

Zerstörungsfreie Diagnoseverfahren an stehenden Laubbäumen - Farbkerndiagnose und Holzveränderungen -

Einleitung

Durch eine Farbverkernung verlieren viele Baumarten an Qualität. Ein zerstörungsfreies Verfahren sollte eine frühzeitige Farbkerndiagnose an stehenden Stämmen ermöglichen. Mittels der elektrischen Widerstandstomographie wurden Untersuchungen an der Elsbeere (*Sorbus torminalis* L.), an Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.) und an Esche (*Fraxinus excelsior* L.) durchgeführt.¹

Das große Defizit zerstörungsfreier Verfahren zur Diagnose von holzphysiologischen Veränderungen in stehenden Bäumen bedarf der Entwicklung und Erprobung.

Bisher wurden für eine Diagnose der Festigkeitseigenschaften und einer zweidimensionalen Darstellung von lebenden Bäumen Verfahren angewandt, die Schädigung des Holzes bewirkten. Bohrwiderstandsmessungen und die Entnahme von Bohrkernen seien hier als klassische Verfahren genannt. Alle Bohrverfahren verursachen je nach Größe des Bohrloches Defekte im Holzkörper und schaffen eine Grundlage für Pilze und der Infektion durch das Bohrgerät. Bohrlochverfahren liefern nur Informationen längs des eindimensionalen Bohrkanals und keine Aussagen über die genaue Ausdehnung von Fäulebereichen und Hohlräumen im Innern eines Baumes.

Zu den bisher bekannten zerstörungsfreien Diagnosemethoden zählen das manuelle Klopfverfahren, Leitfähigkeitsmessungen, Computertomographie, Schallgeschwindigkeitsmessungen, Thermographie und Ultraschallmethoden. Die Ergebnisse sind aber sehr unsicher, da diese Verfahren nur unvollständige Aussagen über das Innere des Baumes treffen können. Ein weiteres elektrisches Widerstandsmessungsverfahren erfolgt mit dem Vitamat, einem Gerät, das ebenfalls keinen Aufschluss über den Umfang der Schädigung im Baum zulässt.

Die Computer-Tomographie ist ein zerstörungsfreies Schnittbildverfahren, das die ortsabhängigen Absorptionskoeffizienten für Röntgen- oder Gammastrahlung in einer dünnen Schicht des Objektes liefert. Es wurde zwischen 1963 und 1971 von Cormack und Hounsfield für die Medizin entwickelt. 1975 wurde die Computertomographie auch für die Werkstoffprüfung genutzt. Außerhalb der Medizin wurde die Computertomographie in der Forstwissenschaft angewandt. Für den Nachweis und zur Untersuchung von Fäule wurde ein spezielles transportables Computer-Tomographie-Gerät gebaut und an die Erfordernisse der Baumdiagnose angepasst. Dabei werden die Stammquerschnittsflächen im Bezug auf holzphysiologische Veränderungen (Farbkerne, Fäulen, etc.) ausgewertet. Farbige Tomographiebilder werden als Referenzdaten für unterschiedliche baumartenspezifische Defekte gesammelt und dadurch Soll-Ist-Vergleiche ermöglicht.

Messmethodik

Das Verfahren der Elektrischen Widerstandstomographie ist seit 1998 in Verwendung und wird an der Fachhochschule Hildesheim / Holzminden / Göttingen, Fachbereich Forstwirtschaft und Umweltmanagement, zur Diagnose von Stammfäulen und zur Farbkerndiagnose eingesetzt.

Durch eine zerstörungsfreie Messung an der Oberfläche wird die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Inneren des Baumes untersucht. Der Zusammenhang wird durch die Maxwellschen Gleichungen und das Ohmische Gesetz beschrieben. Die Form des Baumstammes, die Position der Stromquellen und die Orte des Spannungsabgriffs auf der Oberfläche sind für die Messungen entscheidend. Dazu dienen die sog. Vier-Punkt-Anordnungen von Elektroden (Dipol-Dipol): Stromeinspeisung (A und B) ; Spannungsabgriff (M und N) an einem Baumstamm:

I ist die Stromquelle [Ampere (A)]

U ist die gemessene Spannung [Volt (V)]

Besteht ein homogenes Feld, so ist der spezifische elektrische Widerstand ρ in Ωm (Ohm·Meter) gegeben durch:

$$\rho = K \cdot U / I$$

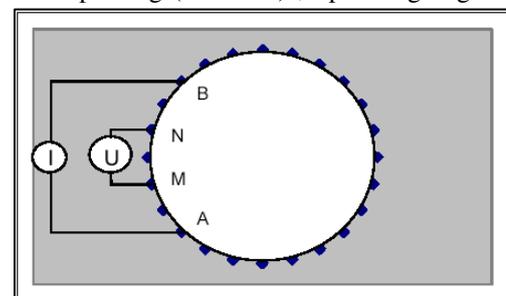


Abb. 1: Vier-Punkt-Elektrodenanordnung

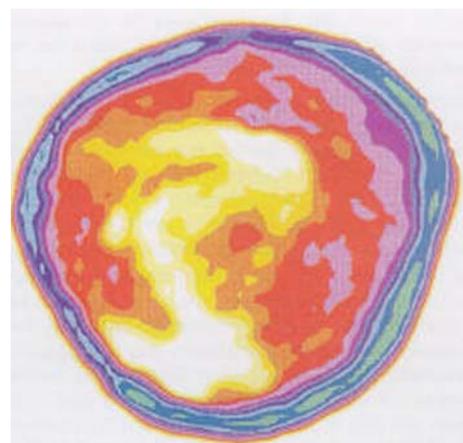
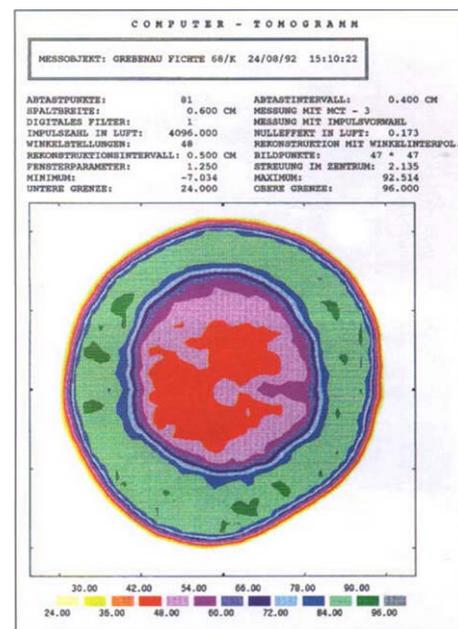
¹ Fachhochschule Hildesheim / Holzminden / Göttingen: Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst: Prof. Dr. U.WEIHs · FH HHG · Büsgenweg 1A · D-37077 Göttingen · Tel. + 49 (0)551 / 5032-259 · Fax: + 49 (0)551 / 5032-299 · Email: Ulrich.Weih@sFH-Goettingen.de

Spezifischer elektrischer Widerstand ρ und elektrische Leitfähigkeit σ hängen über die Beziehung $\rho = 1/\sigma$ zusammen. K ist dabei der sog. „Konfigurationsfaktor“ und hat die Dimension einer Länge (m).

Stehende Bäume müssen vor Ort tomographiert werden. Das CT-Gerät für die Baumtomographie verwendet Radionuklid Cäsium 137 mit einer Halbwertszeit von 30 Jahren und einer Quantenenergie von 662 keV als Strahlenquelle. Ein Tomogramm stellt die Absorptionskoeffizienten des Holzes für die durchdringende Gammastrahlung in dem Stammquerschnitt in Abhängigkeit vom Ort dar. Der Absorptionskoeffizient ist abhängig neben seiner Abhängigkeit von der Quantenenergie der verwendeten Strahlung von

- der Dichte des trockenen Holzes
- dem Wassergehalt des Holzes.

Dafür werden bei der Widerstandstomographie 24 Elektroden (Winkelabstand zwischen je zwei benachbarten Elektroden = 15°) in azimuthaler Richtung um den Holzstamm ringförmig angeordnet und die Nadelspitzen vorsichtig in das Baumkambium eingedrückt. Eine Messvorrichtung erlaubt die Realisierung jeder gewünschten Elektrodenanordnung, so dass sich insgesamt 504 Messkonfigurationen erfassen lassen. Über zwei Elektroden fließt ein Strom von 1 mA durch den Baumstamm, weitere Elektroden messen die Spannung an der Stammoberfläche, so dass sich laterale Leitfähigkeitsunterschiede aufspüren lassen. Diese werden in allen Schichttiefen des Holzes gemessen und gespeichert und per Computer ausgewertet. Werden die Abstände der Elektroden zueinander vergrößert, ist eine schrittweise Tiefensondierung in radialer Richtung möglich. Zunächst ist aber der Konfigurationsfaktor K zu ermitteln, damit für „jede“ Anordnung A-B – M-N „ein“ Datenwert ρ_s als scheinbarer spezifischer Widerstand festgelegt werden kann. Nach einem Algorithmus werden diese scheinbaren Widerstände in einer tomographischen Darstellung zur „wahren“ Widerstandsverteilung umgerechnet und ein zweidimensionales Farbbild erstellt. Diagnosen von holzphysiologischen Veränderungen wie die Rotfäule, Naßbereiche, Frostrisse, Untersuchungen von Jahrringbreiten werden möglich. Der nicht leitende Hohlraum erscheint dabei als schwarzer, sehr hochohmiger, d. h. schlecht leitender Bereich. Jede Baumart zeigt eine charakteristische Verteilung der Absorptionskoeffizienten über dem Stammquerschnitt. Risse und Hohlräume sind als Bereiche ohne Absorption im Tomogramm leicht zu erkennen und genau zu lokalisieren. Ebenso Äste, Astreste und Fremdkörper mit höherer Dichte. Pilzbefall löst mechanische Struktur des Holzes auf und führt zu einer Verringerung der Dichte. Diese Fäulebezirke sind allgemein gut zu erkennen und lokalisierbar. Das Splint- und Kernholz einer Fichte zeichnet sich durch verschiedene Absorptionen aus. Eine deutliche Abgrenzung wird in der Abbildung dargestellt. Das zweite Tomogramm zeigt eine verfaulte Fichte mit schmalen Splint, stark zersetztem Kernholz und Hohlräumen im Inneren des Stammes. Anhand des Tomogrammes lassen sich wichtige Informationen über den Zustand des Baumes sammeln und weiter, im Zusammenhang mit anderen Größen des Ökosystems, auf die Gesundheit des Forstes schließen. Dabei spielt der Wasser und CO_2 -Austausch zwischen der Vegetation, der Erdoberfläche und der Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Ebenso entscheidend ist, dass verschiedenen Baumarten schon im physiologischen Zustand differierende Feuchtigkeitsverteilungen über dem Stammquerschnitt aufweisen. Fichte und Kiefer zeigen zwei Bereiche mit deutlich unterschiedlicher Absorption, während Buchen und Linden bei ebenfalls von außen nach innen



abnehmenden Absorptionskoeffizienten keinen plötzlichen, sondern einen gleitenden Übergang aufweisen. Birke zeigt keinen wesentlichen Unterschied auf dem Querschnitt. Bei Eiche und Ahorn können die Feuchtigkeitswerte sogar von außen nach innen ansteigen.



Abb. 3: Elektrodenkonfigurationsring an Elsbeere



Abb. 4: Nadelelektroden am Baum

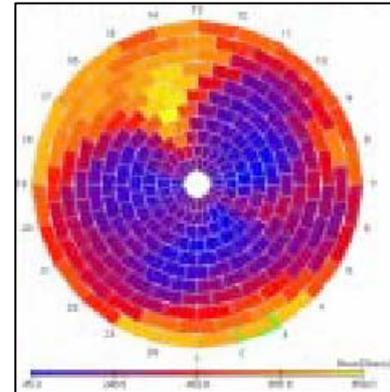


Abb. 5: Messwerterfassungsprogramm

Für eine wissenschaftliche Aussage des Diagnoseverfahrens muss die Ebene des zuvor erstellten Farbtomogramms mit der Schnittfläche des Stammes übereinstimmen.

Unterschiede wie Feuchtigkeit, Temperatur, leitende Inhaltsstoffe und die anatomische Richtung des Holzes verursachen eine Differenzierung der elektrischen Leitfähigkeit des Stammkörpers. Diese komplexen Zusammenhänge machen eine baumartenspezifische Referenzdatenbank unabdinglich.

Farbkerndiagnose am stehenden Rotbuchenstamm

Die Qualität eines Stammes kann erst nach der Fällung auf seine Stärke, der innen Astigkeit und nach der Art und dem Ausmaß der Farbverkernung beurteilt werden. Somit lässt sich der optimale Nutzungszeitpunkt in Bezug auf die Kernfrage nicht exakt bestimmen.

Die Umwandlung von Splint- in Kernholz erfolgt bei der Buche durch einen normalen physiologischen Alterungsprozess. Je älter die Stämme, desto höher die Verkernung. Die holzanatomischen Veränderungen sind dabei bekannt. In den Stämmen bilden sich die Zellkerne und Mitochondrien der Parenchymzellen zurück. Deren Zellinhaltsstoffe ergießen sich in Form von Plasmaausstülpungen in die Tracheen und führen zu einer Blockade der Leitungsbahnen. Durch die Verthyllung verliert das Kernholz seine Funktion als Wasserleiter und es kommt zu einem Absinken des osmotischen Potentials (Ionen-, Elektrolytkonzentration) im Kernholzbereich. Im Stamm erfolgt eine radiale Wasserabwanderung vom Kernholz zum wasserführenden Splint. Der Feuchtegehalt und die osmotischen Werte sinken zur Mitte des Baumes. Während des Prozesses der Verkernung kommt es zum gleichzeitigen Abbau der sich in der Lumina der Parenchymzellen befindlichen Stärke und zum Aufbau von Kerninhaltsstoffen. Durch das Sinken des Feuchtigkeitsgehaltes oxidieren die Kerninhaltsstoffe und es kommt zur typischen Rotfärbung des Buchenkerns. Die Intensität der Kernfarbe ist maßgeblich von der Menge der eingelagerten Kerninhaltsstoffe abhängig.

Abnorme Kerntypen, wie z. B. Frostkern, Schwarzkern, Nasskern, Spritzkern, Schmetterlingskern haben differenzierte Feuchten, können aber durch die Elektrische Widerstandstomographie systematisch voneinander abgegrenzt werden.

Zentraler fakultativer Farbkern („klassischer Rotkern“):

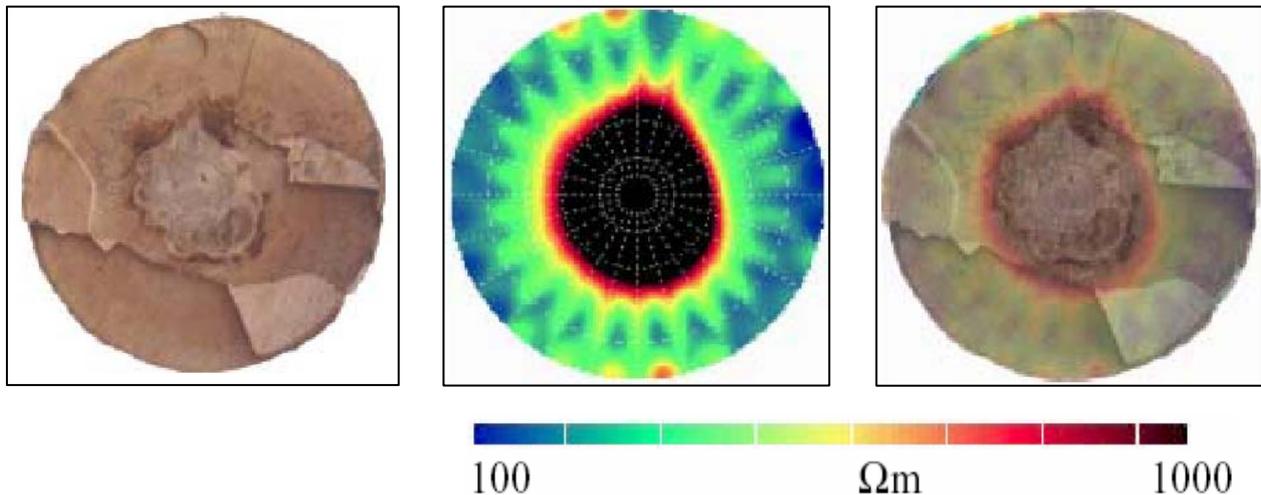


Abb. 6: Stammscheibe : 1. Messebene

Abb. 7: Widerstandstomogramm : 2. Messebene

Abb. 8: Überlagerung 1. und 2. Messeben

Das obere Beispiel zeigt den Stammquerschnitt einer Rotbuche. Die Abbildungen zeigen einen trockenen Rotkern und weißes Buchenholz.

Diffus ausgebildeter abnormer Farbkern mit schwarzen Randzonen:

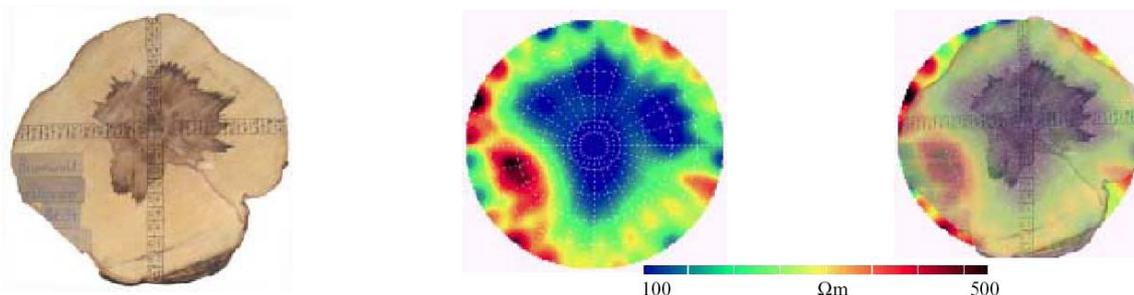


Abb. 9: Stammscheibe Buche : Messebene

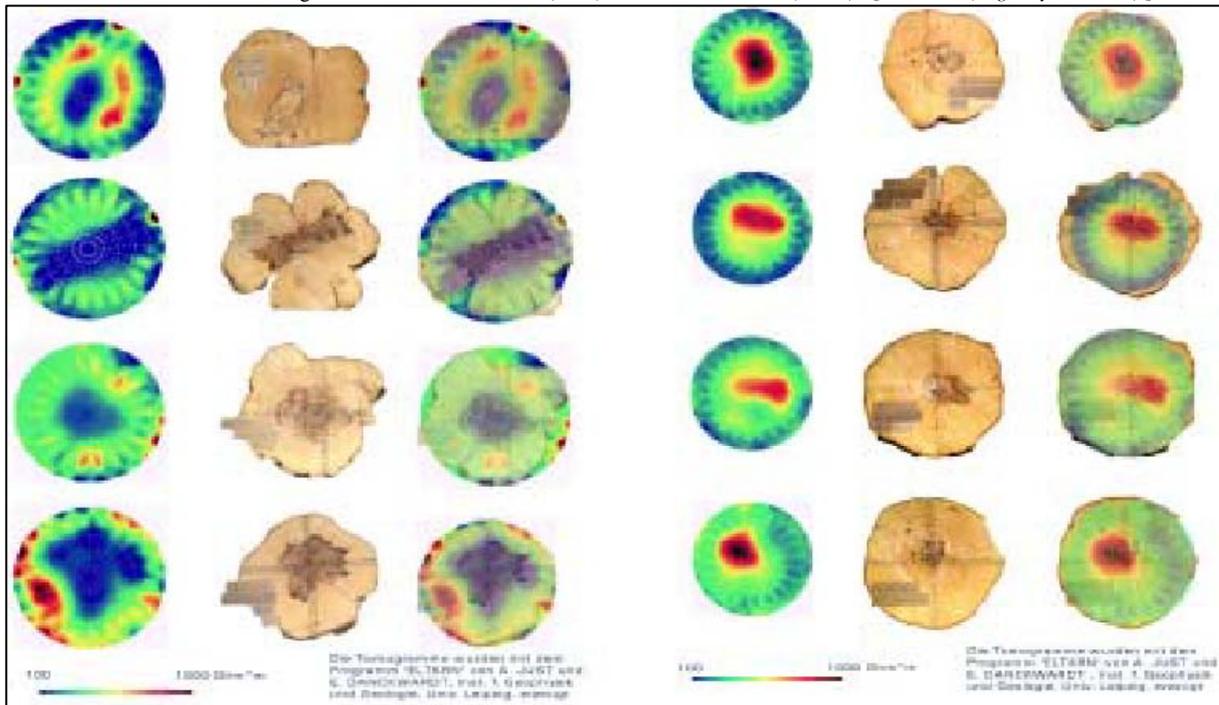
Abb. 10: Widerstandstomogramm : Messebene

Abb. 11: Überlagerungen

Die Tomogramme zeigen, dass bei es bei Rotbuchen ein direkter Zusammenhang zwischen der Art der Verkernung und der Verteilung der Holzfeuchtigkeit im Stamm gibt. Der Wassergehalt des Holzes ist für die Messung des Elektrischen Widerstandes entscheidend.

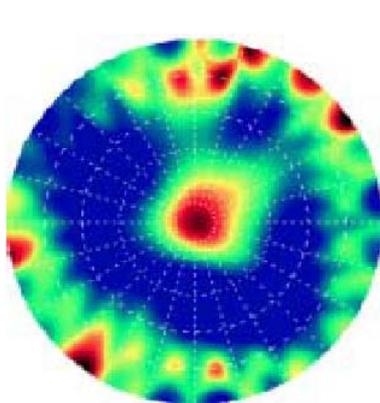
Nach BUCHER (1993) wird der elektrische Widerstand vor allem im Bereich unterhalb der Fasersättigungsfeuchte von ca. 30 % maßgeblich durch die Holzfeuchte beeinflusst. Von 0 % Feuchtegehalt bis zum Fasersättigungspunkt sinkt der Widerstand um den Faktor 106, im Bereich oberhalb nur noch um den Faktor 20 bis 50. Nach den bisher vorliegenden Erkenntnissen hat die Holzfeuchte im lebenden Baum mit Darrbezugsfeuchten von deutlich über 30 % somit nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die in den Abbildungen dargestellte Verteilung des elektrischen Widerstandes. Es ist zu vermuten, dass hier andere Parameter, wie die anatomische Richtung und vor allem auch die Konzentration leitender Inhaltsstoffe sich maßgeblich auf den Holzwiderstand auswirken. Zur Klärung dieser Annahmen sind weiterführende chemische und physikalische Untersuchungen notwendig, die nicht Bestandteil des vorliegenden Projektes waren. Die Farbkernuntersuchungen an Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) haben deutlich gemacht, dass noch eine ganze Reihe von offenen Fragen einer Antwort bedürfen. Obwohl in ca. 70 % aller Fälle ein nachvollziehbarer Zusammenhang zwischen Tomogramm und Holz eigenschaft (Kernart, Markröhrenbereich, Kernriss) gefunden wurde, lässt ist die Aussagekraft des Verfahrens bei der Rotkerndiagnose an Rotbuche zur Zeit noch zu wünschen übrig. Es wird erwartet, dass nach Vorliegen eines an die Baumtomographie angepassten Inversionsprogrammes eine deutliche Verbesserung der Diagnosequalität zu verzeichnen ist.

Abb. 12: Widerstandstomogramme trockene Farbkerne (links) und nasse Farbkerne (rechts) ; [Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.)].



Farbkernndiagnose an stehender Elsbeere

Die Stärke und die innere Ästigkeit am stehenden Stamm lassen sich gut von außen abschätzen. Die Beurteilung des Farbkerns ist nur an den Stammquerschnittsflächen, also erst nach der Fällung, möglich. Eine unverletzte Elsbeere zeigt mit zunehmendem Alter einen klassischen Rotkern. Eine höhere Feuchtigkeit und höhere Elektrolytgehalte hat das äußere weiße Holz.



50 Ω m 300



Abb. 13: Widerstandstomogramm
Überlagerung: Schnittfläche Widerstandstomogramm

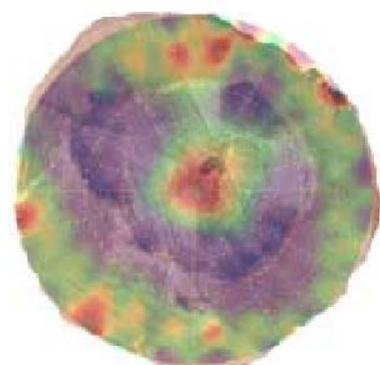
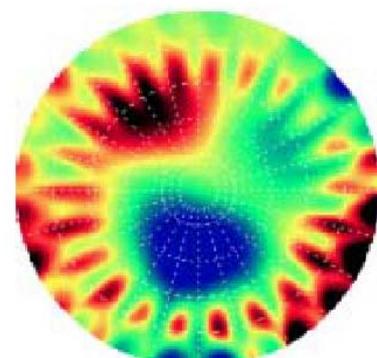


Abb. 14: Ansicht Schnittfläche

Abb. 15:

Elsbeere I: Das Reifholz zeigt im Stammquerschnitt einen großen Bereich mit untypisch niedrigen Widerständen [$\leq 50 \Omega$ m] auf. Der Blau dargestellte Bereich belegt einen gut leitenden, abnormen Farbkern. Dieser macht 50 % des Stammdurchmessers aus und ist am untern Schaft bereits als gravierend anzusehen. Die Überlagerung mit dem Widerstandstomogramm belegt eine abnorme Kernausbildung.

Bereich mit untypisch niedrigen



50 Ω m 300

Elsbeere II: Im Stammquerschnitt ist ein klar abgegrenzter, leicht

dezentraler blauer Bereich hoher Leitfähigkeit zu erkennen. Hier ist ebenfalls ein viel zu geringer Widerstand gemessen worden [$\leq 50 \Omega\text{m}$]. Auch hier geht man von einem abnormen Farbkern aus. Dieser Stamm weist eine höhere Leitfähigkeit und eine wesentlich geringere Ausdehnung auf.

Die derzeitige Darstellung der Widerstandstomogramme ist noch nicht voll befriedigend, da in den Bereichen der Elektrodenankopplung eine Überzeichnung stattfindet. Dies wird durch eine strahlenförmige Zeichnung des Tomogrammes im äußeren Drittel dargestellt. Methodischen Verbesserungen sind bei dem Verfahren noch möglich.

Abb. 16: Gesamtansicht der Elsbeere

Diagnose von Fäule am stehenden Stamm

Die Diagnose von Fäule, der Grad der Holzzerstörung, verschiedene Stammdefekte und Holzveränderungen haben in stehenden Bäumen eine große Bedeutung. Geeignete zerstörungsfreie Meßmethoden, so das Verfahren der Elektrischen Widerstandstomographie, ermöglichen einen zweidimensionalen Blick in das Bauminnere.

Linde : Ausgedehnte Kernfäule mit Durchbruch nach außen im Stammfußbereich

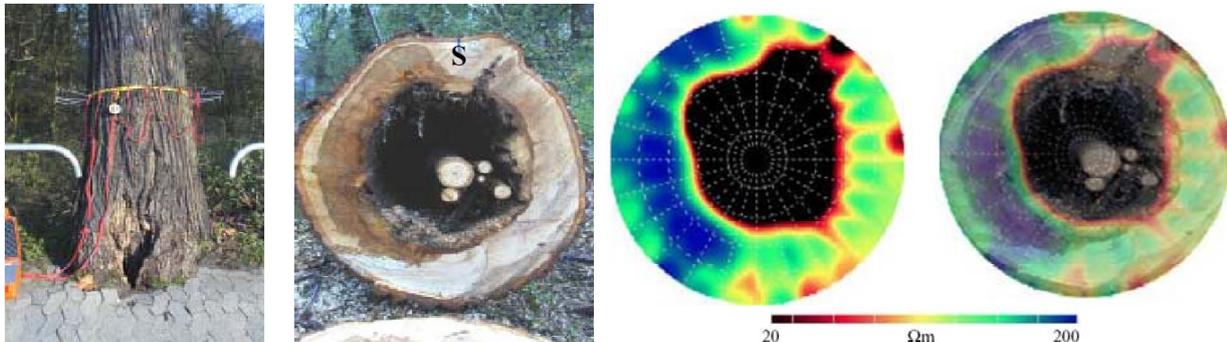


Abb. 17 : Kernfäule einer Linde mit Durchbruch

Abb. 18 : Höhlung im Stamm

Abb. 19 : Widerstandstomogramm

Die Kernfäule einer Linde mit Durchbruch nach außen ist im untern Stammfußbereich entstanden und hat zu einer großen Höhlung im Stamm geführt. Das dazugehörige Widerstandstomogramm beschreibt die genaue Lage und die räumliche Ausdehnung der Kernfäule im Stammquerschnitt. Der nicht leitende Hohlraum erscheint dabei als schwarzer, sehr hochohmiger, d. h. schlecht leitender Bereich. Im linken Restwandbereich des Lindenstammes ist die beginnende Zersetzung zu erkennen, die im Gegensatz zur hochohmigen Lochfäule im Tomogramm als sehr gut leitender, feuchter Bereich blau dargestellt ist. Die trockene Überwallungsnahe geht ebenfalls als schlecht leitender Bereich aus dem Widerstandstomogramm hervor.

Rotbuche : Weißfäule im zentralen Stammbereich

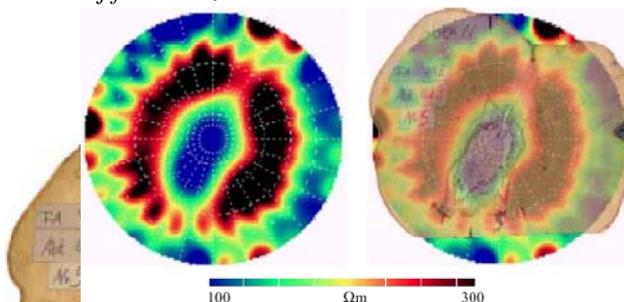


Abb. 20: Stammscheibe : Messebene

Abb. 21: Widerstandstomogramm

Abb. 22: Überlagerung: Widerstandstomogramm und Stammscheibe

Die Messebene der Rotbuche zeigt eine zentral verlaufende, ovale Faulstelle. Im Gegensatz zur Linde ist bei dieser Buche noch keine Höhlung entstanden, die Fäule befindet sich im Zersetzungsstadium. Dies wird auf dem Widerstandstomogramm

durch eine erhöhte Holzfeuchtigkeit und einen erhöhten Elektrolytgehalt dargestellt. Dementsprechend ist die Leitfähigkeit in den blauen Bereichen höher. Bemerkenswert ist wiederum, wie exakt die Lage und die räumliche Ausdehnung der Weißfäule im Stammquerschnitt abgebildet werden. Um die Faulstelle herum hat das Holz eine im Tomogramm deutlich sichtbare schlechter leitende Abwehrzone aufgebaut. Diese Barrieren werden zur Abgrenzung der Fäule vom neu gebildeten, gesunden Holz im Baum angelegt. Die Ausdehnung der Fäule ist abhängig von den Abwehrstoffen der Barrierezonen, bzw. von der Vitalität des Baumes. Im Regelfall ist die Abschottungszone viel größer als die eigentliche Wunde und grenzt die Fäule scharf vom umgebenden gesunden Holz ab. Oft umfasst die Fäule den ganzen Stammumfang. Die Buche reagiert auf die Fäule indem sie eine Abschottungszone ausgebildet, was ein Indiz dafür ist, dass es sich um eine ehemals von außen eingedrungene Schädigung handelt. Entsteht Fäule aus dem Wurzelbereich, kann sich die Kernfäule axial und radial im Stamm ausbreiten. Die Schutzreaktion der Buche auf die Kernfäule reagiert dabei deutlich schlechter. Das Beispiel der Linde verdeutlicht im Gegensatz zur Buche eine Vermorschung von innen heraus. Die Linde war nicht in der Lage entsprechende Abwehrzonen aufzubauen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die elektrische Widerstandstomographie lassen sich schon relativ geringe holzanatomische Veränderungen im Holzkörper lebender Bäume visuell darstellen. Das Verfahren stellt sich immer mehr als eine geeignete Methode zur Baumdiagnose heraus. Holzphysiologische Prozesse, wie die Farbverkernung oder die Entstehung von Fäule im Holz sind messbar. Durch die elektrische Widerstandstomographie lassen sich durch Messungen an der Oberfläche des zu untersuchenden Mediums Aussagen über die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Inneren des Mediums treffen. Diese Prozesse unterscheiden sich von Baumart zu Baumart, nach Art der Erkrankung, aber auch nach normalen Prozessen im Tages- und Jahresverlauf. Weitere chemische Holzanalysen sind wichtig und sollen Aufschluss über diese Prozesse liefern, so dass eine korrekte Interpretation der Tomogramme möglich wird.

Es handelt sich um ein zerstörungsfreies Verfahren. Es müssen noch mehr Referenzen von Stammscheiben gefällter Bäume gesammelt werden um exaktere wissenschaftliche Aussagen treffen zu können. Das Messsystem in seiner derzeitigen Anpassung besitzt eine beschränkte Aussagekraft. Bisher wurden Bäume nur mit niederfrequenten Wechselströmen bis ca. 10 Hz vermessen. Durch weit höhere Messfrequenzen (bis 50 KHz) dürfte es möglich sein, durch die Wahl unterschiedlicher Messfrequenzen zu einer Zellcharakterisierung zu gelangen. Dadurch wird eine bessere Diagnosequalität holzphysiologischer Defekte ermöglicht. Ein weiterer Vorteil der Erhöhung der Messfrequenz besteht darin, dass sich die Messzeit reduzieren lässt. Durch die Beschleunigung des Messablaufes sinkt der Messfehler und eine weitere Qualitätsverbesserung der Tomographiebilder wird ermöglicht. Wichtig ist das Messen genormter Holzproben für die Herstellung einer Datenbank. Solche Grundlagen sind für die Messungen an Bäumen mit unterschiedlichen Jahresringen und für eine Differenzierung zwischen gesunden und erkrankten Hölzern wichtig.

Literatur

URL : <http://www.ndt.net/article/dgzfp/dach55/habermeh/habermeh.htm>

URL : <http://www.tzm.uni-giessen.de/medrep/profil.cfm?key=66>
 URL : <http://www.fu.fh-goettingen.de/cnt/personen/weihs/log/de/anwendung/faeule.htm>
 URL : <http://www.tzm.uni-giessen.de/medrep/profil.cfm?key=66>
 URL : <http://www.ndt.net/article/dgzfp/dach56/habermeh/habermeh.htm>
 URL : <http://www.fu.fh-goettingen.de/cnt/personen/weihs/agip.pdf>
 URL : http://idw-online.de/public/pmid-60276/zeige_pm.html
 URL : <http://www.uni-marburg.de/zv/news/archiv/presse98/29-04-1998.html>
 URL : <http://www.rinntech.com/de/Produkte/Arbotom.htm>
 URL : <http://www.tree-consult.org/deutsch/Tagung/TAG99-2.HTM>
 URL : <http://www.uni-leipzig.de/messen/1998/inno3.htm>
 URL : <http://www.uni-leipzig.de/journal/heft598/bik.html>
 URL : <http://www.fu.fh-goettingen.de/cnt/personen/weihs/log/de/dendrotom/funktion.htm>
 URL : <http://www.fu.fh-goettingen.de/cnt/personen/weihs/log/de/anwendung/faeule.htm>
 URL : <http://www.uni-leipzig.de/journal/heft598/bik.html>
 URL : <http://www.uni-marburg.de/zv/news/archiv/presse98/29-04-1998.html>
 URL : <http://de.wikipedia.org/wiki/CT>
 URL : <http://www.ratsgymnasium-stadthagen.de/cebit/000021.html>
 URL : http://idw-online.de/public/pmid-60276/zeige_pm.html
 URL : <http://www.uni-marburg.de/zv/news/archiv/presse98/29-04-1998.html>
 URL : <http://de.wikipedia.org/wiki/CT>
 URL : <http://www.uni-leipzig.de/journal/heft598/bik.html>
 URL : <http://www.tzm.uni-giessen.de/medrep/profil.cfm?key=66>
 URL : <http://www.ndt.net/article/dgzfp/dach55/habermeh/habermeh.htm>
 URL : http://univis.uni-goettingen.de/formbot/dsc=anew_2Fresrep_view_26rprojs=fakforstw_2Fholzbiologie_2Fholzbiologie_2Fdiagno_26dir=fakforstw_2Fholzbiologie_26ref=resrep_26sem=2003s

Weiterführende Literatur

- HESS, U. / GERHARDT, P. / GERSCHWITZ, M. / KIRSCHER, A. ; MATTHIES, D.: Die Computertomographie in der ökologischen Forschung : Der Radiologe, (1995), Nr. 4, S. 164-165
- MATTHIES, D. / GERHARDT, P.: Die medizinische Röntgen-Computertomographie in der bodenökologischen Forschung : The benefit of medical X-ray computertomography in soil ecological research, 1997
- FROMM, J. / SAUTTER, I. / MATTHIES, D./ KREMER, J. / GANTER, C.: Xylem water relations in spruce and oak trees detected by high-resolution computed tomography. Bestimmung der Xylem-Wasserverhältnisse in Fichten und Eichen mittels hoch-aufgelöster Computertomographie. J. Plant Physiology, (2001), S. 645-654
- HABERMEHL, A. / HÜTTERMANN, A. / LOVAS, G. / RIDDER, H.-W.: Computer-Tomographie von Bäumen, Biol. Nr. 20, (1990), S. 193-200
- NIEMZ, P. / FLISCH, A. / KUCERA, L. J.: Erkennung von Ästen mittels Computertomographie, Holz-Zentralblatt, S. 786-787
- NIEMZ, P. / KUCERA, L. J. / FLISCH, A. / BLASER, E.: Anwendung der Computertomographie an Holz, Holz als Roh- und Werkstoff, Berlin 55, (1997), S. 279- 280
- NIEMZ, P. / KUCERA, L. J. / RIDDER, H. W. / HABERMEHL, A. / FLIESCH, A.: Durchblick mit Computertomographie : Wald und Holz, (1998), S. 7-10
- NIEMZ, P. / FLISCH, A. / KUCERA, L. J.: Erkennung von Ästen mittels Computertomographie : Holz-Zentralblatt, Stuttgart 1999, S. 786-787
- DUBBEL, V. / WEIHS, U. / KRUMMHEUER, F. / JUST, A.: Die elektrische Widerstandstomografie - Neue Methode zur zweidimensionalen Darstellung von Fäulen an Fichte, (1999), S. 1422-1424
- HOLDENRIEDER, O.: Angriff und Abwehr im Baum : Die Entstehung von Kernfäulen, Schweiz. Z. Forstwes., (1994), 145 (11)
- MATTHECK, C. / HÖTZEL, H. J.: Baumkontrollen mit VTA : Fachliche Anleitung und rechtliche Absicherung, Freiburg 1997
- NIEMZ, P. / BODMER, H.-C. / KUCERA, L. J. / RIDDER, H.-W. / HABERMEHL, A. / WYSS, P. / ZÜRCHER, E. / HOLDENRIEDER, O.: Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäulen bei Fichte, Schweiz. Z. Forstwes. 149, (1997), S. 615-630
- SHIGO, A. L. / MARX, G.: Compartmentalization of decay in trees : Agriculture Information Bulletin No. 405, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1997

- STENLID, J. / WÄSTERLUND, I.: Estimating the frequency of stem rot in *Picea abies* using an increment borer, *Scand. J. For. Res.* 1, (1986), S. 303-308
- TOMIZCEK, Ch.: Methodenvergleich zur Abschätzung der Rotfäule an Fichte, *Österr. Forstztg.*, (1996), S. 45-46
- WEIHS U. / KRUMMHEUER, F. / DUBBEL, V.: Zerstörungsfreie Baumdiagnose mittels elektrischer Widerstandstomographie : Jahrbuch der Baumpflege 2001, S. 50-58
- WEIHS, U. / KRUMMHEUER, F. / DUBBEL, V.: Fäulediagnose mittels elektrischer Widerstandstomographie : Landschaftsarchitektur, 31. Jahrg., Heft 2, (2001), S. 26-28
- BETHGE, K. / MATTHECK, K. / HUNGER, E.: Geräte zum Auffinden und Bewerten von holzzerstörender Fäule in Bäumen : Vortrag zum 2. VTA- Spezialseminar : „Messen und Beurteilen am Baum“, Karlsruhe 1996
- BETHGE, K. / MATTHECK, C. / ZIPSE, A.: Die Festigkeiten im Baum und ihre Bestimmung mit dem Fraktometer II, *Neue Landschaft* 12, (1994), S. 921-926
- BUCHER, H. P. / KUCERA, L. J. / WALTER, M. / BONSEN, K.: Elektrische Leitfähigkeitsprofile im Holzkörper mitteleuropäischer Baumarten, bestimmt mit Vitamat : Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf 1992
- BRELOER, H.: Baumkontrollen und Rechtssprechung : Ein Leitfaden für Praktiker, 1992
- HABERMEHL, A. / RIDDER, H.-W.: Computer- Tomographie am Baum : *Materialprüfung* 50, (1992), S. 357-360
- KAESTNER, A. / BAATH, L. B.: A polarimetry based scanning method for wood, *Lund Universty* 1998
- KUCERA, L. J. / NIEMZ, P.: Fäule in Bäumen erkennen : *Wald und Holz*, Bern 1998, S. 27-30
- KUCERA, L. J.: Einsatzmöglichkeiten der Kernspintomographie in der Holzforschung : *Vierteljahrszeitschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, (1989), S. 175-196
- MATTHECK, C. / BETHGE, K.: Richtiger Einsatz der IML-Geräte : Vortrag zur Tagung „Messen und Beurteilen am Baum“, Karlsruhe 1996
- NIEMZ, P.: Rohstoff Holz : Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Stuttgart 1993, Bd. 1
- NIEMZ, P. / KUCERA, L. J./ RIDDER, H. W. / HABERMEHL, A. / FLIESCH, A.: Durchblick mit Computertomographie : *Wald und Holz*, (1998), S. 7-10
- NIEMZ, P. / BODMER, H. C. / KUCERA, L. J. / RIDDER, H. W. / HABERMEHL, A. / WYSS, P. / ZÜRCHER, E. / HOLDENRIEDER, O.: Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäulen, *Schweiz. Forstzeitung* 149, (1998), S. 615-630
- RINN, F.: Baum- und Bauholz- Inspektionen mit Resistograph : Vortrag auf dem 1. Europäischen Symposium für zerstörungsfreie Holzprüfung, Sopron 1994
- SANDOZ, J. L. / LORIN, P.: Evaluation de l'état physico-mecanique de l'arbre sur pied par ultrason : *Protokolle de Messers. Informationsschrift*, IBOIS, Lausanne 1994
- SCHWARZE, F. / FINK, S.: Die Ermittlung der Holzersetzungsmuster am lebenden Baum : *Neue Landschaft*, (1994), S. 182-193
- STENDLAND, J. / WÄSTERLUND, I.: Methodenvergleich zur Abschätzung der Rotfäule an Fichten, *Österreichische Forstzeitung*, (1986), S. 45-46
- Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.: *Computer-Tomografie : Stand der Technik und Zukunftsaussichten*, *Berichtsband 15*, Stuttgart 1988
- Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.: *2. Seminar Computertomografie : *Berichtsband 22**, München 1991
- Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.: *International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications*, *Berichtsband 44*, Berlin 1994
- DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): *Wundbehandlung an Bäumen*, Thalacker Verlag, Braunschweig 1995
- HABERMEHL, A. (Hrsg.): *Die Computer-Tomographie als diagnostische Methode bei der Untersuchung von Bäumen*, *Baum-Zeitung Verlag*, Minden 1994
- HABERMEHL, A. / RIDDER H. W.: Ein neues Verfahren zum Nachweis der Rotfäule : *Intern. Conf. on Problems of Root and Butt Rot in Conifers*. Kassel 1978
- HABERMEHL, A. , PRAMANN, F. W. / RIDDER H. W.: Untersuchung von Alleebäumen mit einem neuen Computer-Tomographie-Gerät : *Neue Landschaft* 31 (1986), S. 806-812
- HABERMEHL, A., RIDDER, H. W. / SCHMIDT, S.: Mobiles Computertomographiegerät zur Untersuchung ortsfester Objekte : *Kerntechnik* 48, (1986), S. 94-99
- HABERMEHL, A. / RIDDER, H. W.: Computertomographie am Baum : *Materialprüfung*, 34, (1992), S. 325-329, S. 357-360
- HABERMEHL, A. / RIDDER H. W.: Methodik und Anwendungen der Computer-Tomographie zur zerstörungsfreien Untersuchung des Holzkörpers von stehenden Bäumen : *Holz als Roh- und Werkstoff*, 50 (1992), S. 465-474 / 51 (1993), S. 1-6, S. 101-106
- KRESTEL, E. (Hrsg.): *Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik*, Siemens AG, Berlin München 1980

- LOVAS, G.: Computertomographische Untersuchungen an stehenden Bäumen : Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 70, Göttingen 1991
- NAUMANN, A.: Computertomographische Untersuchungen zur Wasserversorgung und Vitalität geharzter Altkiefern in der Schorfheide. Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol. 1993
- RIDDER, H. W. / HABERMEHL, A.: Die mobile Computer-Tomographie zur zerstörungsfreien Untersuchung von Bäumen. Proc. Europ. Symp. Nondestructive Evaluation of Wood, Sopron, Ungarn, 1994
- SZENDRÖDI, L. / HABERMEHL, A. / RIDDER H. W.: Computer-Tomographic Investigation of Standing Trees in Hungary. Proc. Europ. Symp. Nondestructive Evaluation of Wood, Sopron, Ungarn, 1994
- WESSOLLY, L.: Bruchdiagnose von Bäumen, (1995), S. 416-423, S. 570-573, S. 635-640
- WIEBE, S.: Untersuchungen zur Wundentwicklung und Wundbehandlung an Bäumen unter besonderer Berücksichtigung der Holzfäule. Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaft der Lud. Max. Universität, München 1992