

# Holzanatomische Grundlagen der Schalltomographie an Bäumen

DIPL.-PHYSIKER FRANK RINN

Die Schalltomographie eröffnet durch die Erzeugung farbiger Flächenbilder einen umfassenderen Blick in das Innere von Bäumen als dies punktuelle Messungen erlauben. Diplom-Physiker Frank Rinn aus Heidelberg führt mit diesem Beitrag in die holzanatomischen Grundlagen ein.

**H**olzzustand und -qualität bestimmen die Geschwindigkeit von Schallwellen im Stamm. Fäulen und Risse bremsen die Ausbreitung. Zweipunkt-Schall-Laufzeitmessungen erfolgen daher seit Jahrzehnten zur Holzanalyse. Tomographische Systeme erweitern diese Methode: Je nach Anwendung werden bis über 20 Sensoren am Baum angebracht, um die Schall-Laufzeit zwischen ihnen zu messen. Farbige Flächenbilder (Tomogramme) sollen den inneren Zustand der Bäume anschaulich darstellen. Hinter dem einfach klingenden Messprinzip stecken jedoch nicht nur technische, sondern auch einige komplexe holzanatomische Grundlagen.

## Einleitung

Nicht nur bei Straßen- und Parkbäumen, auch an Wertbäumen im Forst werden im Bedarfsfalle technische Geräte eingesetzt, um den inneren Zustand genauer zu ergründen. Wer Diagnosegeräte an Bäumen einsetzen oder beauftragen möchte, sollte



Erschütterungssensor im schlag- und spritzwasserfesten Gehäuse mit Schlagstift (links oben), Nagel-Halterung (rechts oben) und Steck-Kabel-Anschluss.

jedoch nicht nur die technischen, sondern auch die holzanatomischen Grundlagen kennen und verstehen – zumindest in Ansätzen. Nur dann können Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der Geräte beurteilt werden (Brandt et al. 1989). Schall-Laufzeiten werden bereits seit etlichen Jahren zur Inspektion und zur Qualitäts-Sortierung von Holz verwendet (Hoyle & Pellerin 1978, Gerhards 1982). Auf dieser Grundlage arbeiten auch neuere tomographische Systeme, welche farbige Querschnittsbilder liefern.

## Messvorgang

Der Impulstomograph besteht aus einer Kette von hochsensiblen Erschütterungssensoren. Zur Messung brauchen sie einen festen Kontakt zum Holz. Daher werden sie mittels dünner Stifte an den interessierenden Stellen am Baum befestigt. Anschließend erfolgt die Eingabe ihrer Position in einem Computerprogramm.

Eine Graphik im Programm zeigt die geometrische Verteilung der Sensoren um den jeweiligen Stammquerschnitt herum. Anschließend wird mit einem kleinen Hammer in kurzer Folge mehrfach auf jeden Sensor geklopft. Dadurch entstehen mechanische Impulse, ausgehend vom Schlagpunkt. Start und Ankunft dieser Impulse werden von den jeweils anderen Sensoren registriert. Die daraus ermittelte Laufzeit wird automatisch an einen tragbaren Computer übertragen. Bei zum Beispiel jeweils



Die Sensoren können an beliebigen Stellen des Stammes angebracht werden. Nach Montage und Positionseingabe wird mit einem normalen kleinen Hammer auf den Schlagstift auf der Rückseite der Sensoren geklopft. Die dadurch entstehenden Impulse laufen durch das Holz. Ihre Ankunft wird von den anderen Sensoren festgestellt. Die ermittelten Laufzeiten erscheinen simultan als Tabelle und Farbgraphik am angeschlossenen PC.

5 Schlägen auf 10 Sensoren entstehen so insgesamt 5 x 9 Messwerte pro Sensor, insgesamt also 450. Diese Werte werden tabellarisch und graphisch angezeigt.

### Funktionsprinzip

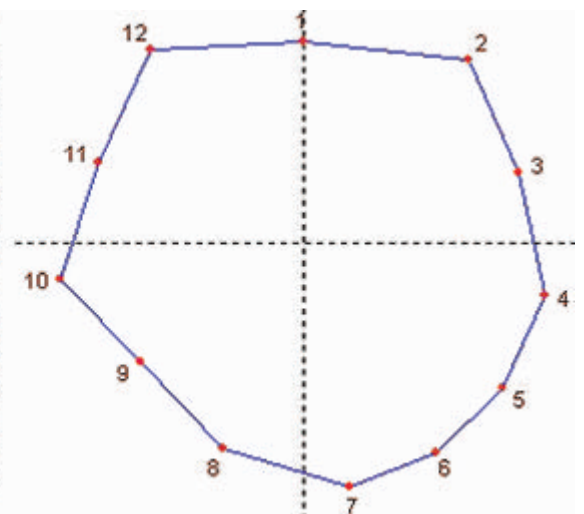
Intaktes Holz leitet den Schall schneller, als geschädigtes. Liegt ein Hindernis (Fäule, Riss oder Höhlung) zwischen Sender und Empfänger des Impulses, muss die Welle



Linden-Stammsscheibe mit Höhlung und zwölf angebrachten Sensoren.

langsam hindurch oder einen Umweg machen. Gemessen wird die Laufzeit der Impulse zwischen den Sensoren. Sie hängt ab von der Geschwindigkeit, mit der sich der Impuls durch das Holz bewegt, und vom

Sensor	Height [cm]	Diff [cm]
1	10,00	35,00
2	10,00	25,00
3	10,00	25,00
4	10,00	20,00
5	10,00	18,00
6	10,00	18,00
7	10,00	27,00
8	10,00	27,00
9	10,00	23,00
10	10,00	25,00
11	10,00	25,00
12	10,00	32,00



Ausschnitt aus Tabelle und Graphik für die Sensor-Positionen – entweder über ihre Lage auf dem Umfang oder über den Abstand (Diff) zum Nachbarsensor.

Weg, den der Impuls genommen hat. Beides ist nicht bekannt:

$$\text{Laufzeit} = \text{Weg} / \text{Geschwindigkeit}$$

Daher wirkt diese Gleichung ausweglos: Sie besteht aus einem gemessenen Wert (Laufzeit) und zwei unbekannt Größen (Geschwindigkeit und Wegstrecke). Mathematisch betrachtet gibt es keine Lösung. Dennoch gelingt es, aus solchen Messungen relativ genaue Rückschlüsse auf den Zustand des Holzes zu ziehen – aber nur, wenn man viele Messungen mit verschiedenen Sendern und Empfängern macht.

Aufbauend auf Erkenntnissen über die Ausbreitung von mechanischen Impulsen in Holz, gelingt es dann mittels logischer Schlüsse, den inneren Zustand von Bäumen mit beachtenswerter Genauigkeit zu rekonstruieren.

Die Genauigkeit des Messgerätes ist dabei viel größer, also die höchstmögliche Genauigkeit der Tomogramme, weil die Schwankungen durch natürliche Eigenschaften des Holzes größer sind. Verständlich werden diese Vorgänge nach einer Betrachtung insbesondere der holzanatomischen Grundlagen der Schallausbreitung in Bäumen.

### Schall-Laufzeiten in Holz

Ein Hammerschlag auf Holz erzeugt zunächst eine mechanische Verformung. Je nach Härte des Schläges und des Materials entsteht eine Delle (dauerhafte, plastische Verformung) oder das Holz kehrt ganz oder teilweise wieder in seine ursprüngliche Form zurück (elastische Verformung). Anschließend breitet sich eine (elastische) Verformung im Holzkörper aus (ähnlich ei-

ner Welle im Wasser). In dieser Welle steckt ein Teil der Energie, die das Holz mit dem Hammer-Schlag aufgenommen hat. Diese Stoßwelle (= Impuls) bewegt sich durch das Holz und nimmt dabei mit der Entfernung in ihrer Intensität ab. Dies führt letztlich zu einer leichten Erwärmung des Materials. Schall-Wellen in Holz sind periodisch wiederkehrende, anwachsende und abnehmende, mechanische Impulse bzw. Einzelstoß-Wellen.

Beim Schall-Tomographen wird die Laufzeit gemessen, die die einzelnen mechani-



schen Impulse (Stoßwellen) von einem zum anderen Sensor durch das Holz benötigen. Es handelt sich streng genommen daher nicht um einen Schall-, sondern um einen

Eine vollständige Beschreibung der gegenseitigen Abhängigkeiten der verschiedenen Holzeigenschaften würde Bücher füllen. Wie wichtig der Einfluss einzelner Fak-

radiale Trends der Dichte verschiedener Holzarten sind in den Profilen der elektronisch gesteuerten und linear skalierten Resistograph-Bohrwiderstandsmessgeräte dokumentiert (Rinn 1988, 1994, 1996).

Eine steigende **Holzfeuchte** erhöht (bei einheimischen Hölzern) die Dichte, erniedrigt aber die E-Modul-Werte. Sie hat damit einen entscheidenden, doppelten Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit. Die Holzfeuchte ändert sich besonders im radialen Profil und ist in den äußeren Stammbereichen meist deutlich höher, als im Inneren. Während im Splintholz in der Wachstumsperiode über 100 % relative Holzfeuchte üblich ist, liegen die Werte im Inneren deutlich darunter. Eine relative Holzfeuchte von über 100 % bedeutet, dass mehr Wassermasse pro Volumeneinheit vorhanden ist als Holzmasse – in diesem Falle sind also nicht nur die Fasern mit Wasser gesättigt, sondern auch die Innenräume der Zellen weitgehend gefüllt. Nasskerne mit extrem hohen Holzfeuchtwerten im Inneren eines

Holzeigenschaft	Bestimmt durch	Grundlage	Faktoren
Dichte	Holzstruktur	Baumart	Konkurrenz, Pflege,
E-Modul	Jahrringbreiten	Standort	Boden, Düngung,
Holzfeuchte	Vegetationsperiode	Jahreszeit	Niederschlag, Temperatur,
Temperatur	Wetter	Klima	Sonneneindauer, ...

#### Vereinfachende Übersicht zu bestimmenden Faktoren für Schallmessungen in Holz

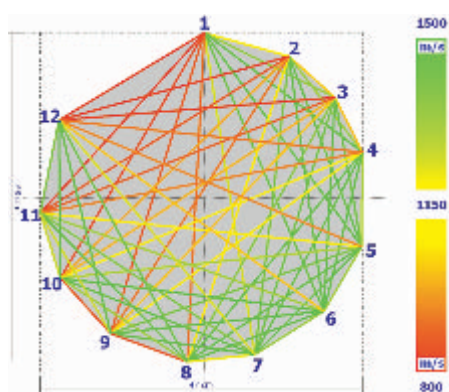
mechanischen Impuls-Tomographen. Der vereinfachende Begriff „Schalltomographie“ hat sich jedoch eingebürgert (Niemz 2001).

### Holzanatomie und Physik

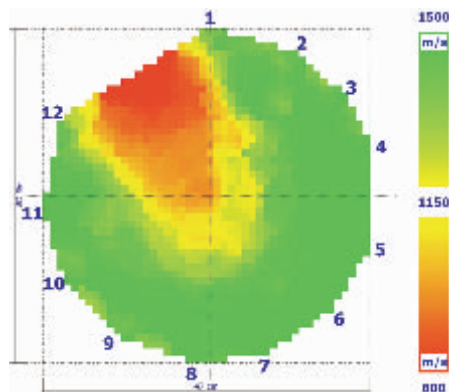
Die mechanische Impuls- bzw. Schallgeschwindigkeit in Holz kann im Prinzip aus

toren ist, sei hier an einigen einfachen Beispielen verdeutlicht.

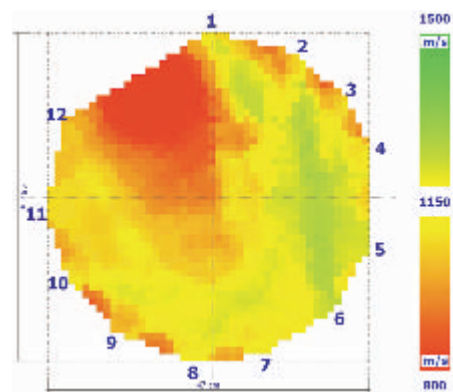
**Dichte und E-Modul:** Im Inneren einer Eiche ist das Holz oftmals wesentlich dichter und fester, als in äußeren Stammbereichen. Der Unterschied beträgt mitunter über 20 oder 30 %. Bei Fichten ist dieser (radiale) Trend umgekehrt, dort ist die Holz-



**Arbotom-Liniengraphik.** Die Linienfarbe veranschaulicht die gemessene Schallgeschwindigkeit zwischen den damit verbundenen Sensoren. Die nebenstehende Skala zeigt die Zuordnung von Farbe zu Meßwert. Die Liniengraphik enthält damit keinerlei Bewertung, sondern entspricht lediglich einer graphischen Anzeige der gemessenen Werte.



Aus der Liniengraphik automatisch vom Programm errechnetes Arbotom-Querschnittbild (Schall-Tomogramm). Die mathematischen Algorithmen berücksichtigen dabei die baumart-spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Holzes und der Querschnittform.



So sieht das aus der Liniengraphik automatisch errechnete Schall-Tomogramm aus, wenn die spezifischen holzanatomischen Eigenschaften der gemessenen Baumart nicht berücksichtigt werden. Das Bild passt nicht zum Zustand des Holzes, womit deutlich wird, wie groß die Einflüsse der Holzanatomie sind.

Dichte (d) und Steifigkeit (E-Modul E) des Materials berechnet werden:  $v = (E/d)$ . Diese einfache Berechnung täuscht leicht über komplizierte, dahinter stehende Zusammenhänge hinweg: das E-Modul, zum Beispiel, hängt u. a. von der Dichte des Holzes ab, beide Kenngrößen wiederum sind beeinflusst von der Holzfeuchte. Die Schallausbreitung im komplexen Faser-Verbundstoff Holz hängt somit von vielen verschiedenen Faktoren ab. Diese Abhängigkeiten werden zwar bei der automatischen Berechnung des farbigen Querschnittbildes im Computerprogramm berücksichtigt. Dennoch sollten sich Anwender diese Zusammenhänge verdeutlichen.

dichte im Inneren oft deutlich niedriger als außen. So hat jede Holzart ihre typischen mittleren radialen Trends der Dichte (und der E-Moduli). Dies beeinflusst die Schallausbreitung und ist bei der Bewertung gemessener Schallgeschwindigkeiten zu berücksichtigen.

Ursache dieser radialen Veränderungen der Dichte ist die meist von innen nach außen im Durchschnitt abnehmende Jahrringbreite, der sogenannte Alterstrend. Da breite Jahrringe in Eiche meist dichter sind als enge (bei Fichten umgekehrt), entsteht ein baumart-spezifischer radialer Trend. Bei Linde und Platane ist der Verlauf wiederum anders ausgestaltet. Typische stamm-

Stammes wirken sich in der Folge ebenso stark auf die Schallgeschwindigkeit aus.

Die **Holzfeuchte** ändert sich nicht nur innerhalb des Stammes, sondern auch mit Klima und Wetter sowie dem Stand der jeweiligen Vegetationsperiode. Im Frühjahr werden deutlich höhere Werte gemessen, als im Herbst oder Winter. Schallmessungen aus verschiedenen Jahreszeiten bzw. verschiedenen Stadien der Vegetationsperiode führen also am selben Baum mitunter zu unterschiedlichen Ergebnissen, wenn man die absoluten Messwerte betrachtet.

**Jahrringbreiten/Zuwachsniveau:** Die Schallgeschwindigkeit in schnell gewachsenem, intaktem Eichenholz mit breiten

Jahrringen ist deutlich höher als in langsamer gewachsenem (mit entsprechend engeren Jahrringen). Bei Fichten ist ein umgekehrtes Verhältnis festzustellen: je langsamer das Holz gewachsen ist, umso höher ist meist die Schallgeschwindigkeit (weil in den engeren Jahrringen meist ein höherer Anteil an festerem Spätholz vorhanden ist). So können Messungen an der gleichen Baumart auf unterschiedlich wüchsigen Standorten zu verschiedenen Messwerten im intakten Holz führen.

Dies stört jedoch nicht die Auswertung der Messung an einem Baum. Die Bewertung intakter und geschädigter Bereiche erfolgt automatisch aufgrund einer Analyse der relativen Unterschiede zwischen hohen und niedrigen Schallgeschwindigkeiten. Ob diese insgesamt auf einem hohen oder niedrigeren Niveau liegen, wirkt sich dabei kaum aus.

**Holzstruktur:** Holz ist ein komplexer Faserverbundstoff, im wesentlichen aufgebaut aus Lignin, Zellulose und Hemi-Zellulose. Nadelhölzer bestehen im wesentlichen aus einer Sorte Zellen. Die strukturellen Unterschiede innerhalb eines Nadelbaum-Stammes gründen hauptsächlich in den Unterschieden weicher Früh- und festerer Spätholzbereiche der Jahrringe. In Laubhölzern kommen weitere Zellsorten hinzu: insbesondere große Gefäße für den Wassertransport (längs zum Stamm) und große radiale Holzstrahlen. Je nach Baumart sind die Gefäße in den Jahrringen ringförmig oder zerstreut verteilt (es gibt auch Zwischenvarianten). Anzahl, Größe und Verteilung der Gefäße sind abhängig u. a. von Umweltbedingungen, von Standort und Klima. Häufigkeit und Ausprägung von Holzstrahlen wiederum unterscheiden sich sehr zwischen den Holzarten.

Welch enormen Einfluss die Holzstruktur auf die Schallgeschwindigkeit hat, sieht

man an einfachen Relationen: in Längsrichtung zu den Fasern (und zum Stamm) läuft der Schall je nach Holzart 2- bis 5-mal schneller als in Querrichtung. Deutliche Unterschiede gibt es auch zwischen der Ausbreitung in radialer und in tangentialer Richtung (wiederum abhängig von der Baum-Art). Diese hier beschriebenen Strukturunterschiede werden bei der programm-internen Analyse der gemessenen Schalllaufzeiten automatisch berücksichtigt.

## Möglichkeiten und Grenzen

Viele holzanatomische Faktoren beeinflussen die Schallausbreitung im Stamm. Für die tomographische Zustandserfassung reicht es aus, relative Unterschiede zu betrachten zwischen den „guten“ und den weniger guten Bereichen im untersuchten Abschnitt. In einem Baum, der noch steht, sollte es zumindest noch ein paar Bereiche intakten Holzes geben. Wenn der Weg zwischen mindestens zwei Sensoren durch intaktes Holz verläuft, gibt es damit mindestens einen Referenzwert der Schallgeschwindigkeit für intaktes Holz in diesem Baum. Anhand solcher Referenzwerte werden die Abweichungen in geschädigten Bereichen des gleichen Querschnitts vom Programm automatisch bewertet. Da alle Messwerte im Programm angezeigt werden und bei Bedarf überprüfbar sind, kann der Weg der automatischen Auswertung des Programms Schritt für Schritt nachvollzogen werden.

Die Schalltomographie eröffnet damit einen umfassenderen Blick in das Innere von Bäumen, als dies punktuelle Messungen erlauben, ersetzt diese aber nicht in allen Fällen. Anhand des Tomogramms kann direkt am Baum entschieden werden, ob ggf. an einzelnen Stellen noch Bohrwiderstandsmessungen erforderlich sind, um zum Bei-

spiel die dünnste Restwandstärke präzise zu vermessen oder Zuwachstrends zu beurteilen.

Die farbigen Querschnittsbilder stellen darüber hinaus eine anschauliche Grundlage für Gutachten dar, um die Bewertung des Baumes zu erläutern, die eigene Arbeit zu dokumentieren und abzusichern.

## LITERATUR:

Brandt, M., und F. Rinn (1989): Der Blick ins Innere von Bäumen. Eine Übersicht über Verfahren zur Stammfäulediagnose. Holz-Zentralblatt 124: (80) 1268, 1270.

Gerhards, C. C. (1982): Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art. Forest Products Journal 32 (2).

Hoyle, R. J., Jr. and R. F. Pellerin (1978): Stress wave inspection of a wood structure. Fourth Nondestructive Testing of Wood Symposium, Vancouver, WA.

Niemz, Peter (2001): Innere Defekte von Bäumen mit Schall bestimmt. Holz-Zentralblatt 26. 1. 2001 (12), S. 169–171.

Rinn, F. (1988): Eine neue Methode zur Messung von Jahrringparametern. Universität Heidelberg, 85 Seiten.

Rinn, F. (1989): Eine neue Bohrmethode zur Holzuntersuchung. Holz-Zentralblatt 115, (34): 529–530.

Rinn, F. (1994): Baum- und Bauholz-Inspektionen mit Resistograph. Anwendung, Auswertung, Messprofile und ihre Interpretation. Proc. NDE-Symposium, Sopron, Ungarn.

Rinn, F., F.-H. Schweingruber, E. Schär (1996): Comparative evaluation of drill resistance profiles and x-ray density charts of different wood species. Holzforschung Vol. 50 (1996) pp. 303–311.