Les poches de résine inférieures à 1 mm ont pu, en plus des défauts simulés, être identifiées sans problèmes.

Traduction: PATRICE ESCHMANN

Summary

Use of sound velocity and drilling resistance to evaluate simulated defects in Norway spruce

Using the instrument, Impulshammer (stress waves), to measure sound velocity in defect free wood we observed an increase in sound velocity with increasing measuring distance. By contrast, sound velocity determined with BP 5 showed an irregular correlation in relation to the measuring distance. With increasing measuring distance, a decrease in sound velocity resulted at a distance of up to 30 cm, and farther than 30 cm an increase was observed. Average sound velocity with BP 5 was clearly higher than with the Impulshammer. Taking test conditions into account the compiled equations and prediction areas enabled us to foretell sound velocity with known measuring distance. This ability is a great service in practical work.

We were able to distinguish two different kinds of simulated defects (holes and cracks) with both instruments. Single measurements of holes with the Impulshammer showed fault sizes of approximate 20%; the BP 5 clearly recognized faults of approximate 28% in relation to the tree diameter. In contrast to BP 5, with the Impulshammer hole sizes were recognized and differentiated already between 5 and 15% in relation to the tree diameter. Moreover, the dispersion of single values was lower when measured with the Impulshammer.

Measurements of cracks largely confirm the results of the hole measurements. An influence of the width of the crack (measured parallel to the propagation direction of the acoustic waves) was only observed after 15%, and after 70% of the length of the crack (measured vertically to propagation direction). At between 15% and 50% crack width, the determined sound velocity fell by approximate 10% with both measuring instruments.

The executed drilling resistance measurements made clear the influence of the feed rate. The examination made it possible to compile reference profiles and reference values of faulty spruce and defect free spruce. In addition to the simulated fault sizes we were able to precisely identify resin pockets below one millimetre.

Literatur

- ECKSTEIN, D., SASS, U. (1994): Bohrwiderstandsmessung an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation. Holz als Roh- und Werkstoff 52: 279–286.
- KUCERA, L.J., NIEMZ, P. (1998): Fäule in Bäumen erkennen. Wald und Holz 79,2: 27–30.
- MATTHECK, C., BETHGE, K. (s.d.): Impulshammer IML – Gebrauchsanweisung und Gewährleistungsbestimmung. IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Wiesloch. 9 S.
- NIEMZ, P. (2001): Innere Defekte von Bäumen in Holz mit Schall bestimmt. Holz-Zentralblatt 126: 169–171.
- NIEMZ, P., KUCERA, L.J. (1999): Erkennung von Defekten in Bäumen mittels Schall. Stadt und Grün 11: 758–762.
- QUIS, D. (1999): Vibrational and acoustical experiments on logs of Spruce. Wood Science and Technology 33: 151–184.
- RINN, F. (1994): Typische Resistograph-Bohrwiderstandsprofile stehender Bäume und ihre Erklärung. Skript zum Vortrag auf den Godesberger Gehölztagen. März 1994.
- SANDOZ, J.L., LORIN, P. (1994): Evaluation de l'état physico-mecanique de l'arbre sur pied par ultrason. Protocole de mesures. EPFL, Chaire de construction en bois, IBOIS, Lausanne.
- SCHWARZE, F., FINK, S. (1994): Die Ermittlung der Holzersetzungsmuster am lebenden Baum. Neue Landschaft: 182–193.

Autoren

Dr. Ing.-habil. PETER NIEMZ, ETH Zürich, Departement Forstwissenschaften, Professur Holzwissenschaften, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.
 Prof. Dr. Dr. habil. CLAUS-THOMAS BUES, Technische Universität Dresden, Institut für Forstnutzung und Forsttechnik, Professur Forstnutzung, Pienerstrasse 19, DE-01735 Tharandt.
 Dipl.-Forstw. STEFFEN HERRMANN, ETH Zürich, Departement Forstwissenschaften, Professur Holzwissenschaften, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.