

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Forstverein
<b>Band:</b>	137 (1986)
<b>Heft:</b>	8
<b>Artikel:</b>	Kernspintomographie und elektrische Widerstandsmessung als Diagnosemethoden der Vitalität erkrankter Bäume
<b>Autor:</b>	Kuera, Ladislav J.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-765180">https://doi.org/10.5169/seals-765180</a>

### Nutzungsbedingungen

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

### Conditions d'utilisation

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

### Terms of use

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

**Download PDF:** 18.01.2026

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

# Kernspintomographie und elektrische Widerstandsmessung als Diagnosemethoden der Vitalität erkrankter Bäume

Von Ladislav J. Kučera

Oxf.: 811.5 - 015.25:48

(Aus dem Institut für Wald- und Holzforschung der ETH Zürich)

## 1. Ein Forschungskonzept für die Untersuchung der Baumvitalität

Die vielen kranken Bäume in unseren Wäldern stehen seit einigen Jahren im Mittelpunkt des öffentlichen und fachlichen Interesses. Allein schon die Wahrnehmung dieser Erkrankungen ist ein Lernprozess für uns alle. Die Forschung soll Auskunft geben über die Ursachen und Folgen der Erkrankungen. Schadstoffe in Luft, Wasser und Boden können quantitativ nachgewiesen werden, doch darf die Wirkung abiotischer und biotischer Faktoren und von Synergien nicht ausser acht gelassen werden. Dadurch erweist sich eine lückenlose Beweisführung zu Lasten eines einzelnen Schadfaktors als sehr schwierig. Bei den Folgen der Erkrankungen hat sich die Forschung einerseits auf das quantitative Vorkommen — Schadstufe in Funktion der Baumart und des regionalen Auftretens — und anderseits auf die Untersuchung der Veränderungen in der Krone, dem Wurzelwerk und dem Holz erkrankter Bäume konzentriert.

Unsere eigenen Untersuchungen beruhen auf einem Dreistufen-Konzept mit dem Grundgedanken, dass jeder Prognose eine Diagnose vorauszugehen hat. Dieses Konzept sieht folgende Hauptziele vor:

1. Das Erarbeiten von analytischen Diagnose-Methoden zur Bestimmung der Baumvitalität.
2. Die Entwicklung artspezifischer Hilfsmittel (zum Beispiel Tabellen) für die Prognose des Baumwachstums.
3. Die Zusammenstellung von Kriterien und Angaben für eine verwendungsbezogene Prognose der Holzqualität.

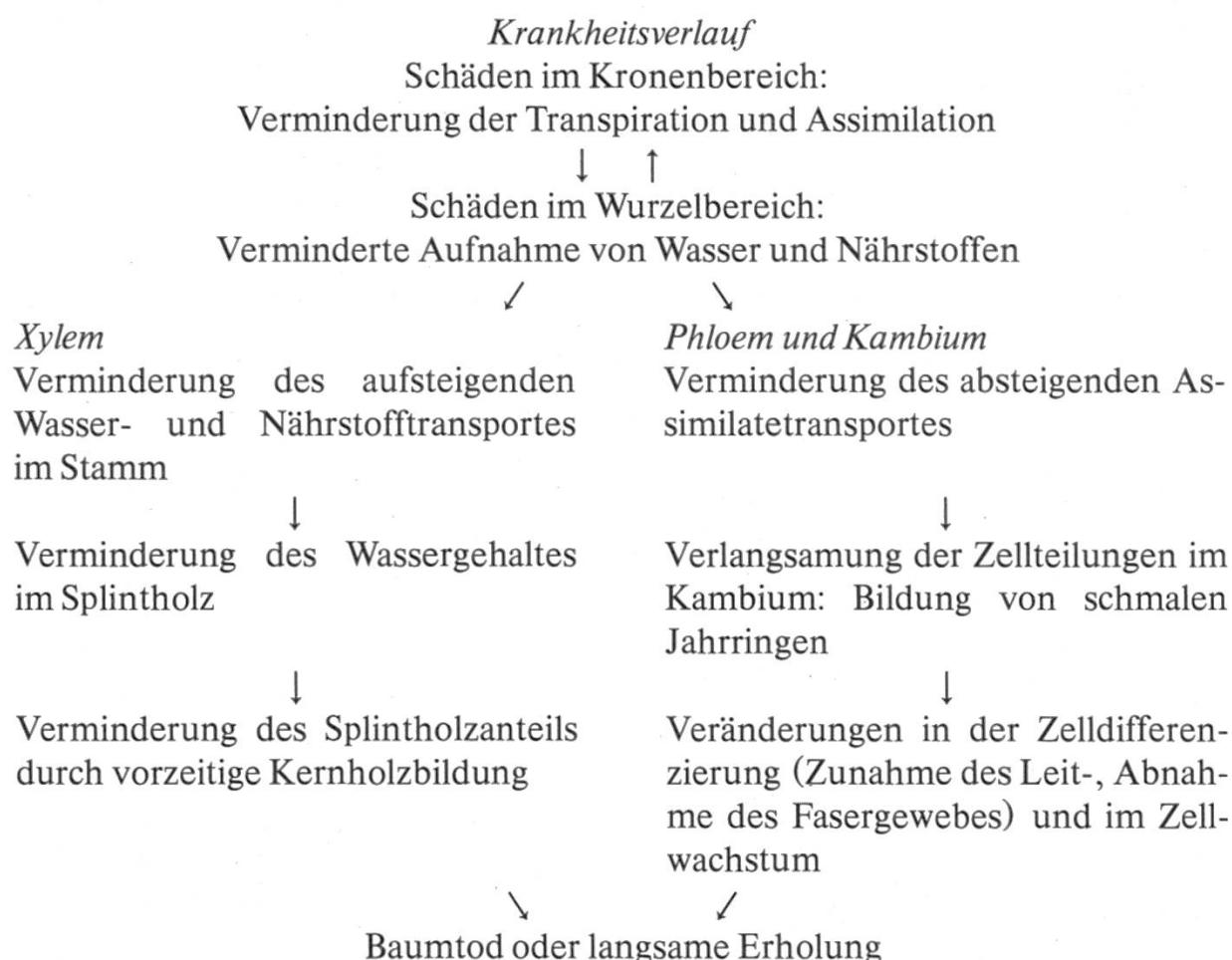
Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf das Problem der Diagnose. Derzeit wird der Gesundheitszustand der Bäume mit den folgenden visuellen Methoden beurteilt:

- A. Kronenansprache (Nadel- respektive Blattverlust; Blattmerkmale; Triebentwicklung).

B. Infrarot-Luftbildinterpretation (Farbansprache beruhend auf unterschiedlicher Wärmeabgabe gesunder und kranker Bäume).

Diese Methoden sind unentbehrlich für grossflächige Bestandesaufnahmen der Erkrankungen. Da sie hinsichtlich Quantifizierung, Reproduzierbarkeit und Interpretation gewisse Probleme bieten, wäre ihre Verifizierung durch ergänzende Methoden erwünscht. Beide erwähnten Methoden beruhen auf der Beurteilung von Kronen-Symptomen; sie sollten durch praktikable krankheitsanalytische Methoden, welche auch zur Klärung der physiologischen Abläufe und Zusammenhänge beitragen, ergänzt werden. Wir kennen die Umwelt des Baumes oft recht genau, weniger jedoch deren Wirkungsweise auf die physiologischen Vorgänge im Baum. Dies hat verschiedene Ursachen. Zunächst ist der Baum seiner Grösse wegen ein schwieriges Untersuchungsobjekt. Sodann sind die Symptome der Erkrankungen vielfältig und im Wurzelwerk und in der Krone oft unterschiedlich ausgeprägt. Schliesslich erfordern wiederkehrende und zeitabhängige Untersuchungen zerstörungsfreie oder zumindest schonende Methoden, welche im Bereich der Wurzeln kaum möglich und am Schaft bisher unbekannt oder zuwenig beachtet blieben.

Unsere Kenntnisse und Vorstellungen des Krankheitsverlaufs können im folgenden vereinfachten Schema dargestellt werden:



Eine krankheitsanalytische Methode sollte einen der obenerwähnten Vorgänge erfassen. Die Krone ist zwar ein empfindlicher, zugleich aber auch unspezifischer Indikator des Gesundheitszustandes. Sie unterliegt endogen gesteuerten periodischen Veränderungen, welche durch Klimaeinflüsse akzentuiert werden können. Vor allem sind aber Schäden in der Krone oft reversibler Natur. Untersuchungen im Wurzelbereich scheiden als Diagnose-Methode aus praktischen Gründen aus. Damit rückt der Wasserhaushalt im Stamm – die Wassertransport-Geschwindigkeit, die Splintholzfeuchtigkeit und der relative Splintholzanteil – in den Vordergrund. Die Kernholzbildung ist eine allgemeine Gesetzmässigkeit in unseren Waldbäumen. Nach dem Zeitpunkt der Bildung, der Regelmässigkeit des Auftretens und der Farbe des Kernholzes sind unsere Baumarten in vier Kategorien einzuteilen: mit obligatorischem (zum Beispiel Eiche), fakultativem (zum Beispiel Buche) oder hellem (zum Beispiel Fichte) Kernholz respektive mit verzögerter Kernholzbildung (zum Beispiel Hagebuche; *Bosshard* 1966). Eine Besonderheit bilden die von Bakterien besiedelten Nasskerne (zum Beispiel bei der Tanne). Die Kernholzbildung ist in jedem Fall ein irreversibler Vorgang und bedeutet eine umfassende Funktionsenthebung der Wasserleit- und Speichergewebe. Entsprechend ist das Kernholz am Wassertransport nicht mehr beteiligt, oft trockener als das Splintholz und bar von Reservesubstanzen. Der Feuchtigkeitsgehalt sinkt im Nadelholz von 120 bis 180 % auf 30 bis 50 % und im Laubholz von 70 bis 100 % auf noch 50 bis 90 % (Angaben für Föhre, Fichte, Tanne, Buche und Eiche nach *Trendelenburg* und *Mayer-Wegelin* 1955).

Der Feuchtigkeitsgehalt des Splintholzes ist physiologisch und jahreszeitlich bedingten Schwankungen unterworfen, während im Kernholz eher konstante Werte anzutreffen sind (*Trendelenburg* und *Mayer-Wegelin* 1955; *Bernhart* 1965). Bei den Arten mit obligatorischer Kernholzbildung ist die natürliche Dauerhaftigkeit des Kernholzes verglichen mit dem Splintholz erhöht. Auslösend für die Kernholzbildung ist eine Verminderung des Wassertransports (*Huber* 1956a). Darauf treten in den innersten Wasserleitbahnen Luftembolien auf, die schliesslich zur Aufhebung des Wassertransports in den betroffenen Wasserleitzellen führen. Hierbei werden im Nadelholz die Verbindungen zwischen den Tracheiden – die Hoftüpfel – verschlossen; die Gefässe des Laubholzes werden durch die Einlagerung gummiartiger Substanzen oder durch Auswüchse aus benachbarten Speicherzellen – die Thyllen – definitiv verstopft. Die Reservestoffe der Speicherzellen werden veratmet und pilzwidrige Metabolite – die Polyphenole – in den Zellwänden oder den Zellumina eingelagert. Die abschliessende Lignifizierung der absterbenden Speicherzellen bedeutet eine zusätzliche Hydrophobisierung ihrer Zellwände (*Zimmermann* 1983). Während die Wassertransport-Geschwindigkeit und die Splintholzfeuchtigkeit tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, ist der Splintholzanteil eine art- und altersspezifische Grösse, welche im vorgegebenen Rahmen und unter Berücksichtigung von standortbedingten und waldbaulichen Gegebenhei-

ten Schlüsse über die Baumvitalität zulässt. Da die Kernholzbildung irreversibel ist, kann eine Erhöhung des Splintholzanteiles und somit der Wasserleitfläche nur über lange Jahre guten Wachstums – wenn überhaupt – erfolgen. Dass die erkrankten Nadelbäume tatsächlich Wassermangel-Erscheinungen aufweisen, wurde von *Bauch, Klein, Frühwald* und *Brill* (1979) für die Tanne und von Frühwald und Bauch (1984) für die Fichte gezeigt. Die Veränderungen der Kambiumtätigkeit (Bildung schmaler Jahrringe) und der Zelldifferenzierung (veränderte Gewebeanteile) sowie des Zellwachstums sind als Vitalitätsindikatoren dem Splintholzanteil unterlegen. Die Anlage neuer Jahrringe ist ein wesentlich langsamerer Vorgang als die Verminderung des Splintholzanteiles, weshalb besonders bei Fichten oft absterbende Bäume mit normal ausgebildeten Jahrringen vorkommen.

Aus dem Geschilderten geht hervor, dass der Wasserhaushalt und insbesondere der Splintholzanteil im Stamm als Indikatoren der Baumvitalität anzusehen sind. Die Bestimmung des Wassergehaltes und des Splintholzanteiles im gefällten Holz kann, je nach Präzisionsanspruch, nach verschiedenen Methoden (Darrtrocknung, elektrische Widerstandsmessung, iodometrische Titration nach Karl Fischer) vorgenommen werden. Zusätzlich kann die Splintholz-Kernholz-Grenze auch chemisch oder zytologisch bestimmt werden. Die hier zu lösende Aufgabe impliziert jedoch die Bestimmung des Splintholzanteiles im Holz stehender Bäume, wobei eine Verletzung des Baumes tunlichst zu vermeiden ist. Im folgenden Überblick werden die methodischen Ansätze für ein solches Untersuchungsverfahren kurz erörtert.

## 2. Methodische Ansatzmöglichkeiten und vorhandene Erfahrungen

Das Holz besteht in unseren Breitengraden aus definierten Jahreszuwachsen, welche im Stammquerschnitt als konzentrische Jahrringe erkennbar sind. Mikroskopisch ist es ein Verbund axialer und radialer Röhrensysteme, deren Wände im submikroskopischen Bereich eine mehrfachlaminierte Sandwich-Struktur aufweisen. Chemisch ist das Holz schliesslich aus aliphatischen und aromatischen makromolekularen Bausteinen aufgebaut. Aus thermischer, elektrischer und akustischer Sicht ist das Holz ein typischer Isolator. Es ist ferner ein Dielektrikum und ein Diamagnetikum. Der vorwiegend axial orientierte Aufbau des Holzkörpers resultiert in einer umfassenden Anisotropie praktisch sämtlicher physikalischer Eigenschaften, wobei die Leitfähigkeiten und die Festigkeiten parallel zum Faserverlauf tendenziell höhere Werte aufweisen als in radialer oder tangentialer Richtung. Eine Schlüsseleigenschaft des Holzes ist seine Dichte. Quantitative Variationen in den vier obenerwähnten Organisationsbereichen bewirken Schwankungen der Dichte und somit der physikalischen Eigenschaften des Holzes. Eine physikalische Kennzahl ist keine echte

Konstante, sondern vielmehr eine Zustandsgrösse; sie wird nämlich von der Temperatur und insbesondere vom Wassergehalt des Holzes mitbestimmt. Das Holz ist, bedingt durch seine freien Hydroxylgruppen, ein hydro- und hygroskopischer Kapillarkörper mit einer immensen inneren Oberfläche. Die Wasseraufnahme findet bis zur Fasersättigung — etwa 30 % Wassergehalt — in Form des gebundenen Wassers in den Zellwänden und an den Zellwand-Oberflächen statt. Oberhalb der Fasersättigung wird das Wasser frei tropfbar in den Hohlräumen von Holzzellen eingelagert, bis diese vollständig gefüllt werden. Aus der Reindichte der Holzsubstanz — rund  $1,50 \text{ g/cm}^3$  — und der Raumdichte der betreffenden Holzart kann das maximale Wasseraufnahme-Vermögen abgeleitet werden; es erreicht bei leichten Holzarten Werte über 200 %. Mit steigendem Wassergehalt werden die Isolations- und Festigkeitseigenschaften des Holzes herabgesetzt. Dies gilt besonders im Bereich unterhalb der Fasersättigung. Da mit dem Wassergehalt korreliert, kann praktisch jede physikalische Holzeigenschaft, allerdings mit unterschiedlichen Genauigkeiten, als Messargument für die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit herangezogen werden.

Die meisten bisherigen Erfahrungen wurden im Zusammenhang mit der Untersuchung verborgener Krankheiten im Baum und versteckter Mängel oder Schäden im Holz gesammelt. Man wollte dabei die sogenannte innere Astigkeit, die Variabilität der Raumdichte oder metallische Einschlüsse im Holz aufdecken. Besonders zahlreich waren die Anstrengungen, einen von aussen her unsichtbaren Pilzbefall aufzuspüren. Pilze verursachen chemische Veränderungen in der Zellwand, welche sich auch in veränderten physikalischen Eigenschaften manifestieren. Zu den veränderten Isolations- und Festigkeitswerten kommen auch Unterschiede im Wassergehalt und in der Ionen-Konzentration im Gewebe hinzu. Um diese Veränderungen aufdecken zu können, wurden einige methodische Ansätze erprobt: Röntgenstrahlen (*Eslyn 1959*), eine Drucksonde (*Zycha und Dimitri 1962*), Ultraschall (*Miller, Taylor und Popeck 1965*) und die elektrische Widerstandsmessung (*Skutt, Shigo und Lessard 1972*). Praktische Anwendung hat nur die elektrische Widerstandsmessung erfahren. Bei dieser Methode hat man mit relativ einfachen Mitteln recht gute Ergebnisse erzielt. Als vorteilhaft erwies sich dabei der Umstand, dass die erhöhte Kationen-Konzentration gemeinsam mit dem gestiegenen Wassergehalt bei den sogenannten Nassfäulen eine klare Abgrenzung befallener Partien ermöglicht. Weniger günstig ist die Lage beim Nachweis der sogenannten Trockenfäule, eines Pilzbefalles, welcher oft im Zusammenhang mit Verwundungen bei den Nadelhölzern vorkommt. Das nach seinem Erfinder benannte Shigometer findet beim Aufspüren von Pilzbefall sowohl bei stehenden Bäumen als auch im gefällten Holz — roh oder verbaut — Anwendung. Es sind zahlreiche weitere verwandte Geräte erhältlich, deren Entwicklung durch einen möglichen Einsatz im Baugewerbe — bei der Untersuchung des Wassergehaltes von sanierungsbedürftigen Mauern — begünstigt wurde. Die handelsüblichen Geräte arbeiten mit zwei getrennten Sonden oder mit einer Kombisonde. Die Sonden werden in

vorgebohrte Löcher geschoben oder ins intakte Holz geschlagen. Die Länge der Schlagsonden liegt bei höchstens 50 mm, jene von Bohrsonden bei maximal rund 300 mm. Die Durchmesser der Sonden variieren zwischen 2 und 4 mm, und die Sonden sind bis auf die Messspitze kratzfest isoliert. Im Shigometer wird eine pulsierende Gleichstromquelle verwendet, welche bessere Resultate als eine konstante Stromquelle liefern soll. In Untersuchungen an Fichten zeigte Zschuravleva (1972), dass die elektrische Leitfähigkeit der kambialen Gewebe mit der Wüchsigkeit des Baumes positiv korreliert ist. Die Ursache hierfür sieht man im höheren Wasser- und Ionen-Gehalt und in der unterschiedlichen Proteinstruktur der wüchsigen Bäume verglichen mit langsamer wachsenden Individuen. Bauch, Klein, Frühwald und Brill (1979) ist es gelungen, bei 30 Tannen von verschiedenem Gesundheitszustand die Splintholz-Kernholz-Grenze mit einem Shigometer festzusetzen. Interessante Ergebnisse wurden neulich mit einem mobilen Computertomographen erzielt (Lausch und Mayer 1985). Die von einer um den Baumstamm rotierenden Quelle emittierten Röntgenstrahlen werden von Detektoren erfasst, und aus der unterschiedlichen Intensität des Signals wird auf Dichteunterschiede im Baum geschlossen. Diese Dichteunterschiede werden zu einem Schnittbild oder einem dreidimensionalen Bild verarbeitet und als Unterschiede im Wassergehalt interpretiert, wobei eine gesetzmässige Verteilung der Holzdichte im Stammquerschnitt angenommen wird. Diese Voraussetzung trifft jedoch in verschiedenen Fällen nicht zu (zum Beispiel exogen verursachte Variationen der Jahrringbreite und des Spätholzanteiles, eingewachsene Äste, Druckholz und anderes). Die Aufnahmedauer beträgt einige Stunden je Stammquerschnitt.

Im Rahmen der Entwicklung analytischer Diagnose-Methoden haben wir uns auf zwei Verfahren konzentriert: auf die Weiterentwicklung der bekannten elektrischen Widerstandsmessung und auf eine auf diesem Gebiet völlig neue Methode, die Kernspintomographie.

### 3. Die elektrische Widerstandsmessung

Trockenes Holz ist ein ausgezeichneter Isolator. Je nach Holzart wurden in trockenem Holz spezifische Widerstandswerte von  $10^{15}$  bis  $10^{16}$  Ohm.cm gemessen, Werte vergleichbar mit jenen von Glas, Gummi und Porzellan (Kollmann 1951; Lin 1967). Mit steigendem Wassergehalt sinkt der spezifische Widerstandswert respektive steigt die spezifische Leitfähigkeit des Holzes. Von absolut trockenem Zustand bis 7 % Wassergehalt ist der Logarithmus des spezifischen Widerstandes indirekt proportional zum Feuchtigkeitswert (%). Zwischen 7 % Wassergehalt und der Fasersättigung ist der Logarithmus des spezifischen Widerstandes indirekt proportional zum Logarithmus des Feuchtigkeitswertes (%). Oberhalb der Fasersättigung ist der Zusammenhang nicht linear und mit

steigendem Wassergehalt zunehmend schwächer (Lin 1967). Die Sättigung des Holzes mit gebundenem Wasser bewirkt eine Verminderung des spezifischen Widerstandes um den Faktor  $10^6$ , die Aufnahme des frei tropfbaren Wassers bis zur völligen Sättigung aller Hohlräume noch eine solche um den Faktor 50 (Brown, Panshin und Forsaith 1952). Aus diesem Grund haben sich Feuchtigkeitsmessgeräte basierend auf dem elektrischen Widerstand des Holzes besonders im Bereich unterhalb der Fasersättigung durchgesetzt. Es besteht sogar vielerorts die irrite Meinung, eine derartige Messmethode sei oberhalb der Fasersättigung nicht anwendbar. Dies mag vielleicht zutreffen, sofern quantitativ exakte Ergebnisse gefordert werden. Denn bei hohen Feuchtigkeitswerten spielt die Ionen-Konzentration eine zunehmend wichtige Rolle (Lin 1965). Unser Ziel ist jedoch lediglich die Festlegung der Splintholz-Kernholz-Grenze, wozu semiquantitative Ergebnisse vollauf genügen.

Die handelsüblichen Geräte mit nadel- oder messerförmigen Elektroden können in zwei Kategorien eingeteilt werden;

1. Die Elektroden werden ins Holz gepresst oder geschlagen; die maximale Eindringtiefe beträgt je nach Gerät 5 bis 50 mm.
2. Die Doppel-Elektrode wird in ein vorgebohrtes Loch von 3,5 mm Durchmesser eingeführt; die maximale Eindringtiefe beträgt 300 mm.

Die Geräte der ersten Kategorie bieten eine zu geringe Eindringtiefe, um die Splintholz-Kernholz-Grenze in allen Fällen sicher zu erfassen. Bei den Geräten der zweiten Kategorie wird der Baum durch die Bohrung eines radialen Hohlraumes verletzt, und es entstehen auch messtechnische Probleme.

A. *Die Baumverletzung.* Eine Bohrspanentnahme verursacht stets oxidative Holzverfärbung und oft auch einen Pilzbefall. Präventive Massnahmen wie Baumwachspropfen und Desinfektionsmittel können diese Vorgänge mildern, nicht jedoch verhindern (Lorenz 1944; Hepting, Roth und Sleeth 1949; Houston 1971). Auch die Anwendung des Shigmeters hat ähnliche Folgen (Shigo und Shigo 1974). Damit werden aber der Gesundheitszustand des Baumes und die Holzqualität des wertvollsten Stammabschnittes gefährdet. Offensichtlich aus dieser Einsicht heraus wurden beim Prototyp des Shigmeters Stahlnadeln zum Einschlagen als Elektroden verwendet (Skutt, Shigo und Lessard 1972). Sie wurden erst später durch die Kombisonde ersetzt, welche ein Bohrloch erfordert.

B. *Messtechnische Probleme.* Die Transportgeschwindigkeit des Wassers im Splintholz erreicht in der Phase intensiver Transpiration Werte, welche auf die elektrische Widerstandsmessung in einem Bohrloch Einfluss haben können. In der *Tabelle 1* sind Angaben von Huber (1956b) wiedergegeben und von m/h in cm/min und mm/sec umgerechnet.

Der Bohr- und der Messvorgang liegen zeitlich auseinander. Selbst wenn es sich nur um Sekunden handeln sollte, können Veränderungen des Wassergehaltes im Bohrloch (Füllen mit auslaufendem Wasser) oder in der umge-

benden Holzmasse (Austrocknen) erwartet werden. Derartige Beobachtungen wurden von Shigo und Shigo (1974) tatsächlich gemacht.

*Tabelle 1.* Mögliche Höchstgeschwindigkeiten des Transpirationsstroms verschiedener Baumarten (nach Huber 1956b).

Baumart	Transportgeschwindigkeit m/h	cm/min	mm/sec
Immergrüne Nadelhölzer	1,2	2	0,3
Zerstreutporige Laubhölzer	1–6	1,7–10	0,3–1,7
Ringporige Laubhölzer	4–44	6,7–73	1,1–12,2

Aus den obenerwähnten Gründen haben wir die Entwicklung eines neuen Messgerätes beschlossen, das die Vorteile der beiden besprochenen Gerätetypen – minimale Veränderungen im Baumkörper und grosse Eindringtiefe – vereinigen sollte. In der ersten Etappe unserer Arbeit haben wir mit einigen handelsüblichen Geräten der ersten Kategorie (Lignomat mini Ligno E, Lignometer HE 60, Lignometer HT 100, Rammelektrode E 12) sowie mit einer einfachen Eigenentwicklung der zweiten Kategorie (bestehend aus Akku-betriebener Bohrmaschine; Bohrer von 4,5 mm Durchmesser und 150 mm Länge; Zwillingselektroden in 15 mm Abstand, vollisoliert und mit federnder Kontaktspitze; Ohmmeter) mehrere Fragen untersucht und dabei folgende mess- und materialtechnischen Ergebnisse erzielt:

#### A. Messtechnische Ergebnisse

1. Die Zeitspanne zwischen dem Einbringen der Elektroden und der Ablesung des Messwertes wirkt sich signifikant auf das Messergebnis aus. Bei lufttrockenem Holz stellt sich ein konstanter Wert nach rund 2 Sekunden ein, wogegen bei Feuchtigkeiten über 50 % in den ersten 15 Sekunden sich sowohl der Messwert als auch die Streuung der wiederholten Messergebnisse stark verändern (*Abbildung 1*). Holzart: Fichte/Tanne. Gerät: E 12 mit HT 100. Stichprobe: 60 Wertepaare.
2. Die Holztemperatur bzw. ihre Korrektur durch eine entsprechende Einstellung beeinflusst signifikant das Messergebnis. Eine Erhöhung der Temperatur resultiert bei unverändertem Feuchtigkeitsgehalt des Holzes in einem niedrigeren Widerstandswert (Lin 1967). Holzart: Fichte/Tanne. Gerät: E 12 mit HT 100. Stichprobe: 30 Wertepaare.
3. Die Länge der nicht isolierten Elektrodenspitze (2 respektive 8 mm) hat bei einer gleichmässigen Feuchtigkeitsverteilung im Versuchsstoff keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis (*Abbildung 2*). Holzart: Fichte/Tanne. Gerät: E 12 mit HT 100. Stichprobe: 32 Wertepaare.

4. Die Wiederholbarkeit der Messergebnisse hängt vom Feuchtigkeitsbereich und vom Gerätetyp ab und ist als zufriedenstellend zu bezeichnen. Der Variabilitätskoeffizient des Mittelwertes erreichte Werte von 1,01 bis 5,68 % für das Gerät HE 60 mit der Sonde E 12 und ausgezeichnete 0,42 – 1,30 % für das Gerät HT 100 mit der Sonde E 12. Hingegen lässt die Eichung der Geräte auf konkrete Feuchtigkeitswerte oberhalb von 50 % Holzfeuchtigkeit zu wünschen übrig. Holzart: Fichte/Tanne. Stichprobe: 10 Gruppen à 10 Werte.

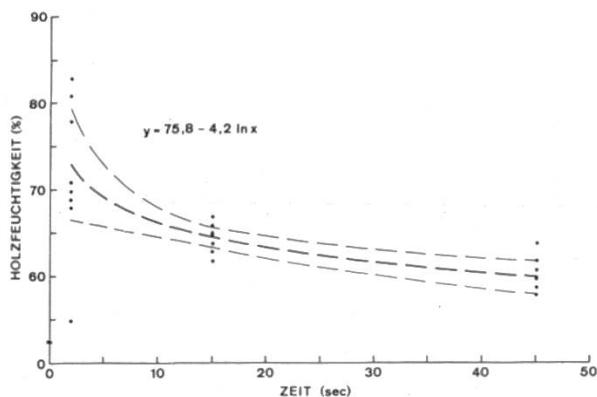


Abbildung 1. Abhängigkeit des Messergebnisses (Holzfeuchtigkeit in %) vom Zeitabstand der Messung nach dem Einbringen der Elektroden (Zeit in sec). Messwerte ( $N = 60$ ), Regressionskurve und 95 % Vertrauensgrenzen.

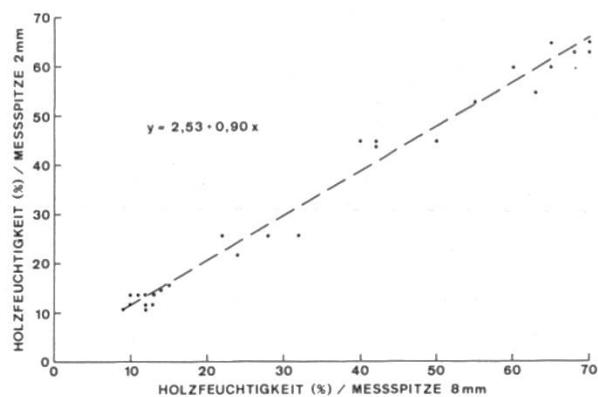


Abbildung 2. Einfluss der Länge der Elektroden-Messspitze (2 respektive 8 mm) auf das Messergebnis (Holzfeuchtigkeit in %). Messwerte ( $N = 32$ ) und Regressionsgerade.

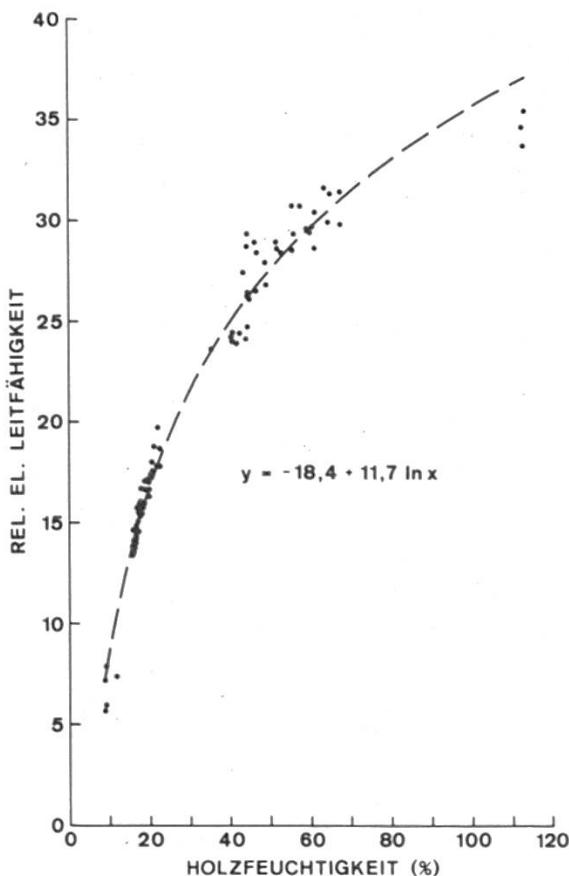
## B. Materialtechnische Ergebnisse

1. In einer tangentialen Oberfläche kann die Messung des Feuchtigkeitsgehaltes im Holz mit zwei Elektroden wahlweise parallel oder quer zum Faserverlauf vorgenommen werden. Verursacht durch die unterschiedliche Variabilität (quer zur Faser um den Faktor 3 kleiner als längs zur Faserrichtung), wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten aus den beiden Messrichtungen ermittelt. Holzart: Fichte/Tanne. Gerät: E 12 mit HT 100. Stichprobe: 14 Wertepaare.
2. In 21 Wiederholungen konnte zu 100 % eine künstliche Feuchtigkeitsgrenze, bestehend aus zwei zusammengefügten Holzstücken von deutlich verschiedener Feuchtigkeit, festgestellt werden. Der diskontinuierliche Elektrodenvorschub betrug dabei 5 mm. Holzart: Fichte/Tanne. Gerät: E 12 mit Ohmmeter.

3. Die Messbarkeit der Holzfeuchtigkeit ist im Bereich von 5 bis 135 % recht gut (*Abbildung 3*), wobei die Rammelektrode präzisere Werte (höhere Bestimmtheitsmasse der Korrelation tatsächlicher und gemessener Feuchtigkeitswerte) als die Bohrsonde liefert. Ebenfalls ist die Messgenauigkeit bei den untersuchten Nadelhölzern besser als bei den Laubhölzern. Die Holzarten sind in der *Tabelle 2* angegeben; der Stichprobenumfang betrug 100 Wertepaare je Holzart. Geräte: Bohrsonde mit Ohmmeter, E 12 mit HT 100.

*Tabelle 2.* Bestimmtheitsmasse der Feuchtigkeitsbestimmung, nach Gerätetyp und Holzart geordnet.

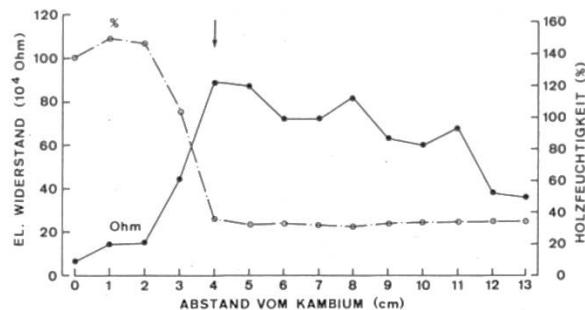
Gerätetyp	Baumart	Bestimmtheitsmass (%)	Kurventyp
Bohrsonde mit Ohmmeter E 12 mit HT 100	Fichte	56	logarithmisch
	Tanne	55	exponential
	Fichte	97	logarithmisch
	Lärche	93	logarithmisch
	Eiche	73	linear
	Buche	84	logarithmisch



*Abbildung 3.* Zusammenhang zwischen der relativen elektrischen Leitfähigkeit des Holzes und der Holzfeuchtigkeit (%). Messwerte (N = 100) und Regressionskurve.

4. Die Wiederholung einer Messung in einem Bohrloch nach einer Zeitspanne führt zu veränderten Messwerten. Neben physikalischen Veränderungen im Bohrloch dürfte dabei auch die variable Güte des Kontaktes bei diesem Messverfahren eine Rolle spielen. Die Festlegung der Splintholz-Kernholz-Grenze war von 24 untersuchten Fällen in deren 20 (83 %) richtig, wie es die Laborbestimmung mit der Darrmethode (*Abbildung 4*) erwie-

Abbildung 4. Holzfeuchtigkeit (%) und elektrischer Widerstand des Holzes (kOhm) in Abhängigkeit von der Messposition (radialer Abstand vom Kambium in cm). Messwerte ( $N = 14$ ) und Verbindungsline. Pfeil = Splintholz-Kernholz-Grenze.



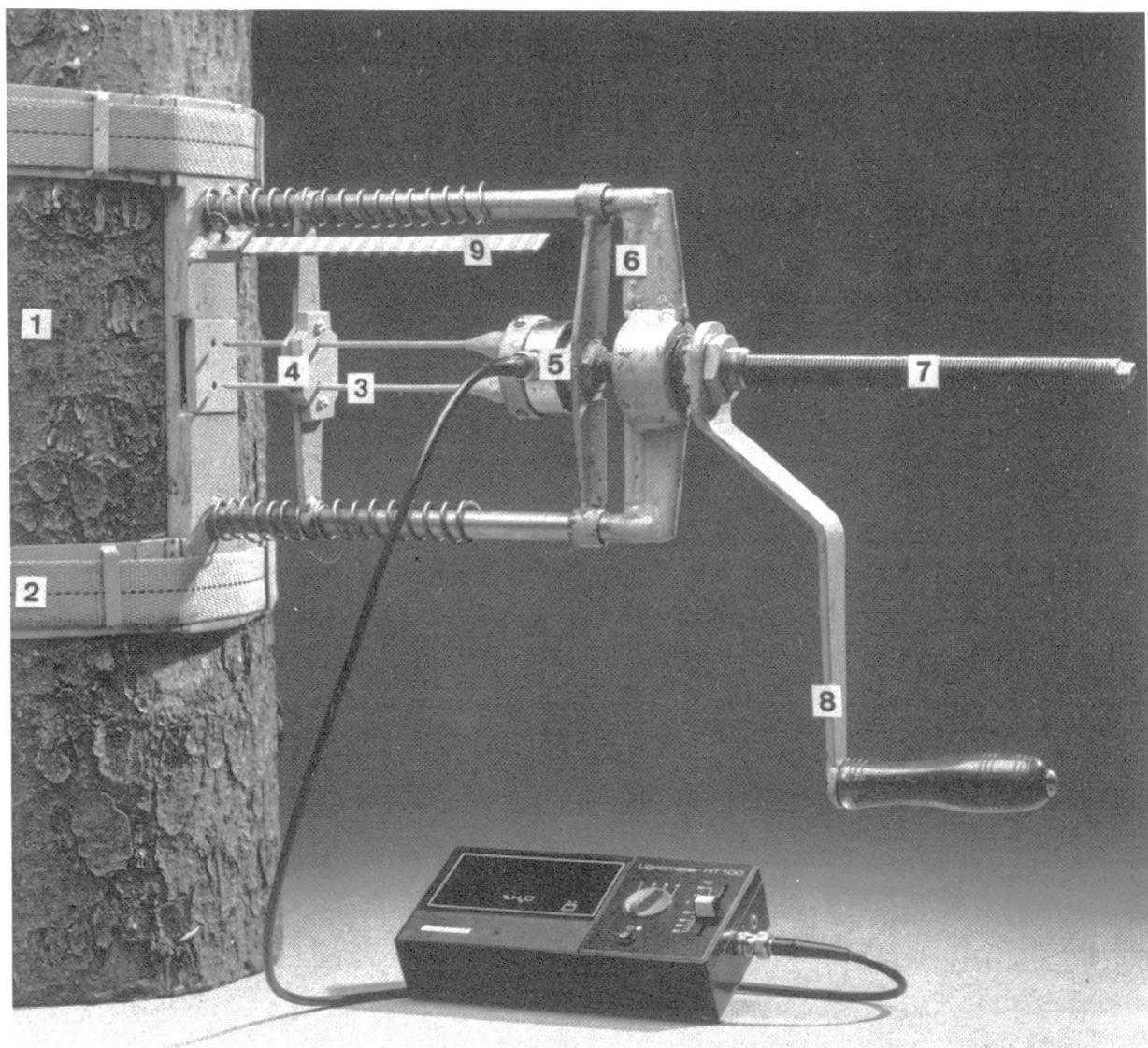
sen hat. In den übrigen vier Fällen waren Unregelmässigkeiten des Widerstandswertes bedingt durch Nasskernbildung (Tanne) respektive Pilzbefall (Fichte) dafür verantwortlich, dass die Splintholz-Kernholz-Grenze nicht festgelegt werden konnte. Holzart: Fichte/Tanne. Gerät: Bohrsonde mit Ohmmeter.

Auf Grund dieser Erfahrungen wurde in der zweiten Etappe ein Prototyp des Messgerätes Vitamat mit folgenden Merkmalen entwickelt (Abbildung 5).

1. Zwei unabhängige Elektroden (Länge 170 mm; Durchmesser 3,5 mm; Abstand 22 mm; Anordnung vertikal), schlagfest isoliert (pulverbeschichtet) bis auf die Messspitze, Material Edelstahl.
2. Elektroden-Halterung wie bei der Rammsonde E 12.
3. Kontinuierliches Einbringen und Ausziehen der Elektroden durch die Drehbewegung einer Handkurbel. Kraftübertragung auf die Elektroden-Halterung über eine Gewindestange.
4. Gleitende Führung der Elektroden als Schutz gegen ein Ausknicken.
5. Positionsbestimmung der Elektroden mit einem Reiter über einem Massstab.
6. Direkte Messung der Holzfeuchtigkeit mit dem digitalen Messgerät HT 100 oder Widerstandsmessung mit einem Ohmmeter.
7. Befestigung der Einrichtung um den Baumstamm mit zwei elastischen Spanngurten.

Über die Erfahrungen mit dieser Einrichtung auf Grund laufender Untersuchungen wird andernorts berichtet. Im Hinblick auf die Anwendung bestehen neben der jetzigen Geräte-Konfiguration zwei weitere interessante Möglichkeiten, nämlich das Einbringen eines Fühlers zur Ermittlung der relativen Geschwindigkeit des Transpirationsstroms (sogenannter «negative temperature coefficient thermistor», vergleiche Hösli, Laroche und Gagnon 1985) und von solchen zur selektiven Bestimmung der Ionen-Konzentration im Xylemwasser. Geplant sind in der Zusammenarbeit mit der Abteilung Holz an der EMPA Dübendorf Verbesserungen am Prototyp des Vitamats:

1. Kraftübertragung durch hydraulische Zylinder.
2. Positionsbestimmung der Elektroden durch einen Weggeber.
3. Isolierende Beschichtung der Elektroden mit Aluminiumoxid.
4. Steuerung der Datenerhebung sowie Registrierung und Auswertung der Daten durch einen batteriebetriebenen Kleinrechner.



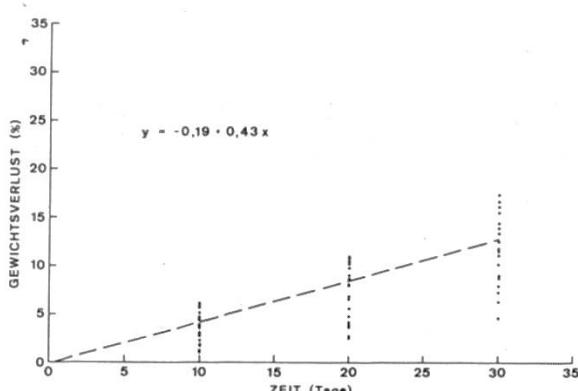
*Abbildung 5.* Einrichtung zur kontinuierlichen Messung der Holzfeuchtigkeit (%) respektive des elektrischen Widerstandes (kOhm) am Radius stehender Bäume. 1....Baumstamm; 2....Spanngurten mit Halterung; 3....Elektroden; 4....Elektroden-Führung (Knicksschutz) mit Druckfedern; 5....Elektroden-Halterung; 6....Führungsrahmen; 7....Gewindestange; 8....Handkurbel; 9....Massstab.

#### 4. Die Kernspintomographie

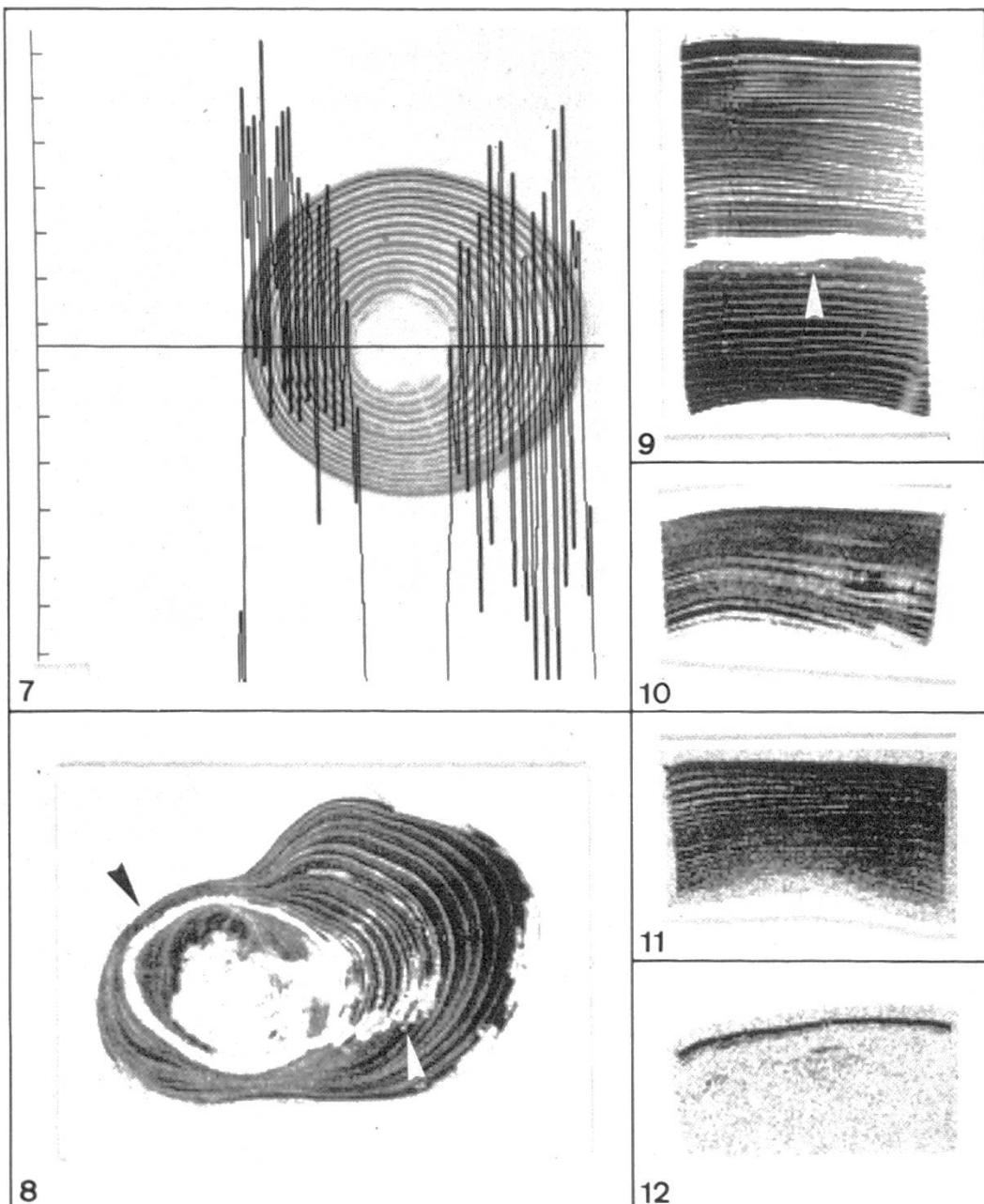
Bekanntlich besitzen sämtliche Atomkerne eine elektrische Ladung. Darüber hinaus gibt es bei einigen Sorten von Atomkernen einen Eigendrehimpuls (Eigenrotation, Spin). Die rotierende Ladung eines solchen Kerns bildet ein magnetisches Dipolmoment, welches in der Natur eine beliebige Ausrichtung haben kann. In einem starken und homogenen Magnetfeld wird der Kern eine berechenbare Vorzugsstellung einnehmen. Nun ist noch die gleichzeitige Einwirkung eines zusätzlichen, schwachen und sich linear verändernden Magnetfeldes (Magnetfeldgradienten) nötig, um eine raumabhängige Verteilung der

Kernresonanz-Signale zu erhalten. Die Kernspinresonanz ist eine Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie. Durch einen Hochfrequenzimpuls aus einer Senderspule werden die Kerne zur Resonanz gebracht. Nach der Beendigung der Hochfrequenzimpulse beharren die Kerne entsprechend ihrer spezifischen Relaxationszeit in einem langsamen Abklingen der Resonanzbewegung. Dabei strahlen sie Signale aus, welche von der Empfangsspule aufgenommen werden. Die Dekodierung der Signale erfolgt mittels der Fourier-Transformation, wobei entweder die Spindichte oder die Relaxationszeit, seltener der sogenannte «chemical shift», erfasst wird. Flüssigkeiten erzeugen im allgemeinen wesentlich stärkere Signale als feste Stoffe. Der Kern des Wasserstoffatoms besitzt eine charakteristische Eigenrotation, so dass sich Wasser als Objekt sehr gut für Kernresonanz-Experimente eignet. In einer Kernresonanz-Anlage können Schichtbilder des Objektes in beliebiger Richtung erzeugt werden. Eine mechanische Verschiebung des Objektes ist dabei nicht notwendig, vielmehr werden die Schichtbilder durch die relative Signalaufnahme erreicht. Somit können in einem festen Objekt die zu untersuchenden Substanzen (zum Beispiel Wasser) lokalisiert sowie ihre Konzentration und allfällige Bewegungen (Strömung) bestimmt werden. Dabei wird das Objekt keinerlei Beeinträchtigung ausgesetzt (*Holz* 1983; *Rothwell* und *Gentempo* 1985; *Ströbel* 1985).

Die bisherigen Untersuchungen wurden in einer Medspec 24/40 Kernresonanz-Anlage der Firma Spectrospin AG in Fällanden ZH durchgeführt. Diese Anlage ist mit einem supraleitenden Hochfeldmagneten von 2,4 Tesla Feldstärke ausgestattet, und der Kernspin wird durch Hochfrequenzimpulse von 100 MHz erzeugt. Die Holzproben wurden jeweils einige Tage vor der Untersuchung gewonnen. Sämtliche Schnittflächen wurden unmittelbar nach der Probenentnahme mit Paraffin versiegelt. Diese Konservierungsmethode wurde durch periodisches Wägen der Proben kontrolliert und erwies sich als effektiv genug, um den ursprünglichen Feuchtigkeitsgehalt mit geringfügigen Veränderungen mehrere Tage lang aufrechtzuerhalten. Der mittlere Gewichtsverlust von 24 Proben betrug nach 10 Tagen 4,1%, nach 20 Tagen 7,9 % und nach 30 Tagen 13,1% (*Abbildung 6*). Einige Ergebnisse sind in den *Abbildungen 7–10* wiedergegeben. Die Schwärzung entspricht in diesen Bildern dem Gehalt der



*Abbildung 6.* Abhängigkeit des Gewichtsverlustes (%) konservierter Proben von der Dauer der Lagerung (Tage). Messwerte (N = 96) und Regressionsgerade.



Abbildungen 7 bis 12. Kernspintomogramme von vier Holzproben. Massstab 1:2, 3.

7. Kranke Tanne, Stammholz. Trotz jugendlichem Alter ist dieser Baum bereits im Zentrum verkernt. Klar erkennbar sind die Jahrringe im Splintholz. Die Schwankungen der Signalintensität entlang des waagrechten Durchmessers entsprechen dem unterschiedlichen Wassergehalt im Früh- und Spätholz der Jahrringe.
8. Gesund eingestufte Fichte, Wurzelholz. Die Untersuchung zeigt unregelmässige Wasserführung im Querschnitt mit einigen Trockenbereichen (Pfeile), welche wahrscheinlich das Frühstadium einer Schädigung signalisieren.
9. Gesunde Tanne, Stammholz. Die sehr breite Splintholzzone besteht aus rund 40 wasserführenden Jahrringen. Eine Trockenzone (Pfeil) deutet jedoch den Anfang einer Nasskernbildung an.
10. Kränkelnde Tanne, Stammholz. Die Splintholzzone besteht noch aus etwa 11 Jahrringen; die Wasserverteilung ist weniger gleichmässig als bei der gesunden Tanne.
11. Gesunde Fichte, Stammholz. Das Splintholz besteht hier aus 16 bis 18 wasserführenden Jahrringen.
12. Kränkelnde bis kranke Fichte, Stammholz. Die Abbildung zeigt einen einzigen wasserführenden Jahrring im Splintholzbereich. Trotz des relativ geringen Kronenschadens stand der Tod dieses Baumes unmittelbar bevor.

Gewebe an freiem Wasser. Die bisherigen Ergebnisse, gewonnen am Holz der Fichte und Tanne, können folgendermassen zusammengefasst werden:

1. Die Festlegung der Splintholz-Kernholz-Grenze in Stammscheiben oder Keilen ist einfach und sicher.
2. Die einzelnen Jahrringe im Splintholz sind als Folge des unterschiedlichen Wassergehaltes im Früh- und Spätholz deutlich erkennbar. Eine Zählung der Jahrringe respektive Messung von deren Breiten bereitet keinerlei Probleme, so dass die Zuwachsleistung des Baumes in den letzten Jahren ermittelt werden kann. Denkbar ist auch eine Bestimmung des Spätholzanteiles in diesen Jahrringen.
3. Einzelne «trockene» Jahrringe im Splintholzbereich wurden sowohl im Stamm- als auch im Wurzelholz beobachtet. Vermutlich sind sie mit selektiven und bisher nicht erfassten Schäden des Wurzelwerkes und/oder der Krone in Beziehung zu setzen und signalisieren ein Frühstadium der Erkrankung.

Als Bestimmungsmethode der Wasserverteilung im Holz weist die Kernspintomographie im Vergleich mit den meisten übrigen Methoden eine Anzahl entscheidender Vorteile auf:

1. Das Untersuchungsmaterial muss, mit der Ausnahme der Abdichtung von Schnittflächen, auf keine Art vorbehandelt werden.
2. Die Untersuchung ist mit keiner Beeinträchtigung des Objektes verbunden.
3. Im Gegensatz zu den bekannten indirekten Methoden (Röntgen, Ultraschall, elektrischer Widerstand) wird hier nicht eine Eigenschaft des feuchten Holzes, sondern eine solche des Wassers gemessen.
4. Die gegenwärtig erreichbare lineare Auflösung beträgt 0,3 mm. Damit können weitlumige Gefässe und in jedem Fall die Jahrringe und ihre Schichten differenziert dargestellt werden.
5. Bei dieser Methode wird zum erstenmal in einem Messvorgang mehr als ein Wert ermittelt. Bei der Annahme einer flächenmässigen Auflösung von 0,1 mm<sup>2</sup> und einer realistischen Probengrösse von 10x10 cm erbringt eine Messung von 2 bis 8 Minuten Dauer 10 000 Messwerte.
6. Zwei- oder dreidimensionale Verteilungsbilder der Messergebnisse sind routinemässig möglich.
7. Eine Quantifizierung der Resultate, das heisst die Umwandlung relativer Werte in Wassergehaltsprozente, kann beim Vorliegen geeigneter Objekte erarbeitet werden.
8. Es ist theoretisch möglich, mit dieser Methode unter bestimmten Voraussetzungen die Transportgeschwindigkeit des Wassers im Holz zu messen.

In einer stationären Anlage werden wir im Jahre 1986 folgende Projekte bearbeiten:

- a. Zusammenhang Kronenzustand-Splintholzanteil in gesunden und kranken Bäumen.
- b. Wasserverteilung im Jahrring und über dem Querschnitt im Zusammenhang mit exogenen und endogenen Einflussgrössen.
- c. Wasserverteilung in Imprägniermasten, Rohschwellen und anderen Holzprodukten.

Nach der Ansicht von Fachleuten sollte es möglich sein, eine mobile Anlage zu bauen, mit der Waldbäume *in vivo* untersucht werden könnten (*Ernst und Brunner* 1985). Mit einer solchen Anlage könnten folgende ungelöste Probleme angegangen werden:

- a. Zeitlicher Ablauf der Kernholzbildung in Waldbäumen.
- b. Zeitabhängige Veränderungen des Splintholzanteiles in kranken Bäumen.
- c. Tages- und Jahresperiodizität des Wassertransports in Waldbäumen.
- d. Strömungsgeschwindigkeiten von Wasser im Holz im Zusammenhang mit biologischen und technologischen (Holztrocknung) Fragestellungen.

## 5. Schlussbemerkungen

Eine Verbesserung der Diagnose der Baumvitalität ist dringend notwendig, damit Unklarheiten und Fehlinterpretationen auf diesem Gebiet wirksam vorgebeugt werden kann. Die hier vorgestellten Methoden sind in der Entwicklung und Erprobung. Sie sind vom Preis und von der Leistung her derart verschieden, dass wir an der Weiterentwicklung beider Methoden festhalten wollen. Eine Vorrichtung zur Messung des elektrischen Widerstandes im Baumkörper ist in einfacher Ausführung bereits mit Kosten von 500 sFr. zu verwirklichen. Daher dürfte diese Methode eine gewisse Verbreitung erfahren. Dagegen wird die Kernspintomographie der eigentlichen Forschung vorbehalten bleiben, wo sie im Zusammenhang mit den Dauerbeobachtungsflächen einen wesentlichen Beitrag zur Klärung des Krankheitsverlaufes leisten könnte. Nur am Rande vermerkt wurden die zweifelsohne interessanten Einsatzmöglichkeiten beider Methoden auf dem Gebiet der Holztechnologie.

Der Autor dankt Herrn Dr. Otto Weibel aus Urdorf für sein Interesse an unseren Forschungsproblemen und seine guten Ratschläge. Die Kernspintomographie-Versuche wurden mit der Unterstützung von Herrn Dr. P. Brunner von der Spectrospin AG in Fällanden ZH von Herrn Dr. Ch. Bösch ausgeführt. Vielfältige Hilfe wurde von den Mitarbeitern/innen des Fachbereichs Holzkunde und Holztechnologie geleistet, namentlich von Frl. B. Eichenberger und den Herren Dr. K. Buchmüller, B. Huber und E. Zürcher.

## Résumé

### Tomographie à résonance magnétique nucléaire et mesure de la résistance électrique en tant que mesures de diagnostic de la vitalité d'arbres malades

Le présent travail est consacré à l'ensemble des problèmes d'un diagnostic analytique de la vitalité d'arbres malades. Les méthodes usuelles de diagnostic sont décrites et un nouveau concept s'appuyant sur l'analyse de l'aubier dans le tronc est développé. Plus loin les nouvelles méthodes potentielles de développement ainsi que les expériences acquises sont évaluées de manière critique. Nous proposons comme méthodes de mesure une version plus élaborée et améliorée de la mesure de la résistance électrique ainsi qu'une méthode, totalement nouvelle dans ce domaine, la tomographie à résonance magnétique nucléaire. Les possibilités d'application des deux méthodes sont discutées et illustrées par quelques exemples.

Traduction: S. Croptier

## Literatur

- Bauch, J., Klein, P., Frühwald, A., Brill, H., 1979: Alterations of wood characteristics in *Abies alba* Mill. due to «fir-dying» and considerations concerning its origin. European Journal of Forest Pathology 9: 321—331.
- Bernhart, A., 1965: Frischfeuchtigkeit und Schwindverhalten von Fichtenholz. Forstwissenschaftliches Centralblatt 84: 347—356.
- Bosshard, H. H., 1966: Aspekte der Alterung in Waldbäumen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 117: 168—175.
- Brown, H. P., Panshin, A. J., Forsaith, C. C., 1952: Textbook of wood technology. Volume II. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York—Toronto—London.
- Ernst, R., Brunner, P. 1985: Persönliche Mitteilung, Zürich.
- Eslyn, W. E., 1959: Radiographical determination of decay in living trees by means of the thulium X-ray unit. Forest Science 5: 37—47.
- Frühwald, A., Bauch, J., 1984: Über die Qualität von Holz aus Waldschadensgebieten. Vortrag an der 12. Dreiländer-Holztagung, Augsburg. 11p.
- Hepting, G. H., Roth, E. R., Sleeth, B., 1949: Discolorations and decay from increment borings. Journal of Forestry 47: 366—370.
- Holz, M. 1983: Physikalische Grundlagen der NMR. Bruker Medical Report (1): 12-18.
- Hösli, J. P., Laroche, D., Gagnon, R., 1985: Determination of sap flow velocity in trees using negative temperature thermistors. In preparation.
- Houston, D. R., 1971: Discoloration and decay in red maple and yellow birch: reduction through wound treatment. Forest Science 17: 402—406.
- Huber, B., 1956a: Die Gefäßleitung. In: Ruhland, W. (Ed.): Encyclopedia of Plant Physiology. Volume 3. Springer-Verlag, Berlin—Göttingen—Heidelberg.
- Huber, B., 1956b: Die Saftströme der Pflanzen. Springer-Verlag, Berlin—Göttingen—Heidelberg.
- Kollmann, F., 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Erster Band. Springer-Verlag, Berlin—Göttingen—Heidelberg, und J. F. Bergmann, München.
- Lausch, E., Mayer, Th., 1985: Der Wald auf dem Prüfstand. GEO (10): 142—168.
- Lin, R. T., 1965: A study on the electrical conduction in wood. Forest Products Journal 15: 506—514.
- Lin, R. T., 1967: Review of the electrical properties of wood and cellulose. Forest Products Journal 17: 54—61.
- Lorenz, R. C., 1944: Discolorations and decay resulting from increment borings in hardwoods. Journal of Forestry 42: 37—43.

- Miller, B. D., Taylor, F. L., Popeck, R. A.*, 1965: A sonic method for detecting decay in wood poles. American Wood-Preservers' Association Proceedings 61: 109—115.
- Rothwell, W. P., Gentempo, P. P.* 1985: Nonmedical applications of NMR imaging. Bruker Report (1): 46—51.
- Shigo, A. L., Shigo, A. L.*, 1974: Detection of discoloration and decay in living trees and utility poles. USDA Forest Service Research Paper NE-294, 11p.
- Skutt, H. R., Shigo, A. L., Lessard, R. A.*, 1972: Detection of discolored and decayed wood in living trees using a pulsed electric current. Canadian Journal of Forest Research 2: 54-56.
- Ströbel, B.*, 1985: Physikalische Grundlagen der NMR-Tomographie. Bruker Medical Report (1): 7—12.
- Trendelenburg, R., Mayer-Wegelin, H.*, 1955: Das Holz als Rohstoff. Zweite Auflage. Carl Hanser Verlag, München.
- Zimmermann, M. H.*, 1983: Xylem structure and the ascent of sap. Springer-Verlag, Berlin—Heidelberg—New York—Tokyo.
- Zschuravleva, M. V.* 1972: Sposob opredelenija aktivnosti kambija u rastuschtschich derevjev jeli. (Methode zur Bestimmung der Kambiumaktivität in wachsenden Fichten.) Lesnoj Zschurnal (1): 140—141.
- Zycha, H., Dimitri, L.*, 1962: Erfahrungen mit einem Gerät zur Fäuleermittlung an stehenden Stämmen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 81: 222—230.