

1 Einleitung und Fragestellung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der **”Elektrischen Widerstandstomographie”** und ihrer Eignung zur **zerstörungsfreien Diagnose wertmindernder Rotkerne** und Fäulen an Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). Der zerstörungsfreie Blick ins Innere stehender Bäume ist in mehrfacher Hinsicht von besonderem Interesse. Zum einen möchte der forstliche Betriebsleiter den Baum zum Zeitpunkt der Wertkulmination nutzen, bevor er aufgrund seines Alters und der damit verbundenen holzphysiologischen Veränderungen, z. B. durch Farbverkernungen, Fäulen etc. entwertet wird. Bislang stehen ihm dafür nur die ungenaue Ansprache äußerer Merkmale bzw. mehr oder weniger invasive Verfahren zur Verfügung. Rotkernigkeit an Buchenrundholz kann mehr oder minder drastische Entwertungen verursachen, die **Preisunterschiede von bis zu 1000 %** zwischen schälfähigen Buchen und solchen mit Rotkernen $\geq 2/3$ bedingen. Besonders drastisch ist der Wertverlust bei abnorm verkernten Buchen oder solchen mit Spritzkernen. Bei einem Anteil von 17,6 % an der Gesamtbewaldung Deutschlands und mit 7,6 Mio Fm Jahreseinschlag (BMELF, 1990) besitzt die Bildung wertmindernder Kerne in Rotbuche große forstwirtschaftliche Relevanz.

Zum anderen unterliegen Eigentümer von Bäumen, von denen eine Gefährdung des öffentlichen Verkehrs ausgehen kann, der **Verkehrssicherungspflicht**, welche nicht explizit gesetzlich geregelt ist, sich aber aus dem Schadensersatzanspruch des § 823 BGB ergibt. Eigentümer solcher Bäume sind gesetzlich verpflichtet, regelmäßig den Zustand dieser Bäume zu überprüfen. Als richtungweisend für die Art dieser Prüfung gelten die Ausführungen zum Urteil des Bundesgerichtshofes vom 21.01.1965 (VersR 1965, 475 = NJW 1965, 815 = DAR 1965, 128), die u. a. formulieren: ”Der Verkehrssicherungspflicht ist genügt, wenn die nach dem jeweiligen Stand der Erfahrung und Technik als geeignet und genügend erscheinenden Sicherungen getroffen sind, also den Gefahren vorbeugend Rechnung getragen wird, die nach Einsicht eines besonnenen, verständigen und gewissenhaften Menschen, erkennbar sind”. Die Beurteilung der Bruchsicherheit von Bäumen ist schwierig und bislang stehen keine anerkannten, zerstörungsfreien Verfahren zur Verfügung, die einen zweidimensionalen Eindruck vom Inneren des Baumes erlauben. Eine tomographische Querschnittsdarstellung würde die **Einschätzung von Bruchsicherheitsrisiken** erleichtern, wie z. B. durch die Diagnose der Restwandstärke bereits hohl gewordener Bäume.

Besonders interessant ist der zerstörungsfreie Blick ins Innere von Bäumen aber natürlich auch im Sinne der **Grundlagenforschung**. Er ermöglicht die Beobachtung physiologischer Veränderungen im Baum über längere Zeiträume hinweg, ohne das Beobachtungsobjekt dabei zu beeinträchtigen. Veränderungen der Holzfeuchte im Wechsel der Jahreszeiten, die Genese von Verkernungsprozessen oder die Untersuchung von Abbautätigkeiten holzzersetzender Pilze an stehenden Bäumen wären einige der Fragestellungen, die mit Hilfe eines solchen zerstörungsfreien Diagnoseverfahrens untersucht werden könnten.

1999 hat vom Standpunkt des forstlichen Nutzers ausgehend die Forschungsgruppe Non-Destructive-Testing-of-Trees der Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement in Göttingen, mit der Entwicklung eines Tomographieverfahrens, basierend auf der Messung elektrischer Widerstände, begonnen. Die grundlegenden Prinzipien der elektrischen Widerstandsmessung als Sondierungsverfahren sind der Geophysik und dort speziell der Lagerstätten erkundung entliehen und wurden an die Verhältnisse der Messungen an stehenden Bäumen angepasst. Die technischen Entwicklungen werden in einem Forschungsverbund mit anderen Kooperationspartnern

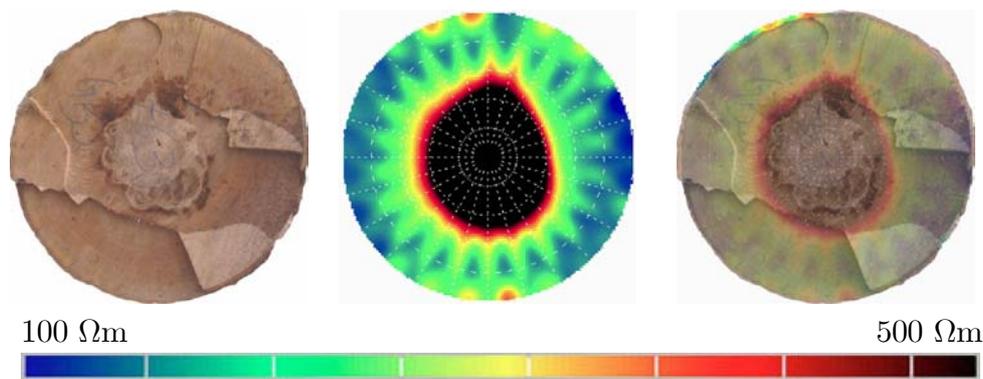


Abbildung 1: Beispiel eines Tomographieergebnisses: Schnittebene einer rotkernigen Buche, Tomogramm dieser Buche und rechts eine Überlagerung von Foto und Tomogramm; blau-grüne Partien stellen gut leitende Bereiche dar, rot und dunkle Partien bedeuten hohe Widerstände (Die Tomogramme wurden mit dem Programm ELTKRN von JUST und DANKWARDT, TU Leipzig erzeugt)

realisiert. Zu diesen Partnern gehören die Nachwuchsforschergruppe "Neue numerische Verfahren zur Lösung inverser Probleme" des Instituts für Numerische und Angewandte Mathematik der Universität Göttingen, die Firma E.S.F. Electronic aus Göttingen, das Institut für Geophysik der Universität Göttingen und das Institut Anaesthesiological Research der Uniklinik Göttingen.

Zu Beginn der Forschungsarbeiten richtete sich das Interesse der Forschungsgruppe Non-Destructive-Testing-of-Trees dabei schwerpunktmäßig auf die Diagnose wertmindernder Rotkerne an Buche (*Fagus sylvatica* L.), inzwischen sind nahezu alle forstlich relevanten und im urbanen Bereich angebaute Baumarten Teil der Forschungsarbeiten. Ziel der elektrischen Widerstandstomographie an z. B. Rotbuche ist die **zweidimensionale Darstellung durch holzphysiologische Unterschiede verursachter Leitfähigkeitskontraste** in der gewählten Messebene eines stehenden Baumes. Die der Methode zugrunde liegende Annahme ist, dass Rotkernigkeit oder auch Fäulen in Rotbuche Veränderungen in der elektrischen Leitfähigkeit des Holzes verursachen, die mit Hilfe der elektrischen Widerstandstomographie sichtbar gemacht werden können. Die v. g. Forschungsgruppe der Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement führte Vorversuche durch, bei denen die elektrischen Widerstandstomographien an stehender Buche sehr wohl messbare Leitfähigkeitskontraste über den Stammquerschnitt zeigten. Nach der Fällung der Testbäume ließen sich häufig Übereinstimmungen von Tomogramm³ und Querschnitt feststellen (siehe Abb. 1; eine Übersicht von Tomographieergebnissen an stehender Rotbuche findet sich im Anhang, Abb. 43 und 44).

In anderen Fällen stimmten das Tomogramm und der physiologische Zustand des Baumes nicht überein. Hieraus ergaben sich folgende Versuchsfragen: Warum konnten einige der physiologischen Veränderungen im Holz sichtbar gemacht werden, andere nicht? Hierzu ist es notwendig, leitfähigkeitsrelevante chemische und physikalische Parameter der verschiedenen holzphysiologischen Bereiche im Holz zu analysieren. Darüber hinaus ist es wichtig herauszufinden, ob die bei der Tomographie ermittelten Werte für die elektrische Leitfähigkeit bzw. den Widerstand reell sind, d. h. mit der tatsächlichen Leitfähigkeitsverteilung im Baum übereinstimmen.

³Alle in dieser Arbeit erscheinenden Tomogramme wurden mit dem Programm ELTKRN von JUST und DANKWARDT erzeugt (JUST ET AL. (1997), NITSCHKE & DANKWARDT (1992)).

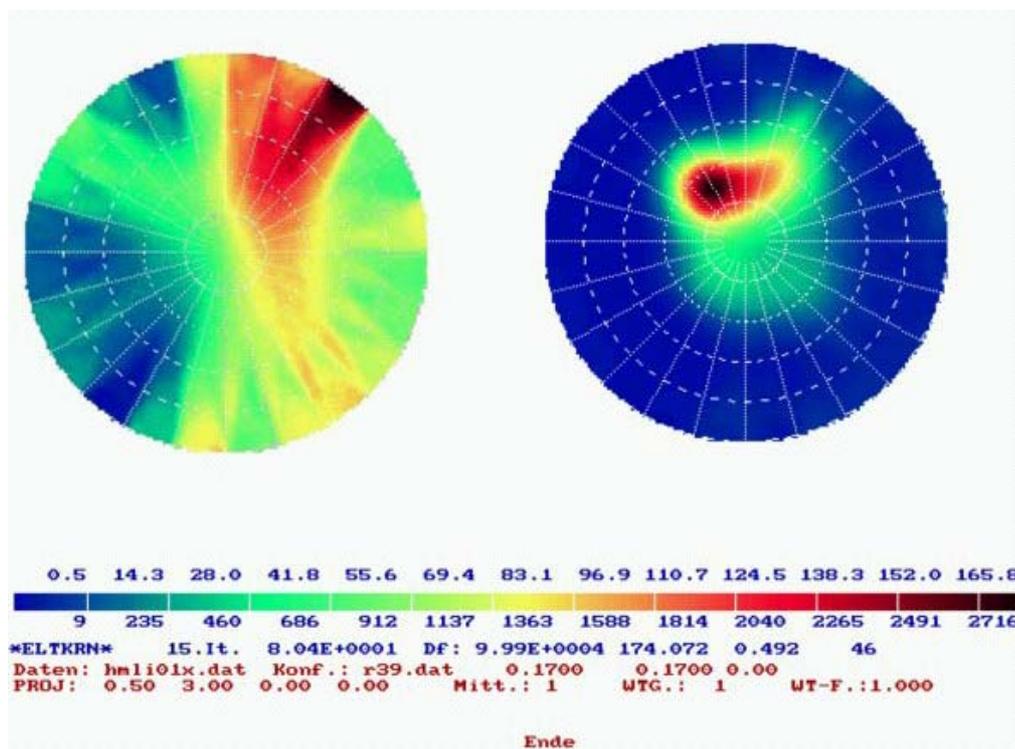


Abbildung 2: Beispiel eines Tomographieergebnisses: Backprojection (links) einer hohlen Linde und auf der rechten Bildseite das Tomogramm mit der vom Programm vorgegebenen Auflösung

Das erste Ergebnis der Tomogrammberechnung ist die sogenannte Backprojection (Abb. 2), das Ausgangsmodell für die weitere Iteration. Die Backprojection zeigt auf dem Farbkeil unter dem Tomogramm den niedrigsten und den höchsten ermittelten spezifischen elektrischen Widerstand. Zwischen diesen beiden Werten wird der Farbkeil ausgerichtet. Treten nun starke Abweichungen in den Messdaten auf, durch z. B. Artefakte (Hohlkehlen, die sehr hohe Widerstände hervorrufen) oder tatsächlich vorhandene, sehr große Widerstandskontraste (feuchte Splintbereiche plus stark isolierende Hohlräume im Inneren), so verdeckt die große Variationsbreite des Farbkeils interpretationsfähige Leitfähigkeitskontraste, die sich auf einem viel engeren Intervall abspielen. Werden solche Abweichungen nicht erkannt und durch Eingrenzen des Farbkeils auf ein bestimmtes Widerstandsspektrum eliminiert, kann es zu Fehldiagnosen kommen. In diesem Zusammenhang ist es besonders wichtig, die in einer Baumart potentiell möglichen **elektrischen Widerstände für gesundes und physiologisch verändertes Holz** zu kennen, um durch die richtige Einstellung des Auflösungsbereiches eine korrekte Diagnose durchzuführen. Abb. 2, die eine vom Programm selbstgewählte Auflösung des Farbkeils darstellt, veranschaulicht im Vergleich mit Abb. 3, die eine korrekt gewählte Auflösung des Farbkeils aufweist, den Einfluss der Auflösung der Widerstandsskala und die Gefahr der Fehldiagnose, wenn die tatsächlich in einer Baumart potentiell auftretenden elektrischen Widerstände unbekannt sind.

Für die korrekte Deutung von Tomogrammen stehender Rotbuchen ist ein fundiertes Basiswissen notwendig. So müssen z. B. die Spannweiten auftretender elektrischer Leitfähigkeiten in Rotbuchen bekannt sein, um die Tomogramme sinnvoll zu skalieren und auszuwerten. Zusätzlich ist bekannt, dass die elektrischen Widerstände im Verlauf der Jahreszeiten wie auch standortsabhängig und sogar zwischen einzelnen "gesunden"

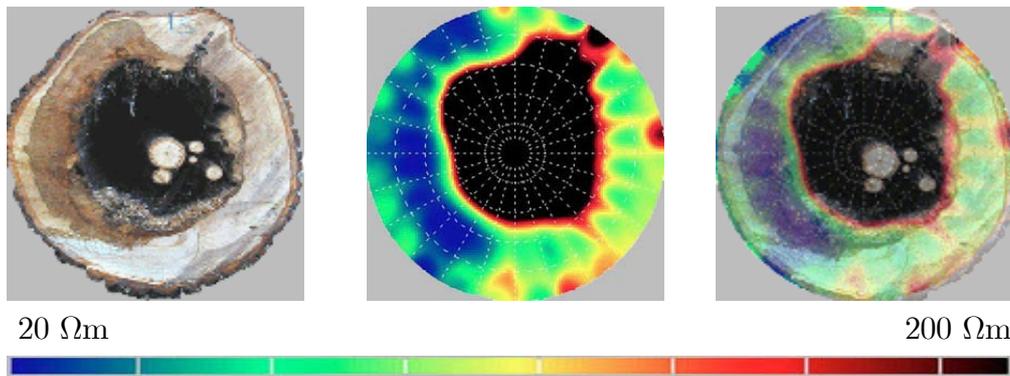


Abbildung 3: Die Schnittenebene der hohlen Linde, korrekt aufgelöstes Tomogramm dieser Linde und rechts eine Überlagerung von Foto und Tomogramm

Individuen einer Art auf dem gleichen Standort stark variieren können. Die jährlichen bzw. täglichen Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeit in stehenden Buchen wurden daher ebenso erfasst, wie die innerhalb der Baumart Buche auf einem bestimmten Standort auftretende Variabilität der elektrischen Widerstände. Die Methode der elektrischen Widerstandstomographie an stehenden Bäumen ist neu und die Faktoren, welche die elektrische Leitfähigkeit im stehenden Baum beeinflussen, sind noch weitestgehend unbekannt. In dieser Arbeit liegt daher ein besonderer Schwerpunkt auf der Fragestellung, welche physiologischen Holzunterschiede in stehenden Buchen durch die elektrische Widerstandstomographie sichtbar gemacht werden können und welche dem Messverfahren verborgen bleiben.

Das Verfahren der elektrischen Widerstandstomographie ordnet sich in eine Reihe anderer mehr oder weniger zerstörungsfreier Verfahren zur Untersuchung stehender Bäume ein. Diese werden im Weiteren vorgestellt, ebenso wie die Ergebnisse einer Literaturrecherche zur Nomenklatur, Physiologie und Ursachen der Rotkernbildung an Rotbuche.

2 Stand des Wissens

Zunächst soll an dieser Stelle ein **Überblick über aktuell verfügbare Verfahren zur Diagnose physikalisch wirksamer Holzveränderungen** (z. B. Fäulen u. Kernbildungen) an stehenden Stämmen gegeben werden. Für die elektrische Widerstandstomographie als Diagnoseverfahren im Speziellen und ihre Interpretation ist es besonders wichtig, die **holzphysiologischen Vorgänge bei der Verkernung der Buche** zu kennen, besonders solche, welche die elektrische Leitfähigkeit des Holzes verändern. Ein Resümee der Literatur zur Nomenklatur und Physiologie der fakultativen Kernbildung an Rotbuche gewährt einen Einblick in den Stand der Wissenschaft zu diesem Punkt. Die Übersicht der Literatur zur **Leitfähigkeit von Holz** beschreibt die leitfähigkeitsrelevanten Faktoren in Holz, soweit sie bis heute bekannt sind.

2.1 Verfahren zur Diagnose physikalisch wirksamer Holzveränderungen am stehenden Stamm

Folgende Verfahren stehen zur Zeit für die Untersuchung von Defekten in lebenden Bäumen zur Verfügung: die Bohrkernentnahme mit dem Zuwachsbohrer, Bohrwiderstandsmessgeräte (Teredo, Resistograph 1410), Schallmessungen (Impulshammer-Schallmesssystem, Gerät Sylvatest, Picus-Schalltomograph), die Computertomographie, die Kernspintomographie, Leitfähigkeitsmessungen (Vitamat und Shigometer), die Thermographie und Impulsradar. Diese Verfahren finden überwiegend in der Baumpflege im Rahmen der gesetzlichen Verkehrssicherungspflicht und in der forstlichen Forschung Verwendung, sind aber in der forstlichen Praxis eher unüblich. Baumdiagnoseverfahren für forstwirtschaftliche Zielgruppen müssen preiswert, schnell, einfach in der Anwendung, aussagesicher und zerstörungsfrei sein. Vergleichende Untersuchungen zu diesen Baumdiagnoseverfahren finden sich bei GRUBER (2000) und NIEMZ ET AL. (1998).

- **Bohrkernentnahme**

Die Bohrkernentnahme (mit Durchmessern von 4 - 6 mm) ist ein invasives und zerstörendes Verfahren (BRANDT & RINN, 1989), das in der Praxis vor allem zur Zuwachsbestimmung und im Rahmen der Baumpflege relativ häufig verwendet wird. Für die Diagnose holzanatomischer Veränderungen am lebenden Baum ist es nur bedingt geeignet, da der Bohrkern quasi nur eine lineare Betrachtung durch den Stammquerschnitt erlaubt. Aus diesem Grund sind mindestens zwei Bohrkernentnahmen über Kreuz notwendig. Holzfäulen, Hohlräume und Kerne lassen sich nur dann annähernd korrekt diagnostizieren, wenn sie zentral orientiert und von gleichmäßiger, runder Form sind. Untersuchungen von STENDLAND & WÄSTERLUND (1986) zur Diagnose von Fäule an Fichten mittels Zuwachsbohrer zeigten, dass bei Bohrungen im BHD-Bereich 80 %, in 30 cm Höhe nur 40 - 70 % der Fäulen erkannt wurden; NIEMZ ET AL. (1998) erreichten bei ihren Untersuchungen eine Trefferquote von 46 %.

Die bei diesem Verfahren entstehenden Bohrkanäle gelten als mögliche Eintrittspforten für Pilze und Bakterien. Bei Wertholzstämmen besteht zu dem das Risiko der Wertminderung durch Wundreaktion (RING, 1951), vermehrte Krebsbildung, unregelmäßigen radialen Zuwachs und Mosaikkernbildung (BEISEL ET AL. (1967); BOSSHARD (1974); SACHSSE & FERCHLAND (1988)). Desinfektionsmaßnahmen und der Einsatz von Wundverschlussmitteln verringern das Infektionsrisiko (LENZ & OSWALD (1971); BRANDT & RINN (1989); BUCHER ET AL. (1993)), sind aber in der forstlichen Praxis weder üblich

noch ökonomisch sinnvoll. Eingehende Untersuchungen über das Ausmaß physiologischer Veränderungen nach solchen Verletzungen liegen bei BEISEL ET AL. (1967) und SCHÖPFER (1961) vor. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass Wundverschlussmittel keinen ausreichenden Schutz nach einer Bohrung erwirken. Dagegen stuft LENZ & OSWALD (1971) das Fäulerisiko für die Fichte durch Bohrspanentnahme als gering ein. DUJESIEFKEN ET AL. (1991) weisen darauf hin, dass dieses Risiko eng verbunden ist mit dem Vitalitätszustand des Baumes und der Jahreszeit, in der die Probe entnommen wird. Auf der anderen Seite erlaubt der entnommene Bohrspan sowohl die Isolierung evtl. vorhandener Pilze wie auch von Bakterienstämmen für weitergehende Untersuchungen. Der Zeitaufwand für eine Bohrspanentnahme pro Baum wird mit 5 bis 10 min veranschlagt. Für die Endoskopie, bei der nach der Bohrkernentnahme ein Endoskop in das Bohrloch geführt wird, gilt Analoges wie für die Bohrkernentnahme (KUCERA & NIEMZ, 1998).

- **Bohrwiderstandsmessgeräte Teredo (Technologiepark Clausthal Management GmbH) und Resistograph 1410 (IML-GmbH)**

Der Resistograph und der Teredo ermitteln den Stromverbrauch über den Eindringwiderstand beim Einbohren einer speziellen Bohrnadel in den Holzkörper und lassen Rückschlüsse auf die Holzeigenschaften entlang des Bohrkanals zu (GRUBER, 2000). **Der Teredo** besitzt eine 0,8 bis 1mm starke Prüfnadel aus Stahl, die mit bis 15.000 Umdrehungen pro Minute in den Baum getrieben wird. Dabei entsteht eine hohe Reibungsenergie, so dass sich der Bohrkopf quasi in das Holz brennt, was ebenso wie die dünne Nadel die Infektionsgefahr entlang des Bohrkanals herabsetzen soll. Bei diesem Gerät wird neben der Stromaufnahme des Motors beim Eindringen in das Holz auch die Stromaufnahme beim Zurückziehen der Prüfnadel gemessen, da die sogenannte Rückzugskurve ebenfalls Aufschlüsse über den Holzzustand ermöglichen soll. **Der Resistograph** arbeitet mit einer geringeren Umdrehungszahl als der Teredo, einem 1,5 mm dicken Bohrer und einem größeren Bohrkopf. Es wird keine Rückzugskurve aufgezeichnet. GRUBER (2000) kommt zu dem abschließenden Ergebnis, dass der Resistograph und der Teredo Rotkerne an Buche nicht diagnostizieren können, da sowohl die Holzdicke wie auch andere physikalische Holzeigenschaften von verkerntem und unverkerntem Buchenholz gar nicht oder nur in geringem Maße variieren.

- **Schallmessungen**

Über eine Kontaktstelle (Schallgeber) wird ein Schallimpuls in das Holz gesandt, der auf der gegenüberliegenden Seite von einem Schallempfänger aufgenommen wird. Gemessen wird die Geschwindigkeit, die ein Schallimpuls auf seinem Weg durch den Holzkörper benötigt (GRUBER, 2000). Bei dem **Picus-System** wird eine zweidimensionale Darstellung, ein Tomogramm erzeugt, indem viele Schallausbreitungswege betrachtet werden. Im Gegensatz zu den linear angeordneten Messungen des **Impulshammers** und des **Sylvatest-Gerätes** soll das Picus-System Größe und Lage eines Defektes anzeigen können. Liegt der Defekt nicht in Schallausbreitungsrichtung, ist er zu klein oder sind die holzphysiologischen Veränderungen nicht gravierend genug, können die Schallmessungsverfahren keine ausreichenden Aussagen liefern. GRUBER (2000) stellt in seinen Untersuchungen fest, dass die Impulshammermethode nicht für die Diagnose von Rotkernigkeit an Buche geeignet ist, da die Rotkernbildung die holztechnologischen Eigenschaften für die Schalleitung (E-Modul und Rohdichte) nicht beeinträchtigt. Er vermutet, dass lediglich

der Graukern und die damit verbundenen Abbauprozesse durch Pilze die Schalleitungseigenschaften von Holz verändern könnten. NIEMZ ET AL. (1999) merkt an, dass hinsichtlich der Grundlagen der Schallausbreitung im Holz umfangreicher Forschungsbedarf besteht.

- **Computertomographie (CT)**

Bei der Computertomographie handelt es sich um ein von Habermehl und Ridder (vgl. HABERMEHL & RIDDER (1992); HABERMEHL ET AL. (1996)) entwickeltes **mobiles System für Gamma-CT-Messungen** (KUCERA & NIEMZ, 1998). Das Verfahren beruht auf der Messung der Absorption der Strahlung einer Cäsium 137-Strahlungsquelle durch einen organischen Körper. Die Höhe der Absorption hängt in erster Linie von der Dichte und der Feuchte des untersuchten Materials ab. Das System erzeugt eine zweidimensionale hochaufgelöste Darstellung in der Messebene. Dennoch ist die Computertomographie nicht praxisrelevant wegen des enormen apparativen Aufwandes, einer Diagnosezeit von ca. einer Stunde pro Baum und der umfangreichen Vorsichtsmaßnahmen sowie notwendigen Genehmigungen für eine Messung, da die CT mit einer radioaktiven Strahlungsquelle arbeitet.

- **Kernspintomographie**

Die Kernspintheorie beruht nach KUCERA & BRUNNER (1986) auf einer Eigenschaft von Atomkernen, die als Eigendrehimpuls (Spin) bezeichnet wird. Die rotierende Ladung eines solchen Kerns bildet ein magnetisches Dipolmoment, welches in der Natur eine beliebige Ausrichtung annehmen kann. In einem starken und homogenen Magnetfeld werden die Spins entlang des Magnetfeldes ausgerichtet. Die Kernresonanz selber ist die Wechselwirkung zwischen einer Hochfrequenz-Sendespule und den ausgerichteten Atomkernen. Durch einen Hochfrequenzimpuls (100 MHz) werden die Kerne aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht. Nach dem Abschalten des Impulses bewegen sich die Kerne in die Ausgangsposition zurück. Die dazu benötigte Zeit, die Relaxationszeit, ist abhängig vom Kern und seiner Umgebung. Um solche **NMR (Nuclear Magnetic Resonance)-Signale** zu produzieren und zu detektieren, wird in praktischen Anwendungen meist die gepulste Methode (NMR-Impulsspektroskopie) verwendet (WOLTER ET AL., 1994). Die ausgesandten Signale werden von einer Empfangsspule aufgenommen. Dabei werden wahlweise die Relaxationszeit, die Spindichte oder der sogenannte chemical shift erfasst. Als Ergebnis werden im Wesentlichen Unterschiede im Wassergehalt eines organischen Körpers erfasst. Das Verfahren besitzt eine immens hohe Auflösung, kann den Baum bis auf zellulärer Ebene darstellen und eignet sich daher, holzphysiologische Merkmale wie Reaktionsholz, Jahrringaufbau, Drehwuchs etc. zu visualisieren. Der Zeitaufwand für eine Messung beträgt wenige Minuten.

- **Elektrische Leitfähigkeit**

Für die Messung elektrischer Leitfähigkeiten im stehenden Stamm standen bislang die Geräte **Vitammat** und **Shigometer** zur Verfügung. Das Shigometer ermittelt die elektrischen Widerstände durch eine Messsonde, die in ein Bohrloch von 3 mm in den Stamm getrieben wird (BRANDT & RINN (1989); KUCERA (1997); KUCERA & NIEMZ (1998)). Der Vitamat erzeugt mit zwei 4 mm starken Elektroden, die in 2 cm Abstand in den Baum getrieben werden, ein lineares Messprofil, das bis max. 25 cm in den Baumquerschnitt reicht. Defekte werden dann erkannt, wenn sie in der Ausbreitungsrichtung liegen