

Zitieren als: Rust, S.: Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung. In: Roloff, A. (Hrg.) Baumpflege. 2008, Ulmer, Stuttgart. Leicht überarbeitete Fassung.

Geräte und Verfahren zur eingehenden Baumuntersuchung

Steffen Rust

Wenn bei der Regelkontrolle zur Überprüfung der Verkehrssicherheit Schadsymptome festgestellt werden, deren Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit nicht abschließend beurteilt werden können, muss eine Untersuchung durch Fachkräfte erfolgen, die meist Geräte zur Diagnose einsetzen. Die Auswahl an Geräten ist groß und für den Anwender oft unübersichtlich.

1 Untersuchung der Verkehrssicherheit

Mithilfe der eingesetzten Geräte soll ermittelt werden, ob der Baum oder seine Teile innerhalb des nächsten Kontrollintervalls versagen könnten. Jedoch können weder die Stand- noch die Bruchstabilität gemessen werden, sie werden durch die verschiedenen hier besprochenen Verfahren lediglich abgeleitet. Diese Ableitung ist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, die sowohl die Festigkeit des Stammes, die nicht zerstörungsfrei gemessen werden kann, als auch ganz besonders die dynamischen Lasten betreffen.

Bei denjenigen Verfahren, die Messwerte erheben, sind die Beziehungen zwischen diesen und den Materialeigenschaften des Holzes oft sehr komplex, mit unbekanntem Fehler behaftet und für den normalen Anwender kaum nachvollziehbar. Die Geräte messen z. B. Eindringwiderstände, Schallgeschwindigkeiten, Bruchfestigkeiten von Bohrspänen oder die Dehnung der Randfaser bei definierter Belastung des Baumes. Der Anwender muss i. d. R. von diesen gemessenen Größen auf die Festigkeit des Holzes schließen und aus diesen dann Tragfähigkeiten oder Restwandstärken schätzen. Bei der Auswertung der Zugversuche wird die Tragfähigkeit mit der geschätzten Windlast verglichen, um so Bruch- oder Standsicherheiten zu

schätzen.

Nur die wenigsten Verfahren liefern die für die Einschätzung der Sicherheit tatsächlich erforderlichen Informationen. Soll z. B. die Bruchstabilität eines Querschnittes aus der räumlichen Anordnung des Materials und seiner Festigkeit bestimmt werden, so benötigt man diese mit hinreichender räumlicher Auflösung. Auch für das Knickversagen wird die Geometrie der verbleibenden Restwand benötigt. Die gängigsten Verfahren messen jedoch nur ein-dimensional, daher liegen die Daten nicht in der für weitere Abschätzungen erforderlichen Auflösung vor.

Da die Geometrie eines Schadens sehr viel leichter zu ermitteln ist als die räumliche Verteilung der Holzfestigkeit, beschränken sich die meisten Gutachter darauf, empirische Grenzwerte für den Tragfähigkeitsverlust aufgrund der räumlichen Verteilung des verbleibenden Holzes anzuwenden (z. B. Wagners 1963, Smiley u. Fraedrich 1992, Mattheck u. Breloer 1993). Bei Anwendung der VTA-Methode kommt man für freistehende, vollbekrönte Bäume mit zentraler Fäule auf diesem Weg zu der erforderlichen Versagenswahrscheinlichkeit: Bäume mit einem $\frac{t}{R}$ -Verhältnis über 0,32 haben danach eine Versagenswahrscheinlichkeit von 0. Gutachter müssen allerdings sehr oft Bäume in Gruppen oder mit reduzierten Kronen beurteilen, auf die dieser auch sonst umstrittene Grenzwert (Gruber 2007) nicht anwendbar ist.

2 Verfahren zur Untersuchung der Bruchstabilität

Für den Anwender ist es häufig wichtig, dem Auftraggeber oder anderen Zielgruppen das Ergebnis

seiner Diagnose bildhaft zu verdeutlichen. Trotzdem gibt es eine Reihe durchaus verbreiteter Verfahren, die kein Abbild des Zustandes eines Baumes liefern. Dazu gehören beispielsweise Zugversuche und eindimensionale Schallverfahren sowie die Fractometer. Die am häufigsten in der Praxis verwendeten Verfahren sind allerdings solche, die den Zustand des Baumes in einer oder zwei Dimensionen abbilden.

2.1 Schall- und Ultraschallgeräte

Schall- und Ultraschallverfahren messen die Laufzeit, die ein Signal durch den Baum hindurch braucht. Ultraschallgeräte nutzen dazu Frequenzen oberhalb von 20 000 Hz. Der Durchmesser des gemessenen Baumes kann bei Verwendung von Schall mehrere Meter erreichen. Da der tatsächliche Weg des Schalls/Ultraschalls durch den Baum unbekannt ist, wird aus der Laufzeit und der direkten Distanz zwischen Quelle und Sensor eine fiktive Geschwindigkeit berechnet. Die meisten Schäden, welche die Bruchsicherheit von Bäumen beeinträchtigen, insbesondere Höhlungen und Fäulen, vermindern Dichte und/oder E-Modul des Holzes. Da die Geschwindigkeit im Holz unter anderem von diesen Holzeigenschaften abhängt, weist eine Verringerung der Geschwindigkeit auf das Vorhandensein eines Defektes hin. Die Schall- und Ultraschalltomographen stellen die geschätzte Verteilung der Geschwindigkeiten über den vermessenen Baumquerschnitt farbige dar.

2.1.1 Eindimensionale Schall- und Ultraschallgeräte

Für die einfache Schallgeschwindigkeitsmessung an Bäumen gibt es eine ganze Reihe von Geräten, z. B. Impulshammer und Metriguard Stress Wave Timer. Zurzeit werden unseres Wissens zwei Geräte auf Ultraschallbasis vertrieben (Silvatest und Arbasonic Decay Detector).

Messprinzip Bei den Schallgeräten wird das Schallsignal durch das Schlagen mit einem Hammer oder einem Pendel auf eine Schraube erzeugt und durch dicke Schrauben ein- und ausgekoppelt, die 2-5 cm in das Splintholz gedreht werden. Beim Ultraschallgerät Arbasonic Decay Detector muss dafür jeweils eine 35 mm große kreisrunde Fläche von der Borke befreit werden, auf die dann ein Gel aufgebracht wird.

Interpretation der Messergebnisse Die gemessene Schallgeschwindigkeit wird mit tabellierten Referenzwerten oder Messwerten von defektfreien Berei-

chen desselben Baumes verglichen. Bei einer deutlichen Verringerung des Wertes kann ein Defekt vermutet werden. Jedoch schwankt die Schallgeschwindigkeit bereits im defektfreien Holz stark und hängt außerdem von der Stärke des Hammerschlags ab. Die veröffentlichten Vergleichswerte (Bethge u. a. 1994) können deshalb nur als äußerst grobe Anhaltspunkte dienen. Versetzt man die Schrauben am zu untersuchenden Stammumfang mehrfach (so genannte Fächerschallung), kann man Defekte eingrenzen. Art, Lage und Größe des Defektes können aber nur selten erfasst werden (Gruber 2001).

Da auch die Verfechter dieser Geräte vor einer Fällentscheidung die Anwendung weiterer Geräte fordern, insbesondere des Zuwachsbohrers und des Fractometers, ist der Schallhammer eher ein Gerät zur Voruntersuchung.

2.1.2 Schall- und Ultraschalltomographen

Im Gegensatz zu den Ultraschalltomographen, die bisher nur als Forschungsgeräte existieren, sind mit dem PICUS Schalltomographen und dem Arbotom Impulstomographen schon seit einigen Jahren Geräte auf dem Markt (Rust 2000a, b, Rust u. a. 2002, Rinn 2003).

Messprinzip Schalltomographen bestehen aus einer Reihe von Sensoren (typisch sind 10 bis 14 Stück), die rings um den Stamm befestigt werden und einem Computer zur Steuerung und Datenauswertung. Die Schallimpulse werden mit einem kleinen Hammer erzeugt und über Messstifte mit 0,8 - 2 mm Durchmesser, die durch die Rinde auf den äußeren Jahrring gebracht werden, in den Holzkörper eingekoppelt. Da bei jedem Klopfen alle Sensoren die Laufzeiten erfassen, entsteht ein dichtes Netz von Schallgeschwindigkeitsdaten. Bei Verwendung von 10 Sensoren und dreifachem Klopfen je Sensor ergeben sich so 270 Einzelwerte. Beim PICUS Schalltomographen werden relative Schallgeschwindigkeiten ausgewertet, sodass sich das System an jedem gemessenen Querschnitt selbsttätig kalibriert. Das Ergebnis des Tomographen ist daher weitgehend unabhängig von den Eigenschaften der Baumart. Auch beim Arbotom werden die relativen Unterschiede der Schallgeschwindigkeiten verwendet, außerdem werden hier baumartenspezifische Eigenschaften berücksichtigt. Aus diesen Daten wird direkt vor Ort ein Tomogramm des Stammquerschnittes berechnet.

Interpretation der Ergebnisse Die Interpretation der Schalltomogramme ist häufig einfach. Defekte können durch eindeutige Farben sofort erkannt und dem Laien veranschaulicht werden. Schwieriger oder

gar unmöglich ist oft die genaue Identifikation des Defekts. Höhlungen, Sternrisse oder Ringschäle können im Tomogramm alle sehr ähnlich abgebildet werden. Dies ist zwar kein Mangel, da sie baumstatisch vergleichbare Auswirkungen haben (Rinn 2004), führt aber häufig nach der Fällung eines Baumes zu Erklärungsproblemen.

Für die Interpretation von Schalltomogrammen in komplizierteren Fällen ist es allerdings wichtig zu wissen, wie die Schallgeschwindigkeit normalerweise im defektfreien Holz schwankt. Beispielsweise beträgt die Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung ein Mehrfaches dessen, was man im Querschnitt misst. Daher sollte man für die Messung die Sensoren in einer Ebene mehr oder weniger senkrecht zur Baumachse anordnen, weil sonst Effekte der Faserichtung und solche von Holzdefekten nicht mehr sauber voneinander getrennt werden können.

Auch bei intakten Querschnitten ist die Holzdicke nicht homogen. Sie schwankt sowohl innerhalb der Jahrringe (zwischen Frühholz und Spätholz) als auch zwischen den Jahren, wobei es bei den meisten Baumarten eine gerichtete Entwicklung von der Markröhre zum Kambium gibt. Dieser Effekt wird laut Hersteller von der Arbotom-Software berücksichtigt.

Untersuchungen zur Genauigkeit der Geräte kommen zu dem Schluss, dass diese hoch ist, insbesondere dann, wenn die exakte Geometrie des Baumes berücksichtigt wird und bei Baumarten höherer Dichte. Eigene Untersuchungen (z. B. Rust u. a. 2002) zeigen, dass Löcher und morsche Stellen im Stamm vom Schalltomographen präzise, d.h. mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern, erkannt werden. Auch eine Studie in den USA kam zu dem Ergebnis, dass die Abbildung des Schadens durch den PICUS Schalltomographen eng mit dem visuellen Befund übereinstimmt (Gilbert u. Smiley 2004). Die Tomogramme geben allerdings im Wesentlichen nur über die Verteilung des Materials im Querschnitt Auskunft, nicht jedoch über holzphysikalische Größen wie Elastizitätsmodul oder Dichte, obwohl Schwarze u. a. (2004) feststellten, dass bei ihren Untersuchungen ein enger Zusammenhang zwischen der Farbwiedergabe des PICUS Schalltomographen und holzphysikalischen Parametern bestand. Bei der Interpretation der Ergebnisse des PICUS in Hinblick auf die Bruchsicherheit des Baumes wird z. B. meist davon ausgegangen, dass alles Material, welches nicht braun oder grün dargestellt wird, nicht mehr zur Tragfähigkeit beiträgt. Die Bedeutung dieses Befundes wird meist mithilfe des $\frac{t}{R}$ -Grenzwertes bewertet oder geht in statische Abschätzungen z. B. nach der SIA-Methode (Wessolly u. Erb 1998) ein.

2.2 Fractometer

Das Fractometer ist ein Gerät zur Messung von Festigkeit und Steifigkeit von Holzproben, die mit dem Zuwachsbohrer dem Stamm entnommen werden. Das Gerät ist mittlerweile in drei Varianten erhältlich. Das Fractometer I ermöglicht die Bestimmung von radialer Biegefestigkeit und radialem Bruchwinkel und, daraus abgeleitet, des radialen E-Moduls. Das Fractometer II kann darüber hinaus auch die Längsdruckfestigkeit einer Holzprobe messen.

Messprinzip Bohrspäne werden in das Gerät eingespannt und gebogen, gebrochen und gequetscht. Die dafür erforderlichen Kräfte lassen sich am Gerät ablesen.

Interpretation der Ergebnisse Die Werte können mit tabellierten Normwerten oder Ergebnissen von anscheinend defektfreien Proben desselben Baumes verglichen werden und lassen nach Angaben der Hersteller auf das Vorhandensein einer Holzfäule und ihres Typs schließen. Nach Wenzel u. Bues (1997) stehen die gemessenen radialen Größen allerdings in keinem zufriedenstellenden Zusammenhang zu den für das Versagen eines Baumes entscheidenden Holzeigenschaften (s. a. Lesnino u. Glos 1994). Matheny u. a. (1999) stellten bei der Untersuchung von 25 Baumarten in Nordamerika fest, dass die Werte innerhalb einer Art, besonders zwischen unterschiedlichen Standorten, sehr stark variieren. Sie halten einen Vergleich von Messwerten mit tabellierten Standards daher für wenig sinnvoll und empfehlen, gesunde Proben desselben Baumes als Referenz zu verwenden. Chiu u. a. (2006) fanden bei der Untersuchung von Taiwania-Beständen allerdings, dass die Variation innerhalb der Bäume größer war als zwischen den Bäumen. Es ist also auch beim Vergleich von Proben eines Baumes große Vorsicht angebracht. Problematisch sind auch die korrekte Probengewinnung und -verarbeitung. Gerade bei weichen Hölzern wird die Probe im Zuwachsbohrer gestaucht. In welcher Form die punktuell erhobenen Materialeigenschaften in der täglichen Praxis in die quantitative Bewertung der Bruchsicherheit des Stammquerschnittes eingehen können, bleibt unklar.

Auswirkungen auf den Baum Da die Probenahme mit dem Zuwachsbohrer erfolgt, gelten hier die gleichen Aussagen wie für diesen.

2.3 Elektrische Leitfähigkeit

Messprinzip Der elektrische Widerstand im Holzkörper hängt in erster Linie von der Ionenkonzentra-

tion, der Temperatur und dem Wassergehalt im Apoplasten ab (Borchert 1994). Eine Beeinträchtigung des Holzes durch Fäule oder andere Krankheiten führt häufig dazu, dass sich der elektrische Widerstand verringert (Skutt u. a. 1972), durch Höhlungen erhöht er sich auf den der Luft. Die folgenden Geräte versuchen, diese Veränderungen des elektrischen Widerstandes zu messen.

Eindimensionale Messung Für die Messung elektrischer Leitfähigkeiten im stehenden Stamm standen bislang die Geräte Shigometer, Conditometer AS1 und Vitamat zur Verfügung. Das Shigometer und das Conditometer AS1 ermitteln die elektrischen Widerstände durch eine Messsonde, die in ein Bohrloch von 2,4 mm in den Stamm getrieben wird. Der Vitamat benötigt keine Bohrung, dafür werden bei diesem Gerät zwei 2,8 mm bis 4,8 mm starke Elektroden in 2 cm Abstand bis zu 25 cm tief in den Baum getrieben.

Interpretation der Ergebnisse In einem Versuch mit mehreren hundert Eucalyptusbäumen erwies sich die Methode als recht genau, lieferte aber nur wenig mehr Information als schon durch das Bohren des Loches verfügbar war (Wilkes 1983). Da es sich um eindimensionale Messungen handelt, sind exakte Aussagen über die Größe des Schadens im Baum nicht möglich. Auch können sich die Wirkungen verschiedener Prozesse auf die elektrische Leitfähigkeit gegenseitig aufheben und die Interpretation erschweren. So sind beginnende Fäulen in Fichten oft nicht diagnostizierbar, da sich mit ihnen die Holzfeuchte erhöht, aber die Dichte vermindert (Niemz u. a. 1998). Rückschlüsse auf mechanische Eigenschaften des Holzes sind kaum möglich, die Form eines Schadens lässt sich nur durch mehrere Bohrungen eingrenzen.

Auswirkungen auf den Baum Bucher u. a. (1993) weisen darauf hin, dass sich die Einstichkanäle des Vitamats relativ schnell schließen, jedoch bei Nasskern bildenden Baumarten wie Tanne, Pappel und Ulme Wasserverluste und später Pilzinfektionen im Bereich des Einstichloches auftreten. Nicolotti u. Miglietta (1998) berichten über teilweise erhebliche Verletzungen infolge der großen Kraft, mit der die Elektroden in das Holz gepresst werden.

2.4 Elektrische Widerstandstomographie

Messprinzip Dieses Verfahren, das zurzeit noch nicht kommerziell erhältlich ist, arbeitet mit Vierpunkt-Anordnungen, bei denen ein niederfrequenter

Wechselstrom an zwei Punkten eingespeist und an zwei anderen abgegriffen wird. Bis zu 24 Nadelelektroden werden gleichmäßig auf den Stammumfang verteilt. Bei Verwendung von 24 Elektroden werden 504 scheinbare elektrische Widerstände erfasst und in eine tomographische Darstellung der Verteilung der scheinbaren spezifischen elektrischen Widerstände umgerechnet werden.

Interpretation der Ergebnisse Die Interpretation der Tomogramme bedarf umfangreicher Kenntnisse über die Widerstandsverteilung bei den verschiedenen Baumarten. Diese variieren nicht nur von Baumart zu Baumart, sondern auch innerhalb eines Jahres oder gar Tages. Die Forschungsgruppe »Zerstörungsfreie Baumdiagnose« der HAWK-Fakultät Ressourcenmanagement in Göttingen hat in den letzten Jahren umfangreiche Erfahrungen mit der elektrischen Widerstandstomographie sammeln können (Weihs u.a. 1999, Rust u. Weihs 2007). Dabei wurde deutlich, dass der Einsatz eines derartigen Gerätes ohne intensive Schulung und Anleitung derzeit noch problematisch ist.

2.5 Bohrende Verfahren

2.5.1 Zuwachsbohrer

Eine der ältesten heute noch eingesetzten Methoden zur Baumuntersuchung ist die Entnahme eines Bohrkernes von 4-6 mm Stärke mit dem Zuwachsbohrer.

Messprinzip Dieses Verfahren, das für die Zuwachsuntersuchung in der Waldwachstumkunde entwickelt wurde, wird auch heute noch relativ häufig im Rahmen der Baumuntersuchung zur Bestimmung von Restwandstärken verwendet. Außerdem dient es der Probenahme für phytopathologische Untersuchungen und das Fractometer. Der entnommene Bohrspan erlaubt dann sowohl die Isolierung von Pilzen und Bakterien als auch die Ermittlung holzphysikalischer Eigenschaften. Außerdem können einfache mechanische (Wackeltest) und sensorische (Riechen) Untersuchungen durchgeführt werden.

Interpretation der Ergebnisse Die immer noch häufige Verwendung des Zuwachsbohrers liegt (neben den geringen Investitionskosten) sicherlich daran, dass nur mit ihm die inneren Eigenschaften eines Baumes »begreifbar« werden. Gutachter und Auftraggeber können sich durch Ansehen und Anfassen ein Bild machen. Allerdings sind Verfärbungen in der Regel kaum mehr als ein grober Anhalt für die Festigkeit der Probe. Ohne die Kombination

mit anderen Verfahren ist der Bohrspan auch deshalb für die Beurteilung der Verkehrssicherheit nicht geeignet, weil er nur eine lineare Betrachtung entlang des Bohrkanals erlaubt und die Eindringtiefe relativ begrenzt ist. Aus diesem Grund wären mehrere Bohrungen zur Erzielung eines aussagekräftigen Ergebnisses notwendig. Wegen der damit einhergehenden Holzzerstörung sollte die Ermittlung der Geometrie einer Fäule durch den Zuwachsbohrer aber der Vergangenheit angehören, auch wenn man solchen Fällen in der Praxis immer noch begegnet. Ferner lassen sich Fäulen und Hohlräume nur dann annähernd korrekt diagnostizieren, wenn sie zentral orientiert und von gleichmäßiger, runder Form sind. Untersuchungen von Stenlid u. Wästerlund (1986) zur Diagnose von Fäule an Fichten mittels Zuwachsbohrer zeigen, dass bei Bohrungen in einer Stammhöhe von 130 cm 80 Prozent, in 30 cm Höhe nur 40-70 Prozent der Fäulen erkannt wurden. Niemz u. a. (1998) erreichten bei ihren Untersuchungen eine Trefferquote von 46 Prozent. Die Bedeutung der vorgefundenen Restwand wird meist mithilfe des $\frac{t}{R}$ -Grenzwertes bewertet.

Auswirkungen auf den Baum Der Zuwachsbohrer ist ein Verdrängungsbohrer mit etwa 10 mm Außendurchmesser. Das Gewebe um den Bohrkanal herum wird gequetscht und verfärbt sich. Die durch die Bohrung verursachte Verletzung löst im Baum oft umfangreiche Wundreaktionen aus (Dujesiefken 2001). Während die Abschottung in der Rinde meist sehr engräumig erfolgt und Kambialnekrosen in der Regel nur wenige Zentimeter Ausdehnung erreichen, kann die Beeinträchtigung des Holzes bei schlecht kompartimentierenden Baumarten in Längsrichtung mehrere Meter Länge erreichen. Luft dringt in die angeschnittenen und gequetschten Gefäße ein und verursacht Luftembolien. Der betroffene Splint verliert dadurch dauerhaft seine Leitfähigkeit und kann die Krone nicht mehr mit Wasser versorgen.

Die bei diesem Verfahren entstehenden Bohrkanäle sind Eintrittspforten für Pilze und Bakterien. Da der Zuwachsbohrer für die Baumdiagnose bei Bäumen eingesetzt wird, die deutliche Verdachtsmomente für einen Defekt im Stamminneren zeigen, und in diesen Defekt hinein gebohrt werden muss, um die gewünschte Information zu erhalten, besteht außerdem die Gefahr, dass sich eine bestehende Fäule durch die Untersuchung weiter ausbreiten kann. Wundverschlussmittel bewirken keinen ausreichenden Schutz nach einer Bohrung. Wegen dieser zerstörerischen Wirkung sollte der Zuwachsbohrer für die Baumuntersuchung nur noch in wenigen, gut begründeten Einzelfällen zur Absicherung einer Diagnose

bei ohnehin schon abgängigen Bäumen angewendet werden, oder dann, wenn eine Holzprobe zur Identifikation der Erreger einer Holzfäule oder zur Jahrringanalyse benötigt wird. Für die Endoskopie gilt hinsichtlich der Auswirkungen auf den Baum Ähnliches wie für die Bohrkernentnahme (Kucera u. Niemz 1998).

2.5.2 Bohrwiderstandsmessgeräte

Messprinzip Die relativ häufig eingesetzten Bohrwiderstandsmessgeräte zeichnen den Stromverbrauch beim Einbohren einer relativ dünnen Nadel in den Holzkörper über die Eindringtiefe auf. Aus diesem wird auf die Holzigenschaften entlang des Bohrkanals geschlossen. Der gemessene Wert korreliert stark mit der Holzdicke (Rinn u. a. 1996, Wang u. a. 2003).

Eine Gerätevariante, das Teredo-Prüfnadelmesssystem, besitzt eine 0,8 bis 1,2 mm starke Prüfnadel, die mit bis 15000 Umdrehungen pro Minute in den Baum getrieben wird. Dabei entsteht eine hohe Reibungshitze, was ebenso wie die dünne Nadel die Infektionsgefahr entlang des Bohrkanals herabsetzen soll. Bei diesem Gerät wird die Stromaufnahme des Motors beim Eindringen in das Holz und beim Zurückziehen der Prüfnadel gemessen. Diese so genannte Rückzugskurve soll ebenfalls Aufschlüsse über den Holzzustand ermöglichen. Eine weitere Gerätevariante arbeitet mit einer geringeren Umdrehungszahl, einem 1,5 mm dicken Bohrer und einem größeren, schneidenden Bohrkopf. Es wird keine Rückzugskurve aufgezeichnet. Geräte dieses Typs sind unter anderem der Resistograph, der IML-Resi und der Decay Detection Drill.

Interpretation der Ergebnisse Die Interpretation der Bohrwiderstandsmessungen bedarf gründlicher, baumartenspezifischer Kenntnisse des Holzaufbaus. Nur so können Muster, die zum Beispiel durch juveniles Holz, den Alterstrend des Dickenzuwachses oder tangentielle Bohrungen hervorgerufen werden, sicher von Defekten unterschieden werden. Verringerungen des Bohrwiderstandes von weniger als 25 Prozent sind schwer zu interpretieren, obwohl sie schon mit bedeutenden Gewichtsverlusten verbunden sein können (Schwarze 1995). In einem systematischen Versuch waren nur etwas mehr als die Hälfte der Bohrungen eindeutig zuzuordnen. Nur bei 70 Prozent der aufgrund der Resistograph-Bohrung als faul eingestuften Bäume konnten tatsächlich Fäuleerreger isoliert werden (Schumacher u. Roloff 2000).

Bei beiden Gerätevarianten kann der Benutzer nicht sicher sein, dass der Bohrkanal geradlinig ver-

läuft, da die Bohrnadel beispielsweise beim Auftreffen auf Hindernisse erheblich abgelenkt werden kann. Beim Durchlaufen von Hohlräumen bohrt sich die dünne Bohrnadel in einer nicht nachvollziehbaren Position wieder in den festen Holzkörper des Stammes ein. Ein weiteres, in der Ausprägung typabhängiges Problem dieser Geräte ist die Schaftreibung, die insbesondere bei den überwiegend schneidenden Geräten auftritt. Sie bewirkt, dass der Bohrwiderstand systematisch von der Eintrittsstelle des Bohrers an stetig ansteigt. Ursachen sind die Reibung der Nadel an der Bohrkanalwand und besonders auch das Bohrmehl, welches den Bohrkanal verstopft. Einige Hersteller bieten inzwischen technische Lösungen zur Vermeidung dieses Problems an. Die Rückzugskurve des Teredo-Prüfnadelmesssystems hat sich als problematisch erwiesen. Gruber (2001) kommt zu dem Schluss, dass sie nicht zur Diagnose heran gezogen werden sollte.

Bohrwiderstandsmessungen liefern im besten Fall Informationen über die Verteilung des Materials entlang einer Linie, sowie näherungsweise über eine holzphysikalische Größe, nämlich die Holzdichte (Rinn u. a. 1996), die allerdings nicht mit der Holzfestigkeit gleichgesetzt werden darf, denn selbst bei einer geringen Dichteabnahme kann schon ein erheblicher Festigkeitsverlust eingetreten sein (Wilcox 1978). Außerdem kann selbst in defektfreiem Holz die Dichte nur schwach mit der Druckfestigkeit korreliert sein (Lin u. a. 2006). Eine einzelne Bohrung ist nur in extremen Fällen ausreichend, um die Bruchsicherheit eines Baumes zu beurteilen. In den meisten Fällen werden mindestens drei Bohrungen angebracht, um die Geometrie von Schäden abschätzen zu können. Die Bedeutung des Befundes wird meist mithilfe des $\frac{t}{R}$ -Grenzwertes bewertet.

Auswirkungen auf den Baum Obwohl die mechanische Zerstörung auf einen Kanal von etwa 2 mm Durchmesser beschränkt ist, kommt es zu deutlich ausgedehnteren Wundreaktionen. Die Verfärbungen sind in der Regel deutlich kleiner als beim Zuwachsbohrer, insbesondere beim Resistographen. Die größeren verfärbten Bereiche nach Teredo-Bohrungen werden auf die große Reibungshitze, die dieses Gerät im Holz erzeugt, zurückgeführt (Jaskula u. Blatt 2001). Verfärbtes Holz wird in der Regel nach einiger Zeit durch holzzerstörende Pilze besiedelt. Die Bohrkanaäle ermöglichen es holzzerstörenden Pilzen, sich in Bereichen außerhalb der Reaktionszone zu etablieren. Insbesondere für Braunfäuleerreger könnte dies die einzige Möglichkeit sein, bei vitalen Bäumen die Reaktionszone zu überwinden (Kersten 2001).

Trotz der recht kleinen Bohrnadel verursachen die

se Geräte also nicht zu vernachlässigende Verletzungen, besonders, weil mehrere, zueinander versetzte Bohrungen notwendig sind, um eine Vorstellung von der Verteilung des Holzes im Inneren eines Baumes zu erlangen (Rinn 1994, Wenzel 1999a, b). Daher sollten diese Geräte nur in begründeten Einzelfällen verwendet werden. Besonders sollte vermieden werden, in kurzem zeitlichen Abstand Wiederholungsmessungen durchzuführen.

3 Verfahren zur Untersuchung der Standsicherheit

3.1 Verfahren zur Untersuchung des Wurzelraumes

Die Standsicherheit eines Baumes hängt vom Zustand seines Wurzelsystems ab, insbesondere vom Verlauf und der Festigkeit der Starkwurzeln. Bis vor wenigen Jahren konnte der Zustand dieser Wurzeln nur durch sehr aufwändiges Freispülen und Aufgraben von Hand erfasst werden. Allenfalls oberflächlich verlaufende Wurzeln konnten durch Anbohren auch ohne Grabung auf Fäulen untersucht werden. Eine Reihe neuer technischer Entwicklungen wird jedoch in naher Zukunft die Ortung von Wurzeln mit geringem Aufwand und ohne Grabungen ermöglichen. Auch die Funktionsfähigkeit einzelner Wurzeln kann mittlerweile überprüft werden (Rust u. Gustke 2001). Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung des Bodenradars.

Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem elektromagnetische Impulse von der Bodenoberfläche in den Untergrund abgestrahlt werden. Die Impulse werden an Schichtgrenzen, Einlagerungen oder Objekten reflektiert oder gestreut. Eine Antenne zeichnet die Laufzeit und die Amplitude der reflektierten Strahlung auf. Die Fähigkeit eines solchen Systems, Wurzeln zu orten, hängt stark von den Bodenverhältnissen ab. Ein sehr hoher Salz-, Wasser- oder Tongehalt kann verhindern, dass Wurzeln mit ausreichender Sicherheit erkannt werden.

Zur dreidimensionalen Abbildung des Wurzelsystems eines Baumes muss ein enges Raster von Linien um diesen herum mit dem Gerät abgefahren werden. Zur Erfassung der Durchwurzelung eines Bereiches, z. B. eines Weges, reicht die Messung von Linien aus. Als Ergebnis erhält man Abbildungen, auf denen die Objekte kreisförmig mit einer ihrer tatsächlichen Größe entsprechenden Fläche erscheinen.

An Einzelbäumen und in homogenen Forstflächen wird das Verfahren seit Ende der 1990er Jahre mit einigem Erfolg eingesetzt. Vom Autor wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Gehölze und Landschaft (Neu Gersdorf) das Bodenradar im

Jahr 2005 erstmalig in zwei Untersuchungen zum Eichensterben und zur Durchwurzelung eines Deiches erfolgreich verwendet (Rust u.a. 2006, Rust u. Gustke 2006).

Seit 2005 bietet die Firma treeradar ein Radarsystem zur Untersuchung von Baumstämmen und deren Wurzelraum an. Das System wird in der Regel vermietet und die Auswertung der Daten erfolgt durch die Firma. Als Ergebnis erhält der Anwender zweidimensionale Abbildungen, auf denen mögliche Wurzeln als Punkte dargestellt werden. Informationen über die Größe und den Verlauf der Wurzeln bekommt man anscheinend nicht. Diese sind jedoch für den Einsatz bei der Begutachtung der Standsicherheit und für den Schutz von Bäumen auf Baustellen besonders wichtig.

3.2 Zugversuche: Untersuchung der Stand- und Bruchsicherheit

Zugversuche sind zerstörungsfreie Methoden zur Untersuchung der Stand- und Bruchsicherheit (Sinn u. Wessolly 1988, Wessolly 1989, Männl 1992, Wessolly u. Erb 1998). Dabei wird mittels eines Greifzuges über ein Stahlseil der zu untersuchende Baum unter Spannung gesetzt. Mit dem Greifzug ist ein Dynamometer verbunden, das die Kraftaufnahme in Zugrichtung misst.

In die Berechnungen gehen im Gegensatz zu den bisher genannten Verfahren Abschätzungen der Windlast ein. Diese wird u.a. aus der Baumhöhe, der Kronenfläche, baumartenspezifischen und windgeschwindigkeitsabhängigen cw-Werten, Schwingungseigenschaften des Baumes sowie Standortsfaktoren wie Geländerauigkeit und Seehöhe ermittelt. Die Auswertung erfolgt mit speziellen Computerprogrammen, die als Ergebnis eine Stand- und/oder Bruchsicherheit ausgeben.

Zur Beurteilung der Standsicherheit des Baumes werden am Stammfuß ein oder zwei Neigungsmessgeräte angebracht, welche die Neigung (und Biegung) des Baumes in Abhängigkeit von der jeweiligen Zugkraft ausgeben. Bei der Inclinomethode wird davon ausgegangen, dass sich das Kippverhalten der Bäume durch eine allgemeine Kippkurve beschreiben lässt, nach der alle untersuchten Bäume zwischen 2,5° und 5° Neigung kippten. Die Werte der Neigungsmessung, bei der der untersuchte Baum in der Regel nur 0,25° Neigung erreicht, werden dann bis 2,5° extrapoliert und so die für diese Neigung erforderliche Windlast geschätzt. Diese wird mit der für Windstärke 12 geschätzten Windlast verglichen.

Die AfB-Methode (AfB: Arbeitsstelle für Baumstatik) unterscheidet sich methodisch durch Unterschiede bei der Windlastermittlung, der Mes-

sung (Zweipunktmessung und deutlich stärkere Neigung des Baumes mit mindestens 30 Prozent der geschätzten Windlast bei Windstärke 12) und der Auswertung der Messdaten mithilfe einer Kraft-Neigungskurve.

Zur Schätzung der Bruchsicherheit wird mit so genannten Elastometern oder Dilatometern die Dehnung der äußersten Holzfasern gemessen. Aus dieser und der Elastizitätsgrenze wird auf die für das Primärversagen erforderliche Spannung geschlossen. Die Elastizitätsgrenze wird dem so genannten Stuttgarter Festigkeitskatalog entnommen.

Der Stuttgarter Festigkeitskatalog, die Kippkurve, die Kraft-Neigungskurve der AfB-Methode und die Methoden der Windlastabschätzungen werden seit Jahren in der Praxis eingesetzt. Sie sind allerdings bisher unseres Wissens ebenso wenig wissenschaftlich veröffentlicht worden wie Einzelheiten über die Art und Weise, wie die Berechnungen durchgeführt werden. Eine objektive und unabhängige Beurteilung der Qualität der für die Berechnungen zentralen Daten und Methoden ist daher nicht möglich. Auch so ist aber darauf hinzuweisen, dass allgemein die Schätzung einer nichtlinearen Regressionskurve, wie sie die Kippkurve und die Kraft-Neigungskurve darstellen, aus lediglich ein bis vier Messpunkten und ihre Extrapolation weit über den Bereich der Messungen hinaus mit ganz erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Im Gegensatz zu allen anderen hier vorgestellten Methoden treffen die Zugversuche durch die Angabe von Bruch- und Standsicherheiten direkt eindeutige Aussagen.

4 Schlussfolgerungen

Die Entscheidung eines Gutachters für ein bestimmtes Gerät wird durch viele Kriterien beeinflusst. Neben der technischen Eignung für einen spezifischen Diagnosezweck haben sicherlich die Faktoren Investitionskosten und Zeitbedarf den größten Einfluss, da sie sich direkt auf den Preis eines Gutachtens auswirken.

4.1 Aufwand

Die Schalltomographen kosten zurzeit etwa das Dreifache eines einfachen Bohrwiderstandsmessgerätes. Eine einfache Bohrwiderstandsmessung oder Bohrspanentnahme sind innerhalb weniger Minuten erledigt, die Messung mit einem Schalltomographen dauert auch bei einem erfahrenen Anwender etwa 20 Minuten, bei sehr großen und komplizierten Bäumen bis zu einer Stunde. Nutzt man allerdings die

technischen Möglichkeiten der heutigen Bohrwiderstandsmessgeräte aus und konstruiert am Computer aus mehreren Bohrungen in einem Querschnitt eine graphische Darstellung des Schadens, so dürfte der zeitliche Aufwand über dem der Tomographen liegen. Gerade bei weniger erfahrenen Anwendern ist das mehrfache Bohren an einem Baum gängige Praxis und wird auch von Vertreibern der Geräte empfohlen.

Auch sollte der Zeitbedarf für die fachgerechte Dokumentation (Stammhöhe, Himmelsrichtung, Bohrrichtung) einer Bohrung und für die Konservierung eines Bohrspans oder Wachspapierstreifens nicht unterschätzt werden.

4.2 Schädigung des Baumes

Die Verletzung des Baumes ist sicherlich bei den Zugversuchen und auch den Tomographen wesentlich geringer als bei allen anderen hier besprochenen Geräten, ein echter Schaden kann bei richtigem Einsatz dieser Methoden kaum entstehen. Ganz anders bei den bohrenden Verfahren: insbesondere der Zuwachsbohrer ist nicht geeignet, den Schadensfortschritt in einem Baum über Jahre zu untersuchen. Der besonnene und zurückhaltende Einsatz eines Bohrwiderstandsmessgerätes durch einen erfahrenen Anwender dagegen dürfte den Baum kaum einem Maße schädigen, das nicht zu vertreten ist.

4.3 Verwendung des Messergebnisses

Betrachtet man die zurzeit übliche Praxis, werden von den Gutachtern, wenn keine Zugversuche

gemacht werden, empirische Grenzwerte für die Bruchgefährdung als Entscheidungshilfen verwendet. In die in Deutschland wohl gängigste Formel ($\frac{t}{R} < 0,32$) geht die Holzfestigkeit in der Form »fest« oder »nicht fest« ein. Über den Umgang mit dezentralen Fäulen und offenen Querschnitten besteht dabei erhebliche Unsicherheit (Tesari u. a. 2001).

Soll ein Gerät helfen, die Bruchsicherheit eines Baumes nach dem heutigen Stand des Wissens quantitativ zu beurteilen, sollte es also zumindest eine Entscheidung darüber ermöglichen, welche Bereiche des Baumquerschnittes noch tragfähig sind. Mit den Tomographen auf der Basis des elektrischen Widerstands und der Schallgeschwindigkeit stehen heute abbildende Geräte für die Diagnose von Stammschäden zur Verfügung, welche diese Informationen weitgehend zerstörungsfrei über den gesamten Querschnitt liefern. Seit kurzem gibt es auch einen Tomographen, welcher die weitgehend voneinander unabhängigen physikalische Parameter Schallgeschwindigkeit und elektrischen Widerstand in einem Gerät kombiniert (Rust u. a. 2007). Dadurch wird die Diagnosesicherheit noch einmal deutlich erhöht.

Eine Reihe der in der täglichen Praxis häufig eingesetzten und in Ausschreibungen von Baumgutachten noch immer geforderten Geräte dagegen ermöglicht nur punktuelle oder eindimensionale Aussagen. Je größer, komplexer und damit auch wertvoller ein Baum ist, desto eher sollte man zu Verfahren greifen, die in der Lage sind, den Stammquerschnitt möglichst umfassend und gleichzeitig so zerstörungsfrei wie möglich darzustellen. In diesen Fällen sind auch die höheren Kosten zu rechtfertigen.

5 Literaturverzeichnis

Bethge, K.; Mattheck, C.; Thun, G. (1994): Ein Katalog der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Stoßwellen in defektbehafteten Holzquerschnitten. In: Baumzeitung 28, Nr. 1, S. 12-15

Borchert, R. (1994): Electric resistance as a measure of tree water status during seasonal drought in a tropical dry forest in Costa Rica. In: Tree Physiology 14, S. 299-312

Bucher, H. P.; Kucera, L. J.; Walter, M.; Bosen, K. J. M. (1993): Elektrische Leitwertprofile im Holzkörper mitteleuropäischer Baumarten, bestimmt mit dem Vitamat. In: Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft 68, Nr. 2, S. 63-144

Chiu, C.-H.; Wang, S.-Y.; Lin, C.-J.; Yang, T.-H.; Jane, M.-C. (2006): Application of the fractometer for crushing strength: juvenile-mature wood demarcation in *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides*). In: Journal of Wood Science 52, S. 9-14

Dujesiefken, D. (2001): Die Einsatzgebiete des Zuwachsbohrers und die Wundreaktion im Baum nach Bohrung. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.); Kockerbeck, P. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Thalacker, S. 186-190

Gilbert, E. A.; Smiley, E. T. (2004): PICUS sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.). In: Journal of Arboriculture 30, S. 277-281

Gruber, F. (2001): Vergleich der Diagnosegeräte Teredo, Resistograph und Impulshammer-Schallmesssystem. In: AFZ-Der Wald 6, S. 280-283

- Gruber, F. (2007): Die VTA-0,32-Restwandstärkenregel, wissenschaftlich unhaltbar und praktisch unbrauchbar. In: Agrar- und Umweltrecht, S. 7-12
- Jaskula, P.; Blatt, A. (2001): Vergleich der Wundreaktionen an Bohrlöchern vom Resistographen, Teredo-Prüfnadelmesssystem und Zuwachsbohrer. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.); Kockerbeck, P. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Thalacker, S. 191-194
- Kersten, W. (2001): Infektionsgefahr durch den Einsatz invasiver Diagnosegeräte am lebenden Baum. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.); Kockerbeck, P. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Thalacker, S. 195-202
- Kucera, L. J.; Niemz, P. (1998): Fäule in Bäumen erkennen. In: Wald und Holz 2, S. 27-30
- Lesnino, G.; Glos, P. (1994): zu: Das Fractometer. In: AFZ-Der Wald 8, S. 417-418
- Lin, C.-J.; Wang, S.-Y.; Yang, T.-H.; Tsai, M.-J. (2006): Compressive strength of young *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides*) trees grown with different thinning and pruning treatments. In: J Wood Sci 52, S. 337-341
- Männl, U. (1992): Analyse der Standsicherheit von Bäumen. In: Das Gartenamt 41, S. 429-433
- Matheny, N. P.; Clark, J. R.; Attewell, D.; Hillery, K.; Graham, A. W.; Posner, G. (1999): Assessment of fracture moment and fracture angle in 25 tree species in the United States using the Fractometer. In: Journal of Arboriculture 25, Nr. 1
- Mattheck, C; Breloer, H (1993): Reihe Ökologie. Bd. 4: Handbuch der Schadenskunde von Bäumen. Rombach Wissenschaften, Freiburg
- Nicolotti, G.; Miglietta, P. (1998): Using high technology instruments to assess defects in trees. In: Journal of Arboriculture 24, Nr. 6, S. 297-302
- Niemz, P.; Bodmer, H.-C.; Kucera, L. J.; Ridder, H. W.; Habermehl, A.; Wyss, P.; Zurcher, E.; Holdenrieder, O. (1998): Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäule bei Fichte. In: Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen 149, S. 615-630
- Rinn, F.; Schweingruber, F.-H.; Schär, E. (1996): RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. In: Holzforschung 50, Nr. 4, S. 303-311
- Rinn, F. (1994): Catalog of relative density profiles of trees, poles, and timber derived from Resistograph micro-drillings. In: 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, S. 61-67
- Rinn, F. (2004): Statische Hinweise im Schall-Tomogramm von Bäumen. In: Stadt+Grün 7, S. 4145
- Rinn, F. (2003): Technische Grundlagen der Impuls-Tomographie. In: Baumzeitung 8, S. 29-31
- Rust, S. (2000): A new tomographic device for the non-destructive testing of standing trees. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. University of Western Hungary, Sopron, S. 233-238
- Rust, S. (2000): Baumuntersuchung mit Schalltomographie. In: Programm- und Tagungsband der Westdeutschen Baumpflegetage, Köln
- Rust, S.; Bieker, D.; Krummheuer, F.; Spitzer, K.; Weihs, U. (2006): Wurzeln einfacher orten. In: Baumzeitung 40, Nr. 2, S. 27-29
- Rust, S.; Franz, S.; Minke, M.; Schumann, I.; Roloff, A (2002): Schalltomographie zur Erkennung von Fäulen und Höhlungen an stehenden Bäumen. In: Stadt+Grün 51, S. 51-52
- Rust, S.; Gustke, B. (2006): Baumschutz am Deich. In: Baumzeitung 40, Nr. 2, S. 30-32
- Rust, S.; Gustke, B. (2001): Ein neues Verfahren zum Nachweis von Wurzelschäden an Straßenbäumen. In: Landschaftsarchitektur 12, S. 12-13
- Rust, S.; Weihs, U., Bieker, D. (2007): Zerstörungsfreie Baumdiagnose mit der elektrischen Widerstandstomographie AFZ-Der Wald, 62, 400-403
- Rust, S.; Weihs, U.; Günther, T.; Rücker, C., Göcke, L. (2007): Combining Sonic and Electrical Impedance Tomography for the Nondestructive Testing of Trees Non-destructive Testing of Trees
- Schumacher, J.; Roloff, A. (2000): Evaluierung und Vergleich unterschiedlicher Diagnoseverfahren zur Ermittlung von Holzfäulen in lebenden Schwarzerlen (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). In: Forst und Holz 55, Nr. 23, S. 739-743
- Schwarze, F.; Rabe, C.; Ferner, D.; Fink, S. (2004): Schalltomografische Untersuchungen an pilzinfizierten Bäumen. In: AFZ-Der Wald 2, S. 55-60
- Schwarze, F. W. M. R. (1995): Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzersetzenen Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro, Universität Freiburg, Diss.
- Sinn, G.; Wessolly, L. (1988): Zur sachgerechten Beurteilung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen. In: Neue Landschaft 33

- Sinn, G.; Wessolly, L. (1989): Baumstatik - Zwei neue zerstörungsfreie Meßverfahren. Das Gartenamt 38, S. 422-428.
- Skutt, H. R.; Shigo, A. L.; Lessard, R. A. (1972): Detection of discolored and decayed wood in living trees using a pulsed electric current. In: Can. J. For. Res. 2, S. 54-56
- Smiley, E. T.; Fraedrich, B. R. (1992): Determining strength loss from decay. In: Journal of Arboriculture 18, Nr. 4, S. 201-204
- Stenlid, J.; Wästerlund, I. (1986): Estimating the frequency of stem rot in *Picea abies* using an increment borer. In: Scandinavian Journal of Forest Research 1, Nr. 3, S. 303-308
- Tesari, I.; Bethge, K.; Kappel, R.; Ledermann, M.; Weber, K.; Götz, K.; Mattheck, C. (2001): Die Biomechanik der offenen Morschung: Versagenskriterium und visuelle Beurteilung. In: Messen und Beurteilen am Baum, (VTA-Spezialseminar 7)
- Wagener, W. W. (1963): Judging hazards from native trees in California recreational areas / USDA Forest Service. (PSW-P1). research paper
- Wang, S.-Y.; Chiu, C.-M.; Lin, C.-J. (2003): Application of the drilling resistance method for annual ring characteristics: evaluation of *Taiwania* (*Taiwania cryptomerioides*) trees grown with different thinning and pruning treatments. In: Journal of Wood Science 49, April, Nr. 2, 116-124.
- Weihls, U.; Dubbel, V.; Krummheuer, F.; Just, A. (1999): Die elektrische Widerstandstomographie. Forst und Holz 54, S. 166-170
- Wenzel, J.-M. (1999): Bohrwiderstandsverfahren zur Unterstützung der Baumdiagnose. In: Neue Landschaft, S. 37-43
- Wenzel, J.-M. (1999): Neues Gerät für das Bohrwiderstandsverfahren. In: Allgemeine Forstzeitschrift, S. 256-258
- Wenzel, R.; Bues, C.T. (1997): Das Fractometer II - ein Taschenprüfgerät für Holzforscher und Förster? In: Dujesiefken, D. (Hrsg.); Kockerbeck, P. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Thalacker Verlag, 1997, S. 217-219
- Wessolly, L.; Erb, M. (1998): Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer Verlag, Braunschweig.
- Wilcox, W. W. (1978): Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. In: Wood and Fibre 9, Nr. 4, S. 252-257
- Wilkes, J. (1983): Use of the Shigometer technique to detect decay in eucalypts. In: Australian Forestry 46, S. 35-38