

---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
Technik und Umwelt

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 5685

**Wie der grüne Baum  
tangentiale Zugbelastungen  
bewältigt**

**F. Dietrich**

Institut für Materialforschung

Dezember 1995

---



**Forschungszentrum Karlsruhe**  
**Technik und Umwelt**  
**Wissenschaftliche Berichte**  
**FZKA 5685**

**Wie der grüne Baum tangentielle Zugbelastungen  
bewältigt**

**F. Dietrich**

Institut für Materialforschung

Dissertation genehmigt von der Fakultät  
für Maschinenbau  
der Universität Karlsruhe (T.H.)

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1995

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0947-8620

www.fzka.de

## Abstract

Nach einer allgemeinen Betrachtung von Baumschäden, die auf tangenciales Stammversagen zurückzuführen sind, wird in der vorliegenden Arbeit speziell der Frage nachgegangen, welche Einflüsse zu der Bildung von „Bananenrissen“ führen, die als Längsrisse auf den druckbelasteten Unterseiten gekrümmter Baumschäfte auftreten. Dabei spielt offensichtlich der Grad der Schaftkrümmung eine entscheidende Rolle. Innere Defekte begünstigen die Bananenrißbildung.

Mit Hilfe des Fractometers wurden tangentielle Festigkeitswerte von Bäumen ermittelt. Die Verteilung der tangentialen Festigkeiten erwies sich dabei für grüne Säbelbäume als optimal an auftretende tangentielle Zugspannungen, die von äußeren Biegelasten herrühren, angepaßt.

Ferner wurde untersucht, welche Rolle den in grünen Bäumen wirkenden Eigenspannungen bei der Schadensprävention zukommt. Aus mehreren Meßverfahren wurde die Radialschnittmethode zur Bestimmung der tangentialen Wachstumsspannungen favorisiert. Mit dieser Methode konnte gezeigt werden, daß auch die tangentielle Vorspannung der Bäume lastgesteuert verteilt ist.

Zuletzt wurde in einer Computersimulation der Vorgang der Eigenspannungsgenerierung in den verschiedenen Holzzelltypen untersucht. Die in grünen Bäumen vorhandenen Eigenspannungen lassen sich mit dem Zusammenwirken der Lignineinlagerung in die Zellwände und den im Zellinneren vorherrschenden Saugspannungen erklären.

### How trees counteract tangential tensile stresses

This thesis examines different methods of failure in mature tree stems. An investigation was made into lengthwise cracking of the lower sides of curved tree trunks, which are held in compression.

A Fractometer was used to measure wood strength in a tangential direction at different heights along the length of the concave and convex sides of curved trees. It was found that the distribution of strength was significantly related to the stresses imposed on the stem due to its curvature.

The role of growth stresses in avoiding internal splitting of tree stems was also investigated. Several measuring techniques to determine the distribution of these stresses were compared. It was found that cutting a stem section radially and measuring the distance between two points before and after the cut was the most reliable. Growth stresses in curved trees were stronger in the areas of high tangential tensile stress caused by external load.

Using the Finite Element Method, growth stress generation in different types of wood cells were simulated. The occurrence of different growth stresses in respective fibre types may be explained by a combined influence of lignin swelling of the cell walls and the osmotic tension stress in the cells.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Anatomie des Holzes</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Längsrisse und ihre unterschiedlichen Ursachen</b>	<b>6</b>
3.1	Trockenrisse . . . . .	6
3.2	Frostrisse . . . . .	8
3.3	Risse aufgrund der Schaftgeometrie . . . . .	9
3.3.1	Schilferisse oder Fischohren . . . . .	9
3.3.2	Drehrisse . . . . .	11
3.3.3	Unglücksbalken . . . . .	11
3.3.4	Bananenrisse . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Die Entstehung der Bananenrisse</b>	<b>14</b>
4.1	Die Rolle der Schaftkrümmung bei der Bananenrißbildung . . . . .	14
4.1.1	Definition der Krümmung . . . . .	15
4.1.2	Nachweis des Krümmungseinflusses . . . . .	17
4.2	Den Bananenriß begünstigende Faktoren . . . . .	20
4.3	Der Einfluß nachlassender Zugholzwirkung . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Tangentiale Querkzugfestigkeit</b>	<b>29</b>
5.1	Die Fractometerfamilie . . . . .	30
5.2	Tangentialmessungen mit dem Fractometer . . . . .	38
5.2.1	Einfluß der Biegeachse . . . . .	40
5.2.2	Messungen an Säbelbäumen . . . . .	41
5.3	Festigkeitsgewinn durch Zellanpassung . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Tangentiale Eigenspannungen</b>	<b>52</b>
6.1	Verteilung der Wachstumsspannungen . . . . .	52
6.2	Vermessung von $\phi 5$ mm-Bohrkernen . . . . .	56
6.3	Messung der Verformung eines Kreisloches . . . . .	62
6.4	Die Radialschnittmethode . . . . .	67
6.4.1	Ermittlung der Tangentialeigenspannungen aus den Meßergebnissen der Radialschnittmethode . . . . .	69
6.4.2	Anwendung bruchmechanischer Beziehungen . . . . .	69
6.4.3	Anwendung der Finite Elemente Methode . . . . .	71
6.4.4	Einfluß der Hirnschnitte . . . . .	74
6.5	Tangentiale Eigenspannungen an Säbelbäumen . . . . .	79
6.5.1	Abhängigkeit von der Krümmung . . . . .	84
6.6	Weitere Beispiele für die Tangentialvorspannungsoptimierung . . . . .	91
6.6.1	Der Einfluß von Ästen . . . . .	91
6.6.2	Die Schießscharte . . . . .	92
6.6.3	Das Druckzwiesel . . . . .	95
6.6.4	Der Beulenbaum . . . . .	95

<b>7 Die Erzeugung der Wachstumsspannungen</b>	<b>100</b>
7.1 Die „cellulose tension“-Hypothese . . . . .	103
7.2 Die „lignin swelling“-Hypothese . . . . .	105
7.3 Einfluß der Saugspannungen . . . . .	106
7.4 Die Verkürzung des Zugholzes . . . . .	106
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>111</b>
<b>9 Ausblick</b>	<b>113</b>

# 1 Einleitung

Die Einsicht, daß die natürlichen Ressourcen unserer Erde begrenzt sind, hat einen Umbruch unseres gesellschaftlichen und technischen Denkens eingeleitet. Häufig wird in diesem Zusammenhang die Verwendung nachwachsender Rohstoffe gefordert. Nicht nur im Bereich der Konstruktionswerkstoffe ist hierbei an aller erster Stelle das Holz unserer Wälder zu nennen.

Holz spielte im Laufe der technischen Entwicklung immer eine große Rolle, wurden doch die meisten grundlegenden Konstruktionen lange Zeit in Holz ausgeführt. Schiffe wurden schon vor Jahrtausenden aus Holz gebaut, und auch die ersten Flugzeuge waren Holzkonstruktionen. Holz bot sich mit seiner großen Verfügbarkeit und seiner hohen Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte an, um zu einem möglichst leichten und doch robusten Design zu gelangen.

Das wohl umfassendste deutsche Gesamtwerk, in dem neben der Verwendung von Holz als Energielieferant und Rohstoff zur Zellstoffherstellung ganz besonders seine mechanischen Materialeigenschaften in beeindruckender Weise zusammengefaßt sind, stammt von Kollmann [46]. Aus der Tatsache, daß dieses vorzügliche Werk vergriffen ist und eine Neuauflage nicht in Sicht ist, kann man ersehen, daß die wieder erstarkende Rolle des Holzes von vielen Seiten noch nicht erkannt worden ist. Dabei liegen die Vorteile von Holz als Werkstoff auf der Hand, stellt doch der Baum selbst eine hochentwickelte Konstruktion dar. Wilson & Archer bezeichnen ihn als „einen Turm (Stamm und Äste), der viele kleine Sonnenkollektoren (die Blätter) trägt“ [94]. Aber es gibt noch einen weiteren Grund dafür, sich mit Holz näher zu beschäftigen: Der Begriff „smart structure“ ist in der Konstruktionsforschung relativ neu. Es handelt sich dabei um eine intelligente Struktur, die Belastungen erkennen und auf diese reagieren kann, mit dem Ziel längerer Standzeiten und entsprechend geringerer Wartungs- und Reparaturaufwendungen. Das Erkennen und richtige Reagieren war bislang den Lebewesen vorbehalten, für die im Zuge der Evolution das Funktionieren dieses Prinzips die Grundvoraussetzung für die Durchsetzung einer jeden neuen Spezies darstellte.

Es stellt sich nun die Frage, ob Holz in seiner lebenden Form als grüner Baum bereits eine solche „smart structure“ darstellt. Erweisen sich die Bäume als fähig, auf jede denkbare Art der Belastung mit entsprechenden Schutzmaßnahmen mechanisch zu reagieren, wäre anschließend die Funktionsweise der intern ablaufenden Mechanismen zu ergründen, um diese auf eigene, künstliche „smart structures“ übertragen zu können. Doch zunächst ist noch der Nachweis zu erbringen, daß Bäume aus solch „intelligentem“ Material bestehen. Dazu wurden in den vergangenen sechs Jahren bereits wichtige Einsichten gewonnen.

In einem ersten Schritt gelang der Nachweis, daß Bäume wie auch Knochen ihre äußere Gestalt dem an ihrer Oberfläche vorhandenen Spannungszustand derart anpassen, daß Spannungsspitzen vermieden werden [53, 55]. Das daraus abgeleitete **Axiom der konstanten Spannung** besagt denn auch, daß durch entsprechend höheren Materialzuwachs an besonders hoch belasteten Stellen ein Zustand zeitlich konstanter Spannungsverteilung über der gesamten Oberfläche des Baumes bzw. des Knochens erzielt wird. Letzterer kann diesen Zustand zudem durch Materialabbau in unterbelasteten Bereichen erreichen. Das Buch „Design in der Natur“ von Mattheck faßt nicht nur diese Ergebnisse zusammen, sondern liefert darüber hinaus noch deren Übertragung auf Maschinenbauteile mit Hilfe des computergestützten Optimierungsprogrammes CAO (Computer Aided Optimization) [54].

Der zweite Schritt führte zu dem Ergebnis, daß die Fasern eines Baumes genau in Richtung des am Ort ihres Entstehens vorherrschenden Kraftflußverlaufes angelegt werden [54, 56]. Dadurch werden gefährliche Schubspannungen zwischen den Fasern vermieden. Auch diese Konstruktionsregel wurde für den Einsatz bei Faserverbundwerkstoffen bereits in ein Optimierungsprogramm übertragen: CAIO (Computer Aided Internal Optimization), das ebenfalls auf der Finite Elemente Methode aufbaut, liefert bei bekanntem Lastfall die optimale Faserorientierung mit minimierten Schubspannungen innerhalb eines Bauteiles [47].

Der dritte Schritt war geradezu spektakulär, gelang doch der Nachweis, daß ein lebender Baum seine radiale Querfestigkeit im Inneren den radialen Zugspannungen anzupassen versteht [56]. Albrecht *et al.* zeigten dies zunächst am Beispiel von Wurzelanläufen [1]. Offenbar gelingt es dem Baum, sein inneres, von den Biologen als „tot“ deklariertes Holz nachträglich noch zu ver- bzw. entfestigen, um so lokale Festigkeitsmaxima an Stellen höchsten radialen Zuges aufzubauen.

Nachdem die letzten beiden Schritte die innere Selbstoptimierung der Bäume in longitudinaler und radialer Faserrichtung beschreiben, gilt es nun in einem vierten Schritt, der vorliegenden Arbeit, zu untersuchen, ob auch in zirkumferentieller, also tangentialer Richtung der natürliche Faserverbundwerkstoff Holz optimale Eigenschaften aufweist. Dazu werden zunächst einmal Längsrisse, die auf ein Versagen in tangentialer Richtung zurückzuführen sind, und ihre Entstehung aufgrund äußerer, innerer und geometrisch bedingter Ursachen unter die Lupe genommen. Anschließend werden die Tangentialfestigkeit und ihre Verteilung in speziellen Fällen untersucht. Einer Betrachtung des Faserverbundaufbaus mit besonderem Augenmerk auf den Holzstrahlen folgt dann die eingehende Beschäftigung mit den Eigenspannungen, die im biomechanischen Fachjargon auch als Wachstumsspannungen bezeichnet werden. Der allgemeinen Betrachtung dieser Vorspannungen schließt sich eine spezielle Beschäftigung mit ihrer Komponente in Stammumfangsrichtung an. Die Rolle der Tangentialeigenspannungen bei der Vermeidung von Rissen wird eingehend untersucht. Dazu ist eine geeignete Methode zur Bestimmung dieser Wachstumsspannungen zu finden. Abschließend erfolgt eine Simulation verschiedener Holzzelltypen, um die Generierung dieser Eigenspannungen zu erklären.

## 2 Anatomie des Holzes

Bevor man sich mit Belastungen und ihren möglichen Auswirkungen auf einen Körper beschäftigt, muß man sich zunächst einmal mit dem Material des Körpers selbst auseinandersetzen. Im Falle des Holzes ist dies ganz besonders ratsam, da es sich hierbei keineswegs um ein einfach zu beschreibendes homogenes, isotropes Material handelt, sondern vielmehr um ein orthotropes Hightech-Geflecht verschiedener Fasertypen, wobei diese Fasern ihrerseits wieder filigrane Meisterwerke darstellen. Jeder Baum stellt ein Lebewesen dar, das als solches die Eigenschaft des Wachsens besitzt <sup>1</sup>. Ausgangspunkt des Baumwachstums ist das Kambium. Hier findet die Zellteilung statt, die nach außen hin das Phloem, also Bast und Borke, und nach innen das Xylem, die eigentliche Holzmasse, bildet. Im Bast werden Assimilate aus den kleinen Sonnenkraftwerken des Baumes, den Blättern, nach unten bis in die Wurzeln transportiert. Die Borke dient vor allem dem Schutz des Baumes vor Verletzungen, Austrocknung, Kälte und im Falle der Mammutbäume auch vor Hitze; so sind diese Baumriesen aufgrund ihrer bis zu 30 cm dicken, schwer brennbaren Borke in der Lage, Waldbrände locker wegzustecken. Bei der Beschreibung des Xylems muß man bereits zwischen Laub- und Nadelhölzern unterscheiden. Die entwicklungsgeschichtlich älteren und daher auch primitiver gestalteten Nadelhölzer (270 Millionen Jahre) zeichnen sich durch einen einfacheren Aufbau aus. Ihr Holzkörper besteht aus längsgerichteten Tracheiden, die neben dem Transport von Wasser und Nährstoffen aus den Wurzeln in das Blattwerk für die Festigkeit des Baumes verantwortlich sind. Beide Aufgaben werden von den Zellen im Splintholz wahrgenommen, während die „toten“ Zellen im Kernholz zumindest ihre Transportfunktion verloren haben. Versorgt werden die Tracheiden über die radial verlaufenden Holzstrahlen, die den Kontakt der einzelnen Zellen zur Assimilatleitung im Phloem herstellen. Holzstrahlen, die bis ins Mark des Stammes reichen, werden entsprechend auch als Markstrahlen bezeichnet. Auf die große Bedeutung der Holzstrahlen für die Festigkeit des Stammes soll später noch näher eingegangen werden. Die „jüngeren“ Laubbäume (185 Millionen Jahre) unterscheiden sich von den Nadelbäumen im wesentlichen durch eine Spezialisierung der längsgerichteten Zellen. Die weitleumigen, kurzen Gefäße dienen hierbei dem Transport, die kompakteren Librifasern sind als Stützorgane für die Festigkeit verantwortlich. Die Parenchymzellen dienen der Speicherung von Stärke und anderen Reservestoffen [87]. Abbildung 1 veranschaulicht noch einmal die Unterschiede der beiden Holztypen und gibt einen Überblick über die volumetrischen Anteile der einzelnen Fasertypen an der Holzmasse. In unseren Breiten mit ausgeprägten Jahreszeiten bilden sich die Zellen entsprechend ihres Entstehungszeitpunktes unterschiedlich aus. Wenn es in Frühjahr und Sommer gilt, im Konkurrenzkampf mit benachbarten Artgenossen um das lebensnotwendige Sonnenlicht rasch zu wachsen, werden die Fasern entsprechend weitleumig angelegt, um einen möglichst großen Leitungsquerschnitt und damit hohe Volumenströme für Wasser und Nährstoffe zu erzielen (Frühholz). In Herbst und Winter besinnt sich der Baum dann wieder darauf, daß auch Festigkeit zum Überleben wichtig ist. Die jetzt angelegten Fasern sind dickwandiger und weisen einen wesentlich kleineren Querschnitt auf. Man spricht hier von Spätholz. Bei den Laubbäumen ist noch zusätzlich zwischen ring- und diffusporigen Hölzern zu unterscheiden. Bei diffusporigen Baumarten sind die Gefäße gleichmäßig auf Früh- und Spätholz verteilt. Die ringporigen

---

<sup>1</sup>Die Wuchsleistung eines Baumes kann beachtliche Ausmaße annehmen. So erzeugt der „General Sherman“, der im Sequoia National Park in den USA steht und der Gattung *Sequoiadendron Giganteum* angehört, jährlich eine zusätzliche Holzmasse von 40  $ft^3$  [35].

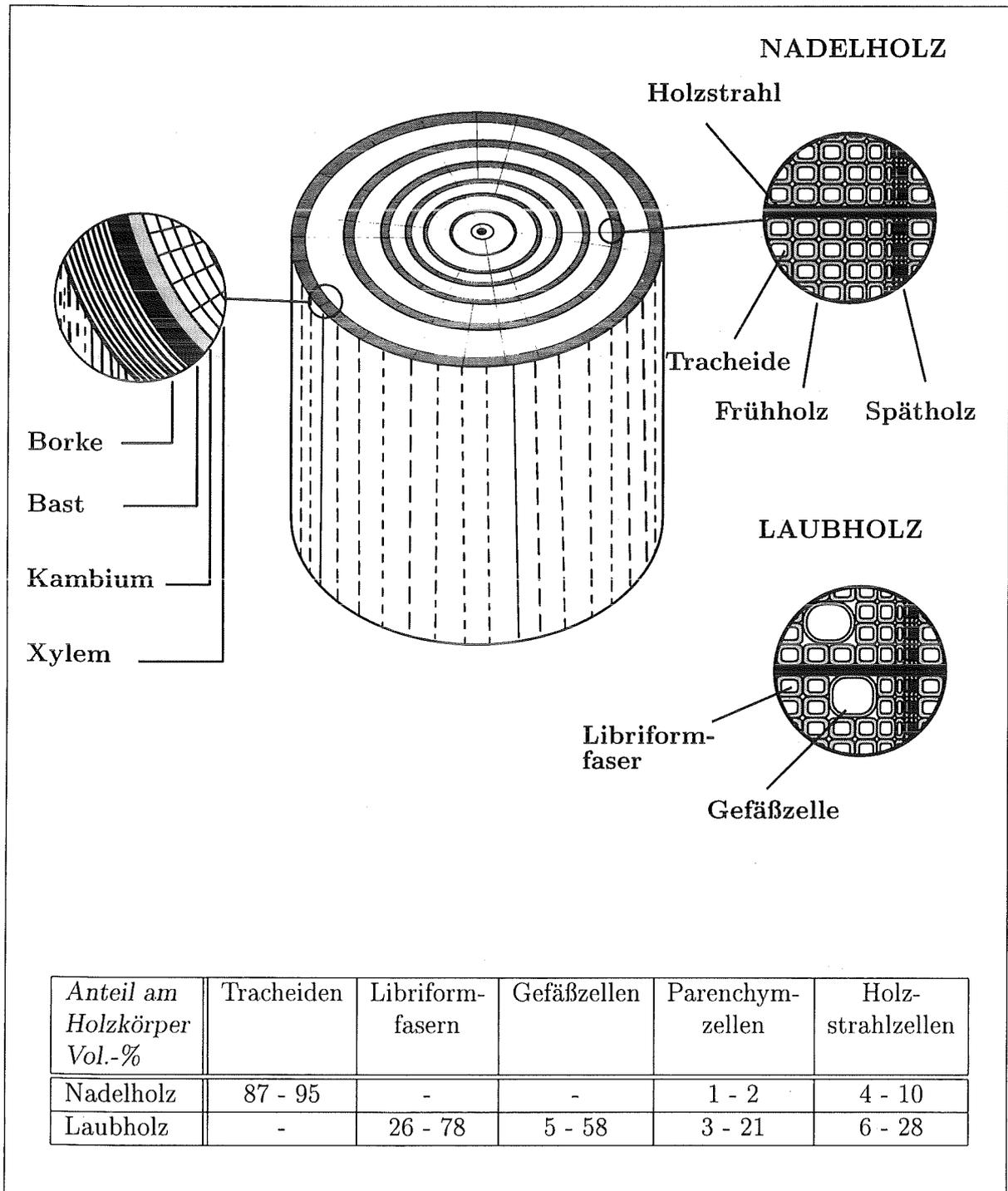


Abbildung 1: Aufbau von Nadel- und Laubholz und prozentuale Volumenanteile der einzelnen Fasern am Xylem.

Baumarten gehen mit ihrer Spezialisierung noch weiter: Im Frühholz werden die Gefäße besonders groß und weitlumig ausgebildet. Dadurch wird ein besonders großer Strömungsquerschnitt erzielt, der in der Wachstumsperiode günstig ist, wenn es darum geht, das neu zu bildende Blattwerk mit Wasser zu versorgen. Es wechseln also Bereiche niedriger und hoher Dichte einander ab. Zusammenfassend kann man sagen, daß Laubhölzer in ihrem Aufbau inhomogener als Nadelhölzer sind, wobei die ringporigen Laubhölzer den Extremfall darstellen. Das hat natürlich auch einen Einfluß auf das Materialverhalten der einzelnen Hölzer. So könnte man die ringporigen Laubhölzer mit mäßig hohen Holzstrahlen (wie Esche und Robinie, nicht aber die Eiche!) als biegeeweiche Stühle aus Bastgeflecht den Nadelhölzern als klobige, starre Melkschemel gegenüberstellen. Beide erfüllen ihren Zweck unter Anwendung einer jeweils anderen mechanischen Überlebensstrategie.

Aus dem komplizierten Aufbau des Holzes ergeben sich natürlich auch ganz besondere Materialeigenschaften. Holz ist orthotrop, d.h. seine Elastizitäts- und Schubmoduli sind richtungsabhängig. Allgemein gilt die Faustregel, daß der Elastizitätsmodul in Längsrichtung etwa 20mal so hoch wie in Querrichtung ist. In radialer Stammrichtung verhält sich Holz dabei noch etwas steifer als tangential. Als Modellvorstellung diene hier eine H-Milchtüte, die alleine aufgrund ihrer Abmessungen und den damit verbundenen unterschiedlichen Formsteifigkeiten in den drei Achsen jeweils andere Widerstände gegen Zusammendrücken leistet. Ein orthotroper Werkstoff wie Holz wird allgemein durch sechs Querkontraktionszahlen, drei Elastizitäts- und drei Schubmoduli charakterisiert. Die Querkontraktionszahlen betreffend genügt die Kenntnis von dreien; die drei anderen lassen sich aus diesen berechnen. Leider gibt es nur sehr wenige Wertetabellen dieser Kenngrößen für Holz. Neben Kollmann [46] und wenigen anderen Quellen [4, 30, 83] liefert nur das Wood Handbook [88] eine gewisse Anzahl von Werten. Für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit betrachteten Baumarten, deren Orthotropiedaten vor allem für die Finite Elemente Rechnungen notwendig waren, wurden die Werte des Wood Handbooks herangezogen. Wertvolle Informationen über den Elastizitätsmodul in Längsrichtung, speziell für grünes Holz, findet man bei Lavers [50].

Nachdem wir uns nun etwas mit den Besonderheiten von Holz als Werkstoff vertraut gemacht haben, wollen wir zum nächsten Punkt, der Beschreibung verschiedener Rißformen und ihrer Ursachen kommen. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf Längsrisse mit speziellem Augenmerk auf Schädigungen aufgrund tangentialen Versagens gemäß dem Thema der Arbeit.

### 3 Längsrisse und ihre unterschiedlichen Ursachen

Grundsätzlich kann man Längsrisse in Baumschäften in drei Kategorien einteilen:

- Risse aufgrund radialer Spannungen
- Risse aufgrund tangentialer Spannungen
- Mischformen

Die Risse aufgrund radialer Spannungen, die in tangential-longitudinalen Ebenen verlaufen, werden häufig als Mondrisse bezeichnet. Sie verlaufen meist entlang der Grenze von Spät- zu Frühholz, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Wuchsgeschwindigkeiten tangentiale Wachstumsspannungsunterschiede und Steifigkeiten aufweisen können. Scharfe Abgrenzungen können bei zu starkem Auslichten enger Waldbestände im Zuge einer Durchforstung entstehen, wenn ein verbleibender Baum durch das erhöhte Lichtangebot sprunghaft stärkeres Dickenwachstum zeigt [46].

Auf die Risse aufgrund tangentialer Spannungen gehen wir gleich noch näher ein. Die zuletzt genannten Mischformen beider Versagenskategorien von Längsrissen sind vielfältig. Als Beispiel sei die bei Mattheck dargestellte Wurzeldelamination genannt [57]. Das hierbei abgespaltene und als Seilanbindung wirkende Randfaserbündel auf der Zugseite der Biegung löst sich vornehmlich in tangential-longitudinaler Ebene vom Hauptstamm ab; die Bruchfläche enthält aber natürlich auch Anteile in der radial-longitudinaler Ebene. Albrecht untersuchte in diesem Zusammenhang die radiale Zugfestigkeit des Holzes im entsprechenden Bereich solcher Wurzelanläufe [1]. Im folgenden soll aber nun speziell auf die Risse in radial-longitudinaler Ebene eingegangen werden, die also auf ein Versagen des Stammes in tangentialer Richtung zurückzuführen sind. Diese Risse lassen sich in folgende drei Erscheinungsformen einteilen:

- Trockenrisse
- Frostrisse
- Risse aufgrund der Geometrie des Stamm- oder Astschafte

Wir wollen nun nacheinander diese einzelnen Rißtypen einer näheren Betrachtung unterziehen.

#### 3.1 Trockenrisse

Der Name dieses Rißtyps gibt bereits Aufschluß auf seine Ursache. In der Tat treten diese, im englischen Sprachgebrauch auch als „drought cracks“ bezeichneten Risse vorzugsweise in Perioden ausgesprochener Trockenheit auf. Nördlinger äußerte bereits 1878 die richtige Annahme, daß solche Risse von inneren Zugkräften auf die Zellwände herrühren [70]. Um das Zustandekommen dieser Kräfte zu verstehen, werfen wir einen Blick auf das Transportsystem, mit dem der Baum Wasser befördert. Unsere Bäume stehen dabei vor einer schwierigen Aufgabe, gilt es doch das lebensnotwendige Naß aus dem Boden über Haarschwärzeln aufzunehmen und über stärkere Wurzeln, den Stamm und die Äste bis in die Blätter zu transportieren, wo es zu einem großen Teil verdunstet und an die Umgebung abgegeben wird. Um sich vor Augen zu führen, welche große Förderleistung dabei vollbracht

werden muß, denke man nur an die größten Bäume dieser Welt, die Redwoods (*Sequoia sempervirens*), dessen größter Vertreter, der „Tall Tree“ in Kalifornien, den Wassertransport bis in eine Höhe von 112 Metern bewerkstelligen muß [35]. Alleine zur Überwindung der geodätischen Höhe muß dieser Gigant einen Druck von 11.2 Atmosphären bereitstellen. Handelsübliche Pumpen liefern selten eine Ansaughöhe über zehn Meter. Hinzu kommt noch der ebenfalls aufzubringende Druckanteil für die Reibungsverluste an den Zellwänden. Milburn ermittelte hierfür etwa eine Atmosphäre auf zehn Metern zusätzlich [63]. Die Sequoias müssen also mehr als 20 Atmosphären erzeugen. Die Generierung solcher Drücke oder besser Unterdrücke erfolgt in den Blättern, die über ihre semipermeablen Membrane Wasser als Dampf in die Umgebung abgeben und damit auf osmotischem Wege den Unterdruck erzeugen, denn Osmose kann nicht nur den aus dem Schulunterricht bekannten osmotischen Druck bewirken, sondern eben auch osmotischen, hydrostatischen Zug. Die am Wassertransport beteiligten Stammbereiche stehen damit unter sogenannten „Saugspannungen“, mit deren Hilfe das Wasser in das Blattwerk hinaufgezogen wird. Bei ausgesprochener Dürre kann der das Wurzelwerk umgebende, trockene Boden nicht mehr genug Wasser bereitstellen. Als Folge übersteigen die Saugspannungen des Transpirationsstromes der Fasern die Querfestigkeit der Zellwände, die Zellen kollabieren. Es entstehen Risse, die Mayer-Wegelin wegen ihrer Entstehungsgeschichte auch als Saugspannungsrisse bezeichnet [62]. Die Ausmaße der Trockenrisse werden in Längsrichtung mit bis zu mehreren Dezimetern, in radialer Richtung mit einer Jahresringbreite angegeben [52, 75, 77]. Der Grund der geringen radialen Ausbreitung ist im stetigen Wechsel von Spät- und Frühholz begründet. Das Frühholz mit großen Kanälen und relativ dünnen Wänden hat den Saugspannungen wesentlich weniger Widerstand entgegenzusetzen als das Spätholz. Dieses besitzt vergleichsweise dicke Wände und enge Lumina, was zudem eine höhere Formsteifigkeit mit sich bringt. Die höhere Festigkeit und die höhere Steifigkeit des Spätholzes wirken einer weiteren Ausbreitung der im weichen Frühholz entstandenen Risse entgegen. Mattheck & Kübler gehen auf diesen Vorgang näher ein [61]. Die Form dieser Risse ist rhomben- oder spindelförmig, wie eine von der Seite betrachtete Linse (Abb. 2). Wir werden uns mit dieser in der Natur häufig auftretenden Form später noch einmal bei eingehender Betrachtung der Holzstrahlen beschäftigen. Caspari hat in seiner Dissertation bereits eingehend die Literatur zum Thema Trockenrisse studiert und findet daneben weitere Bezeichnungen wie Tracheidenkollaps oder Xylemspalten [17]. Caspari kommt bei seinen eigenen Untersuchungen zu dem Schluß, daß auch die Schaftrisse in Fichte (*Picea abies*), die mit Längen von bis zu 2.5 Metern von außen deutlich sichtbar sind und zu einer erheblichen Wertminderung des Holzes führen, ihren Ausgang von solchen Trockenrissen nehmen. Als begünstigende Faktoren findet Caspari gute Nährstoffversorgung und hohe Bodenfrische. Diese ausgezeichneten Wuchsbedingungen führen zu signifikant breiteren Jahresringen. Auch weisen die Tracheiden, insbesondere im Frühholz, große Lumina und geringe Wandstärken in den von Trockenrissen betroffenen Jahresringen auf; beides sind Faktoren, die den Widerstand der Zellen gegen inneren Unterdruck reduzieren. Es erwirkt also gerade besonders kräftig aussehende, schnell gewachsene, dominante Bäume [43, 75, 93]. Als weiterer begünstigender Faktor für Trockenrisse seien die mit langen Dürreperioden oft einhergehenden, hohen Temperaturen zu nennen. Daher kommt auch der gelegentlich auftretende Begriff Hitzeriß. Kollmann fand heraus, daß bei 40 Grad Celsius die Holzfestigkeit bis zu 20 % niedriger ist als bei einer Temperatur von 20 Grad Celsius [46]. Monchaux & Nepveu sahen gar Hitze als Hauptursache für Risse in Fichtenstämmen in Frankreich an [64].

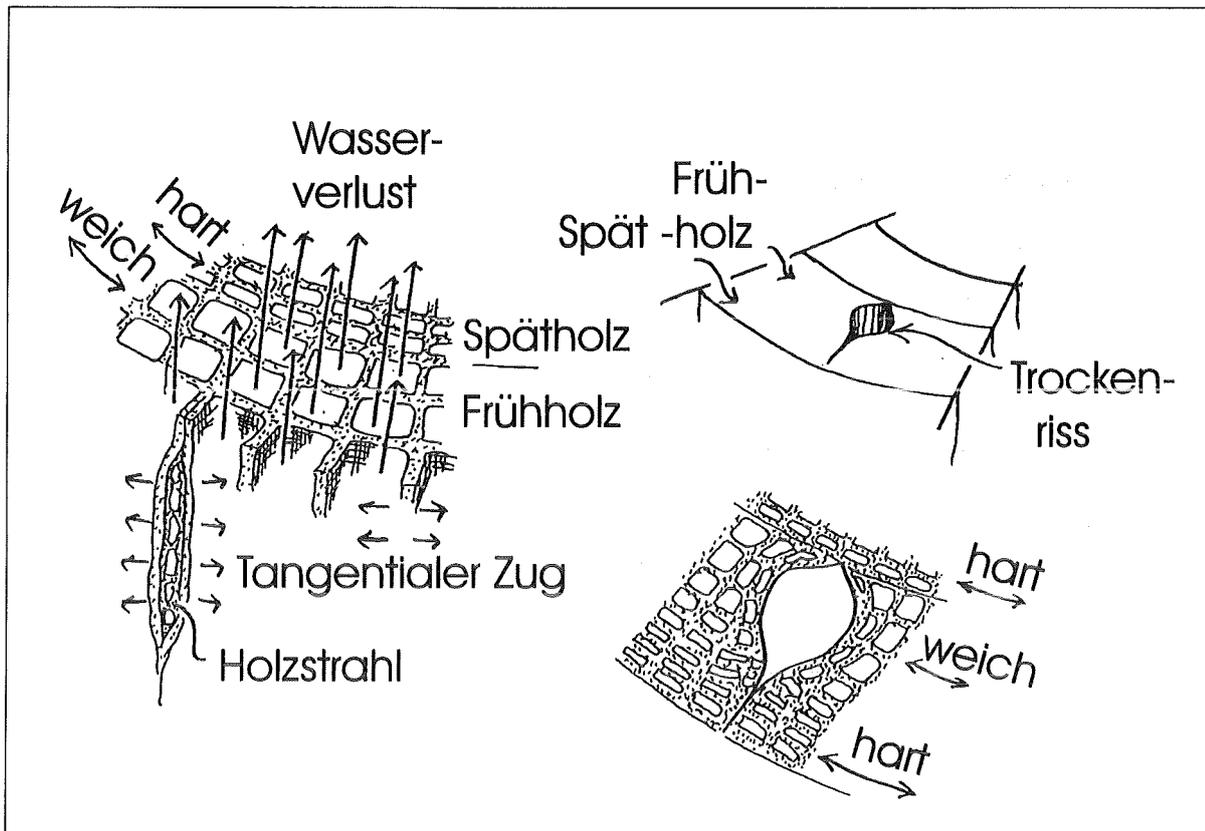


Abbildung 2: Rhombenförmige Trockenrisse sind auf innere Saugspannungen zurückzuführen. Die Zellen des Frühholzes mit ihren relativ schwachen Wänden sind bevorzugt betroffen. Die Spätholzfäsern mit ihren starken Wänden widerstehen dem Kollaps dagegen recht gut (nach Mattheck & Kübler [61]).

### 3.2 Frostrisse

Dieses Rißphänomen beschäftigte Hartig bereits 1894 [34]. Er erkannte schon damals dessen Ursache im Ausfrieren von Wasser aus den Zellwänden in die Lumina. Die unter Feuchtigkeitsverlust kontrahierenden Zellwände erzeugen einen inneren Querzug im Holz, der dann zu Rissen in radial-longitudinaler Ebene mit bis zu mehreren Metern Länge führt. Der ein oder andere Leser hat die Bildung eines solchen Risses vielleicht schon einmal bei einem Spaziergang im winterlichen Wald akustisch in Form eines nicht zu überhörenden Knalls wahrgenommen. In den 30er und 40er Jahren war vor allem in Deutschland die Meinung verbreitet, Frostrisse entstünden alleine aufgrund der thermischen Kontraktion der Stammoberfläche bei sinkenden Temperaturen [44]. Mayer-Wegelin hielt diese These nicht für haltbar, schon alleine weil Frostrisse bei höheren als den von Kollmann als rißrelevant eingeschätzten Temperaturen beobachtet werden können [62]. Schirp & Kübler untersuchten den Temperatureinfluß genauer und kamen zu dem Schluß, daß nur im Darrzustand die thermische Kontraktion ausschlaggebend ist [79]. Für mittlere, d.h. im grünen Baum vorherrschende Wassergehalte von  $\geq 30\%$  mit freiem Wasser in den Zellhohlräumen friert Wasser aus den Zellwänden in die Lumina aus. Grund ist die höhere Wasserdampfspannung gegenüber den Zellwänden, denen dadurch die Feuchtigkeit entzogen wird, sie sozusagen austrocknet und zu Schwindung führt. Bei besonders hohen Wassergehalten

drücken die wachsenden Eiskeime von innen auf die Zellwände und verursachen damit eine Ausdehnung in den betreffenden Jahresringen. Expansionsunterschiede zu wärmeren oder weniger feuchten, benachbarten Jahresringen erzeugen dann ihrerseits Risse. Dieses Phänomen dürfte eine wichtige Rolle bei dem jährlich erneuten Aufplatzen der durch Kallusbildung verheilten Frostrisse spielen. Die Hohlräume hinter den durch adaptiven Reparaturwuchs im Sommer verheilten Rissen [57] füllen sich häufig mit Wasser und bewirken so ein Wiederaufreißen im Winter, indem das umliegende Holz dort aufgrund der Eiskeimbildung tangentialen Druck entwickelt und so den vorderen, trockeneren Bereich der Wulst unter Zugspannungen setzt [80]. Das Thema Frostrisse haben Butin und Shigo mit vielen brillanten Photos in recht anschaulicher Weise illustriert [15].

### **3.3 Risse aufgrund der Schaftgeometrie**

#### **3.3.1 Schilferrisse oder Fischohren**

Volkert beschrieb 1940 Risse, die er als Schilfern oder auch als Fischohren bezeichnete. Diese verlaufen meist durch das Mark und weisen eine bestimmte Orientierung auf, nämlich stets senkrecht zur Stammneigung bzw. zum Kronenhang oder zur Windrichtung [89]. Dabei fand Volkert oft zusätzlich Faserstauchungen auf der Leeseite solcher Unglückskandidaten. Diese Risse dürften damit ausführlich genug beschrieben sein, um von dem mechanisch versierten Leser klar als Schubrisse erkannt zu werden. Abbildung 3 zeigt das äußere Erscheinungsbild eines solchen Schubrisses. Mattheck & Breloer beschrieben diese Risse in ihrem Handbuch der Schadenskunde mit dem Vergleich eines Buches, dessen Seiten bei Biegung aufeinander abgleiten [57].

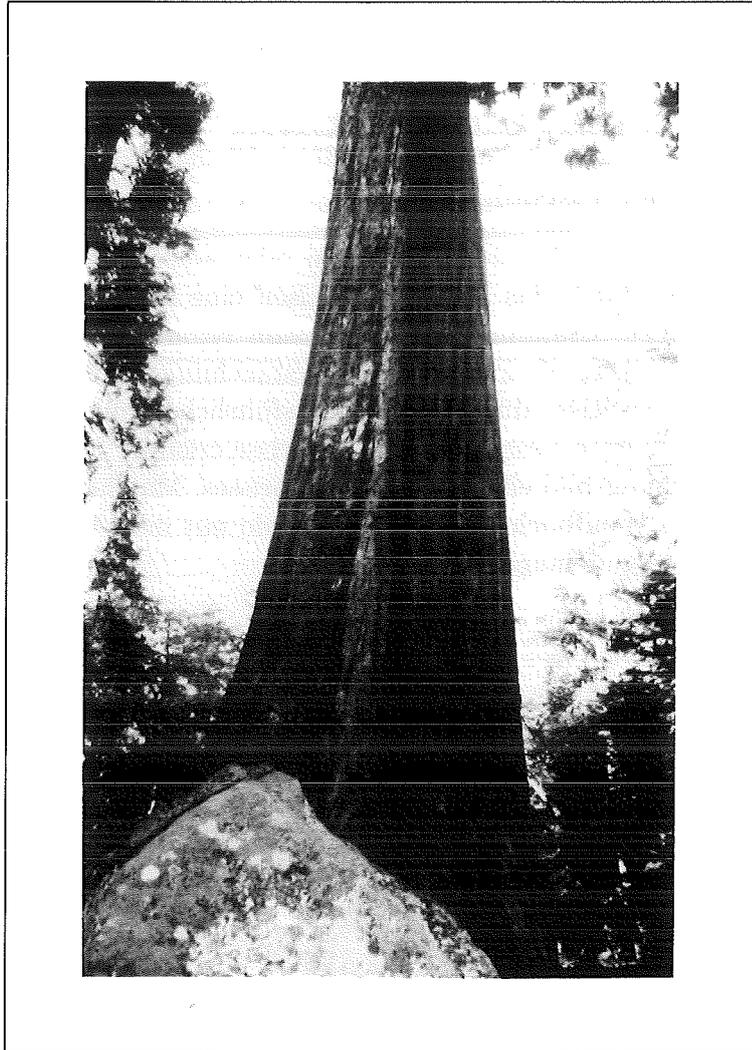


Abbildung 3: Schubrisse entstehen senkrecht zur Belastung durch Wind oder Eigengewicht, wie bei diesem Mammutbaum (*Sequoiadendron giganteum*).

### 3.3.2 Drehrisse

Drehrisse findet man an Bäumen mit ausgeprägtem Drehwuchs, d.h. die Holzfasern sind nicht parallel zum Stamm ausgerichtet, sondern folgen einer spiralenförmigen Bahn, die sich um die Stammlängsachse nach oben windet. Wird ein solcher Stamm nun durch Torsion, etwa durch einen stark belaubten, dominanten Ast, der senkrecht zur Windrichtung steht, belastet, so kann es zu einem Dreh- oder besser Torsionsriß kommen, wenn die Drehbewegung entgegen der Windungsrichtung der Faserspirale erfolgt [57]. Die Fasern werden dabei in Querrichtung belastet, in der der Bruchwiderstand ohnehin wesentlich kleiner als in Längsrichtung ist. Eine Finite Elemente-Analyse des Torsionsbruches drehwüchsiger Stämme lieferte Gerhardt in seiner Dissertation [31].

### 3.3.3 Unglücksbalken

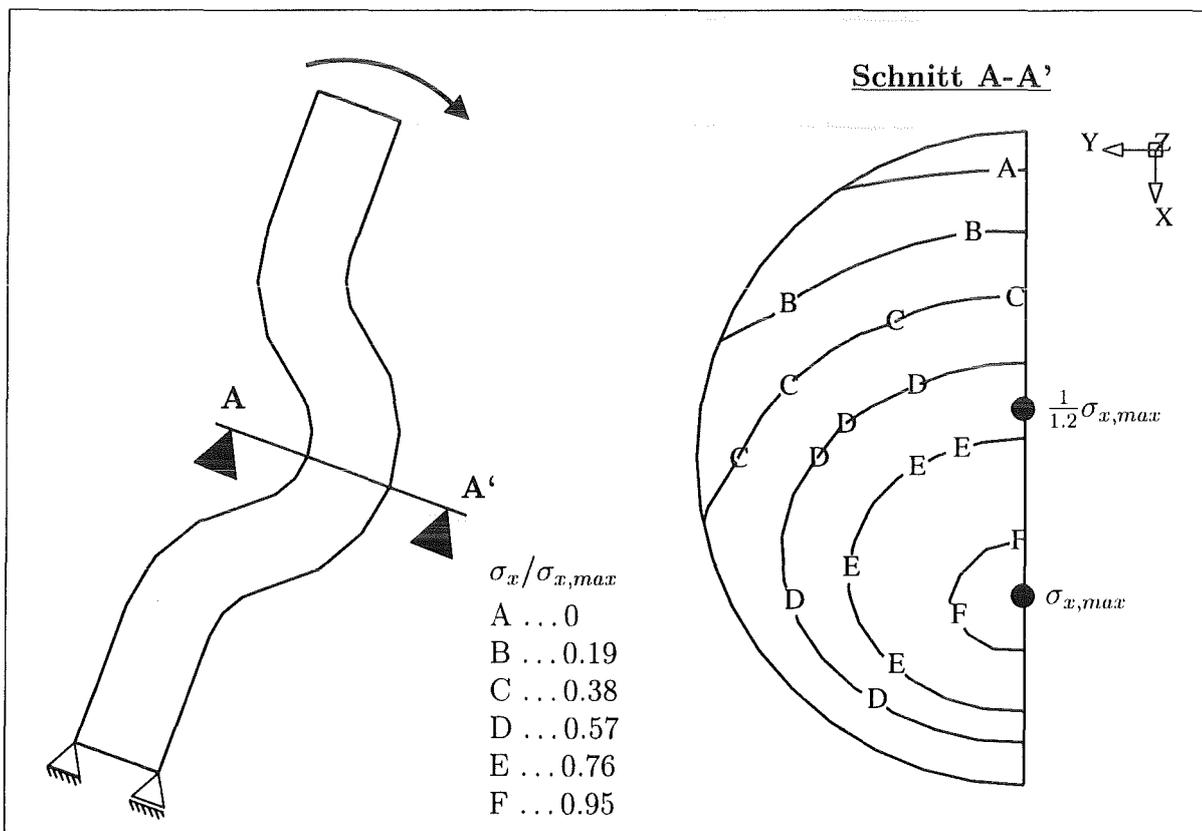


Abbildung 4: Aufgrund der besonderen Geometrie des Astknies werden die Längskräfte derart in Querrichtung umgelenkt, daß es zu einer Spaltung des Schaftes kommt (nach Mattheck).

Der Unglücksbalken soll hier nur kurz erwähnt werden, da er in der Literatur bereits mehrfach abgehandelt wurde [31, 55, 57]. Er resultiert aus der Biegung eines Astknies entgegen seinem Krümmungsverlauf. Abbildung 4 zeigt, daß das Querspannungsmaximum  $\sigma_{x,max}$  nur etwa das 1.2-fache der Querspannung im Markbereich ausmacht. Am Ort des Spannungsmaximums würde radiales Versagen auftreten. Die radiale Querspannungsfestigkeit des Holzes wäre also hier ausschlaggebend, wohingegen bei einem Rißausgang

im Mark der Riss unter tangentialem Versagen des Stammes weiterreißen würde. Da die radiale Festigkeit aber etwa doppelt so hoch wie die tangentiale Festigkeit ist und speziell das Mark einen mechanischen Schwachpunkt darstellt, reißt der überwiegende Teil der Astknie im Mark, mit weiterem Rißverlauf aufgrund tangentialen Versagens. Es handelt sich also ebenfalls um einen Riß in radial-longitudinaler Ebene.

### 3.3.4 Bananenrisse

Hierbei handelt es sich um eine bislang wenig beachtete Rißart [23, 24]. Der Grund mag

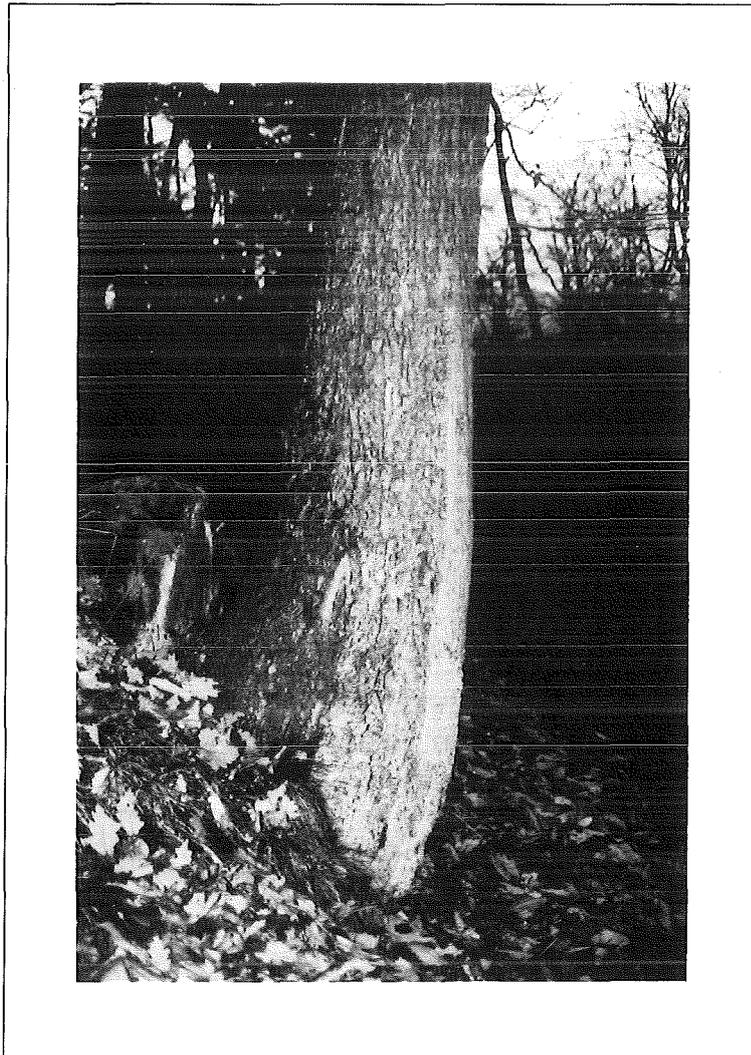


Abbildung 5: Bananenriß mit Rippe am Beispiel einer Eiche.

darin liegen, daß sie nur an krummen Stamm- und Astbereichen zu finden sind, die in unseren nach forstwirtschaftlichen Gesichtspunkten einheitlich streng gen Himmel gezogenen Waldbäumen nur recht selten anzutreffen sind. Der Verfasser traf dieses Rißbild denn auch fast ausschließlich in sich selbst überlassenen Waldstücken und in Parkanlagen an. In Letzteren können sie durchaus ein Gefahrenrisiko für die Allgemeinheit darstellen. Abbildung 5 zeigt einen solchen Riß auf der Unterseite einer gekrümmten Eiche. Ihren Namen verdanken diese Risse der Analogie zu einer frischen Banane, die auf Biegung entgegen ih-

rer Krümmung ein ähnliches Rißbild auf der konvexen Druckseite aufweist (Abbildung 6) [61]. Auf diese bislang wenig erforschte Rißform soll im folgenden recht intensiv eingegangen werden, da sich krumme Bäume ausgezeichnet zu systematischen Untersuchungen der Vorsichtsmaßnahmen eignen, die die Bäume gegen tangenciales Versagen treffen.

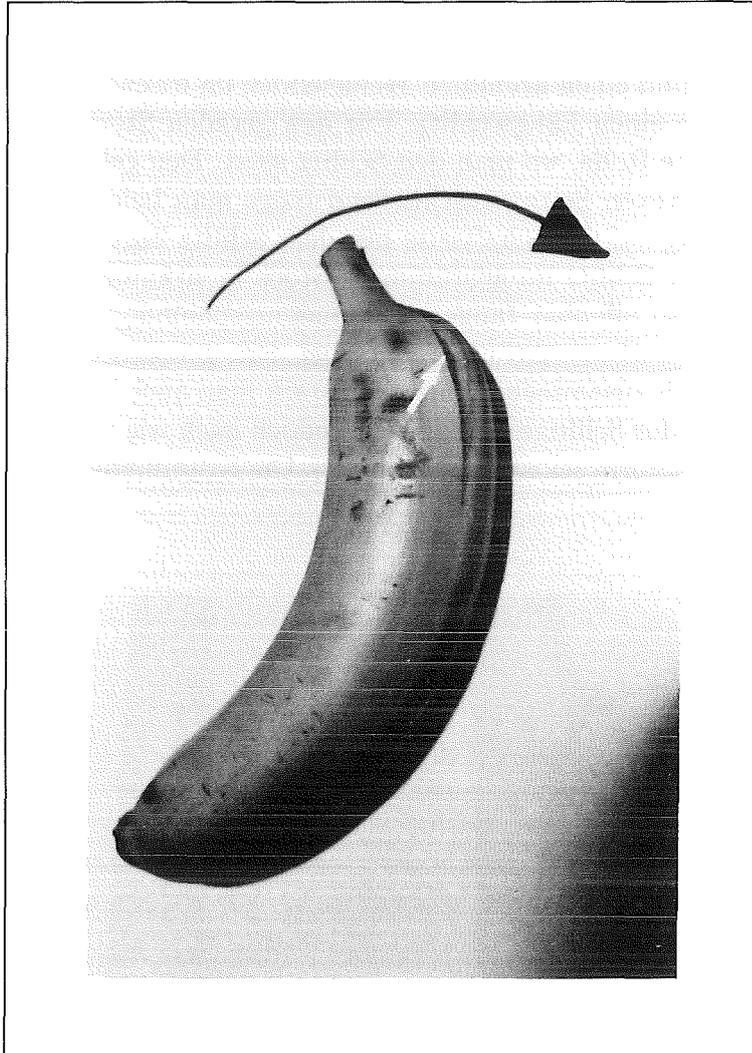


Abbildung 6: Frische Bananen reißen bei Biegung entgegen ihrer Krümmung auf der konvexen Druckseite auf und zwar am Punkt der schärfsten Krümmung im oberen Teil der Banane.

## 4 Die Entstehung der Bananenrisse

### 4.1 Die Rolle der Schaftkrümmung bei der Bananenrißbildung

Charakteristisch für jeglichen Bananenriß ist die Biegung entgegen der Schaftkrümmung, wodurch die konvexe Seite unter Längsdruck gerät. Ist die Krümmung für einen Bananenriß nun notwendig? Die Antwort liefert folgendes, leicht durchführbares Experiment: Man nehme einen geraden und einen krummen Weidenstock im frischen Zustand und ziehe mit dem Taschenmesser je einen Längsschlitz. Für den geraden Stock spielt es aus Symmetriegründen dabei keine Rolle, wo man den Schlitz setzt. Den gekrümmten Stock schlitzte man aber auf der konvexen Seite. Anschließend biege man beide Stöcke derart, daß die Druckseite der Biegung auf der Schaftseite mit dem Schlitz liegt. Als Ergebnis kann man festhalten, daß sich der Schlitz im gekrümmten Stock in zirkumferentieller Richtung aufweitet. Hier wirken also offenbar tangentielle Querkzugspannungen aufgrund von äußerer Biegebelastung und Querkontraktion. Anders bei dem geraden Stock. Der Schlitz wird weder aufgeweitet, noch zusammengedrückt, so stark man auch biegt. Am Ende beginnen die Fasern im Bereich des Schlitzes zu knicken, jedoch nach wie vor ohne eine signifikante Veränderung der Schlitzform selbst (Abbildung 7). Die Krümmung scheint also tatsächlich

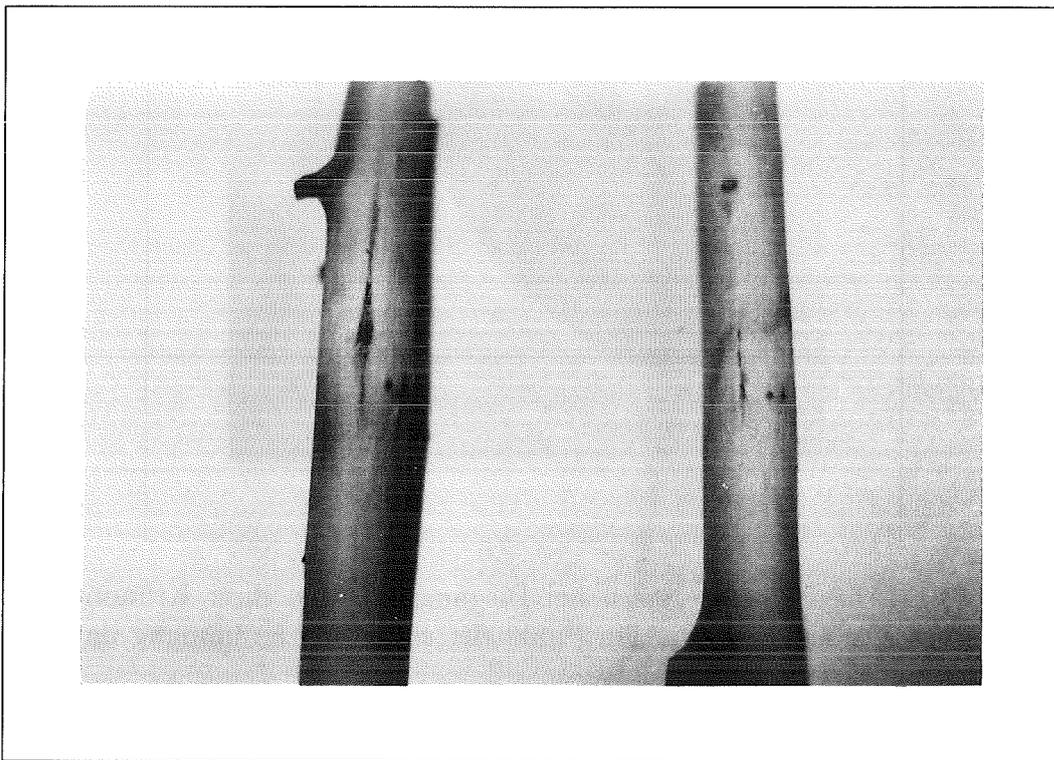


Abbildung 7: Risse auf der konvexen Seite gekrümmter Äste weiten sich bei Biegung auf (links). Nicht so in geraden Ästen; selbst bei einsetzendem Faserknicken im Rißrandbereich erfolgt keine auffällige Rißveränderung (rechts).

Grundvoraussetzung für den Bananenriß zu sein. Der Starkast einer mächtigen Fichte (*Picea sitchensis*) in einem Park auf der schottischen Insel Skye gibt sogar Anlaß zu einer noch weiter gehenden Vermutung. Auf der Unterseite dieses Astes lag ein etwa vier Meter langer Längsriß vor, ein Bananenriß, der jedoch über seine Länge unterschiedlich starke

Ausprägung aufwies. Die Astunterseite beschreibt zwei aufeinanderfolgende Astknie, also zwei konvexe Bögen mit einem konkaven Zwischenstück. Der Bananenriß wies die größte Aufweitung in den Punkten stärkster Krümmung der beiden konvexen Astbereiche auf, wohingegen er im konkaven Mittelstück nur schwach ausgebildet war. Abbildung 8 zeigt den Baum, der zu dieser Hypothese anregte.

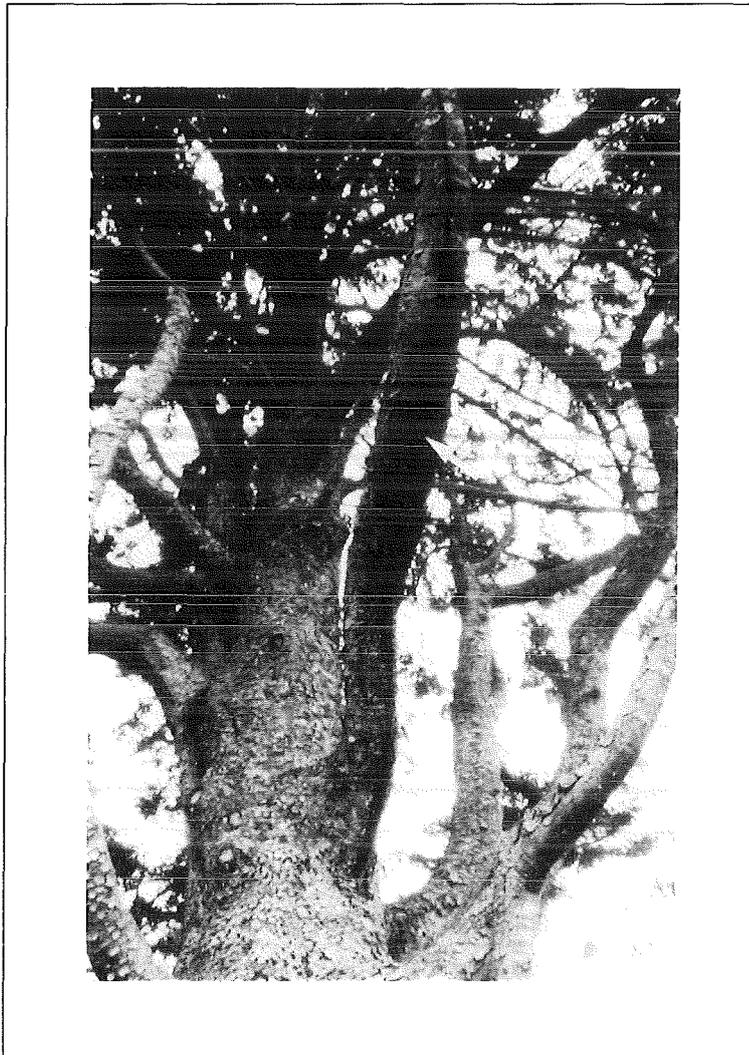


Abbildung 8: Unterschiedlich starke Ausbildung eines Bananenrisses am Ast einer Fichte (*Picea sitchensis*). Je schärfer die Krümmung ist, um so stärker ist auch der Bananenriß ausgeprägt.

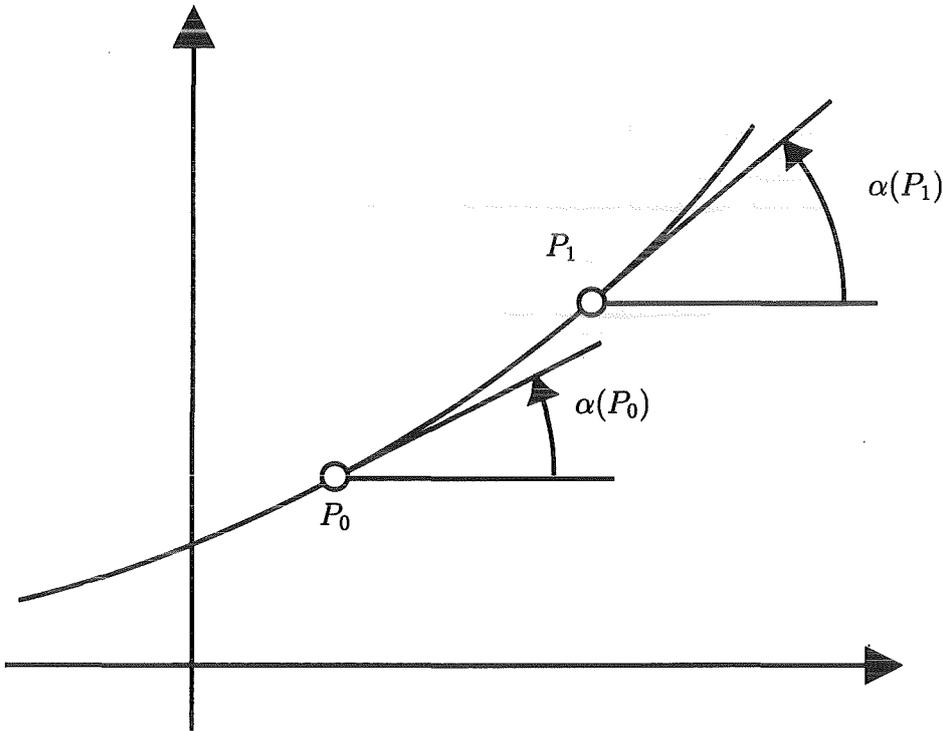
#### 4.1.1 Definition der Krümmung

Will man einen Beweis für die Krümmung als Mitverursacher von Querzugspannungen führen, ob numerischer oder analytischer Natur, sollte man sich kurz mit der Definition der Krümmung auseinandersetzen. In der Literatur sind nämlich zwei Definitionen gebräuchlich: Das bekannte Standardwerk von Bronstein & Semendjajew [14] liefert die folgende Definition: „Bezeichnet man mit  $\alpha(P)$  den Winkel zwischen der positiven x-Achse und der positiven Tangentenrichtung im Punkt  $P$  (gemessen entgegen dem Uhrzeigersinn), dann

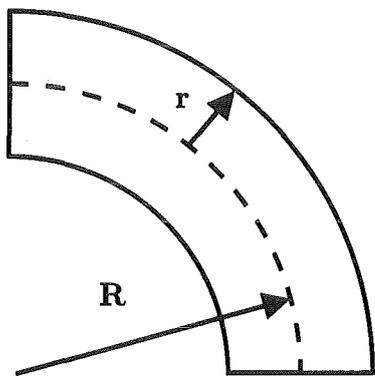
wird die *Krümmung*  $K$  im Punkt  $P_0$  definiert durch den Grenzwert

$$K = \lim_{P_0 \rightarrow P_1} \frac{\alpha(P_1) - \alpha(P_0)}{\widehat{P_0 P_1}}$$

( $\widehat{P_0 P_1}$  Bogenlänge zwischen  $P_0$  und  $P_1$ :  $\widehat{P_0 P_1} > 0$ , wenn  $P_1$  im Sinne der positiven Richtung auf  $P_0$  folgt, sonst  $\widehat{P_0 P_1} < 0$ .)“



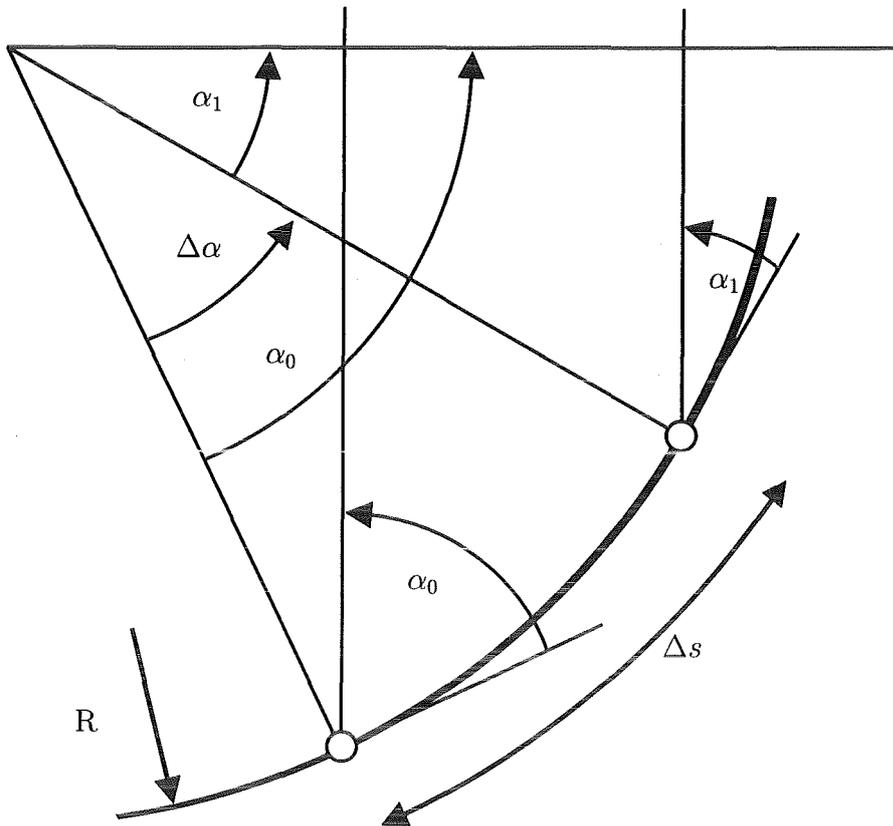
Daneben wird in verschiedenen Büchern die Krümmung als Verhältnis des Krümmungsradius zum Querschnittsradius eines gekrümmten Stabes mit rundem Querschnitt definiert [36].



Krümmung  $\Gamma = \frac{R}{r}$   
mit

$R$  ... Radius der Krümmung des Stabes  
 $r$  ... Radius des Kreisquerschnittes des Stabes

Nimmt man nun eine Krümmungsmessung an Ästen vor, indem man auf der Astunterseite jeweils in einem bestimmten Abstand von  $\Delta s$  den Winkel  $\alpha$  zur Horizontalen aufnimmt und daraus ein  $\Delta\alpha(s)$  bestimmt, so ergibt sich folgende Umrechnung:



$$\Delta\alpha = \frac{\Delta s}{R + r}$$

bei Messung auf der konvexen Unterseite des Astes und damit

$$\Gamma = \frac{R}{r} = \frac{\Delta s / \Delta\alpha - r}{r} = \frac{\Delta s}{r\Delta\alpha} - 1 = \frac{1}{rK} - 1$$

Bei Messung im Bereich der neutralen Faser des Astes vereinfacht sich dieser Ausdruck zu:

$$\Gamma = \frac{\Delta s}{r\Delta\alpha} = \frac{1}{rK}$$

Die Kenntnis dieser einfachen Umrechnungsformel erleichtert es, mathematische Berechnungen mit für Bäume realistischen Krümmungen anzustellen.

#### 4.1.2 Nachweis des Krümmungseinflusses

Zu diesem Zweck wurde zunächst ein zweidimensionales FE-Modell erzeugt und bei Zugrundelegung des verallgemeinerten ebenen Dehnungszustandes mit Biegung beaufschlagt. Dieser spezielle Dehnungszustand kann hier zur Vereinfachung herangezogen werden, da die in der dritten Dimension auftretenden Verschiebungen einen linearen Verlauf nehmen. Man kann sich das Modell dabei in die dritte Dimension wie eine Ziehmonika hochgezogen vorstellen. Unser zweidimensionales Kreismodell repräsentiert also einen Vollzylinder. Dieser Zylinder kann außerdem eine Krümmung konstanter Größe aufweisen, die mit

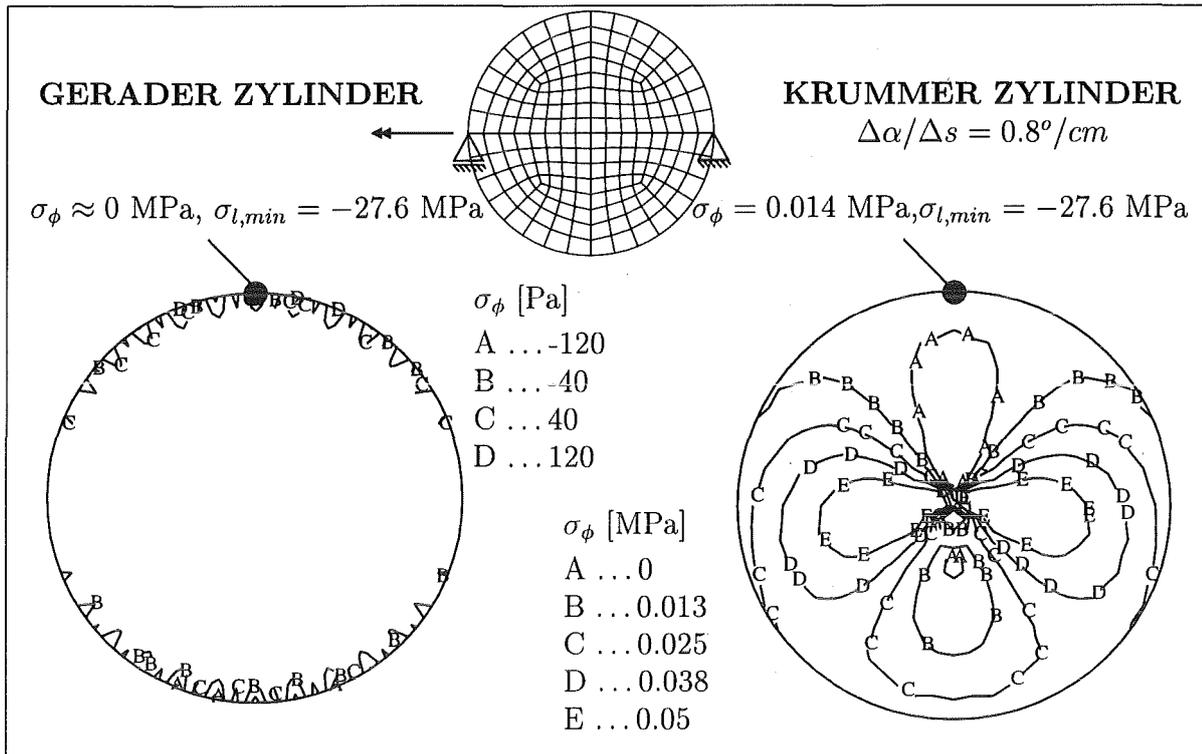


Abbildung 9: Tangentialspannungsverteilung bei Biegung eines geraden und eines krummen anisotropen Zylinders.

der Zylinderlänge und dem Krümmungsradius vorgegeben wird. Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Tangentialspannungen  $\sigma_\phi$  bei Biegung des geraden Zylinders. Das Biegemoment wird so gewählt, daß die Druckspannungen in Längsrichtung den Höchstwert von  $\sigma_{l,min} = -27.6 \text{ MPa}$  erreichen. Dies entspricht der Längsdruckfestigkeit grünen Buchenholzes. Diese Vorgabe ist durchaus sinnvoll, wenn man davon ausgeht, daß der Baum als Idealkonstruktion in allen Achsen gleichzeitig versagt. Die äußerst geringen, von Randknoten zu Randknoten ihr Vorzeichen wechselnden Tangentialspannungen auf beiden Seiten der Biegung sind als Nullspannungen zu werten. Das Ergebnis deckt sich also mit dem ersten Teil des Weidenstockexperimentes. Lekhnitskii liefert eine analytische Lösung für die zirkumferentiellen Spannungen in einem auf Biegung beanspruchten geraden, zylindrischen Körper. Er kommt zu dem Schluß, daß auf Druck- und Zugseite der Biegung tangential keine Querspannungen wirken. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Biegebalken aus isotropem oder orthotropem Material besteht [51].

In einem weiteren Schritt wird unserem FE-Modell nun eine Krümmung aufgegeben. Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Tangentialspannungen für  $\Delta\alpha/\Delta s = 0.8^\circ/cm$ . Neben den für das Entstehen des Unglücksbalkens wichtigen Zugspannungen im Bereich der neutralen Faser treten nun sowohl auf der konvexen, als auch auf der konkaven Seite des gekrümmten Zylinders positive Tangentialspannungen auf. Damit wäre der zweite Teil unseres Biegeversuches mit den Weidenstöcken nachvollzogen. Allerdings stellt sich die Frage, wie es überhaupt zu Bananenrissen kommen kann, wenn doch die tangentialen Zugspannungen in der neutralen Faser höher sind als auf der konvexen Seite. Ein Versagen, ähnlich dem des Unglücksbalkens wäre ja dann stets eher als der Bananenriß zu erwarten. Der Grund mag in der Inhomogenität des Holzes liegen. Es ist durchaus vorstellbar,

daß lokale Festigkeitsunterschiede dafür verantwortlich sind. Zu einem späteren Zeitpunkt werden wir auch sehen, daß Bananenrisse häufig als Sekundärrisse nach bereits erfolgter Schädigung in Form eines Unglücksbalkenrisses auftreten.

Aber es stellt sich noch eine weitere Frage. Timoshenko & Goodier [86] widmeten sich bereits analytisch dem gekrümmten, isotropen Zylinder, der durch ein Moment belastet wird. Unter der Annahme, daß in der meridionalen Ebene keine Schubspannungen wirken, kamen sie für die beiden Randpunkte auf der konkaven und konvexen Seite des Zylinders zu folgendem Ergebnis:

$$\sigma_{\theta, \text{konvex}} = \sigma_{\theta, \text{konkav}} = -\frac{M(1+2\nu)}{\pi R a^4 (1+\nu)} 2a^2 = -0.78 \frac{M}{R a^2} \quad \text{mit} \quad \nu = 0.3$$

Das bedeutet, daß die tangentialen Querspannungen auf der konkaven und konvexen Seite gleich sind. Dies verwundert zunächst, leuchtet aber ein, wenn man sich das Verformungsbild des Kreisquerschnittes anschaut. Dieser ovalisiert vollkommen symmetrisch zur Biegeachse. Da der Bananenriß aber fast ausschließlich auf der konvexen Stamm- bzw. Astunterseite auftritt, liegt der Schluß nahe, daß noch weitere Faktoren, wie etwa die Querexpansion infolge des Eigengewichtes bei einer derartigen Rißbildung von entscheidender Bedeutung sind. Abbildung 10 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse der analytischen Lösung mit denen der Finite Elemente-Analyse. Die mit der Krümmung

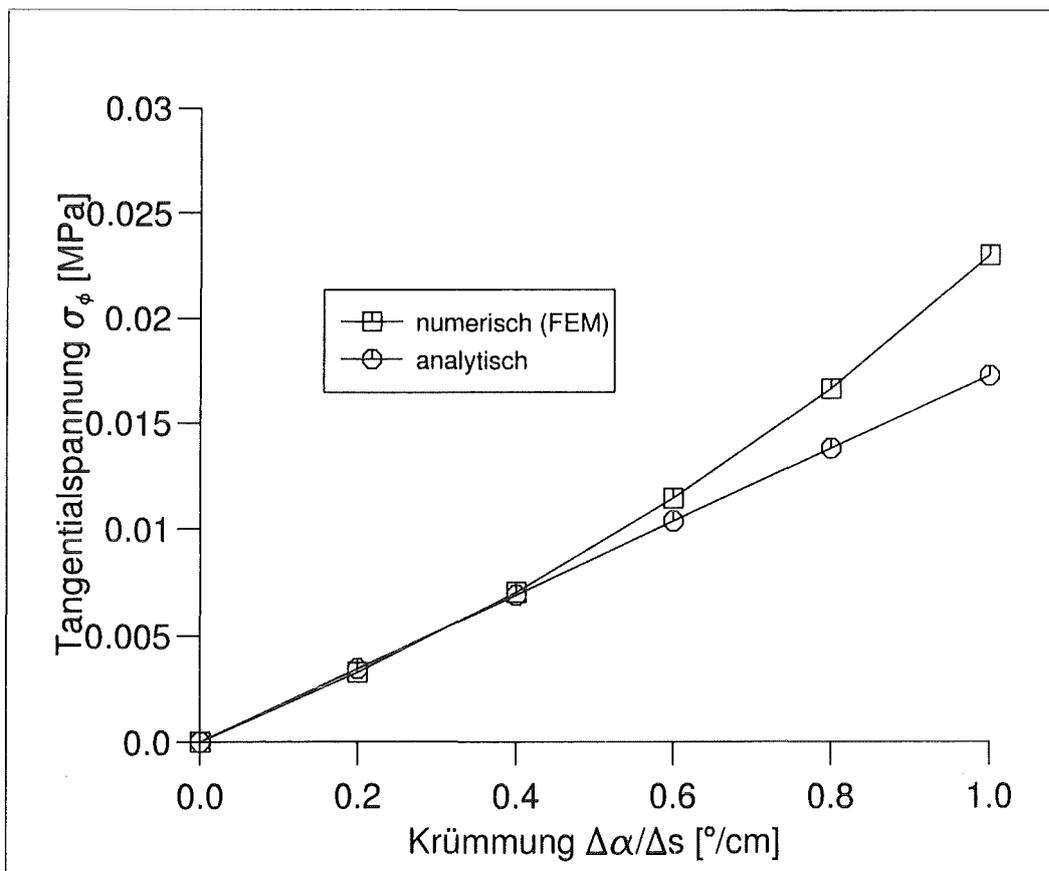


Abbildung 10: Tangentiale Querspannungen auf der konvexen Seite in Abhängigkeit von der Krümmung.

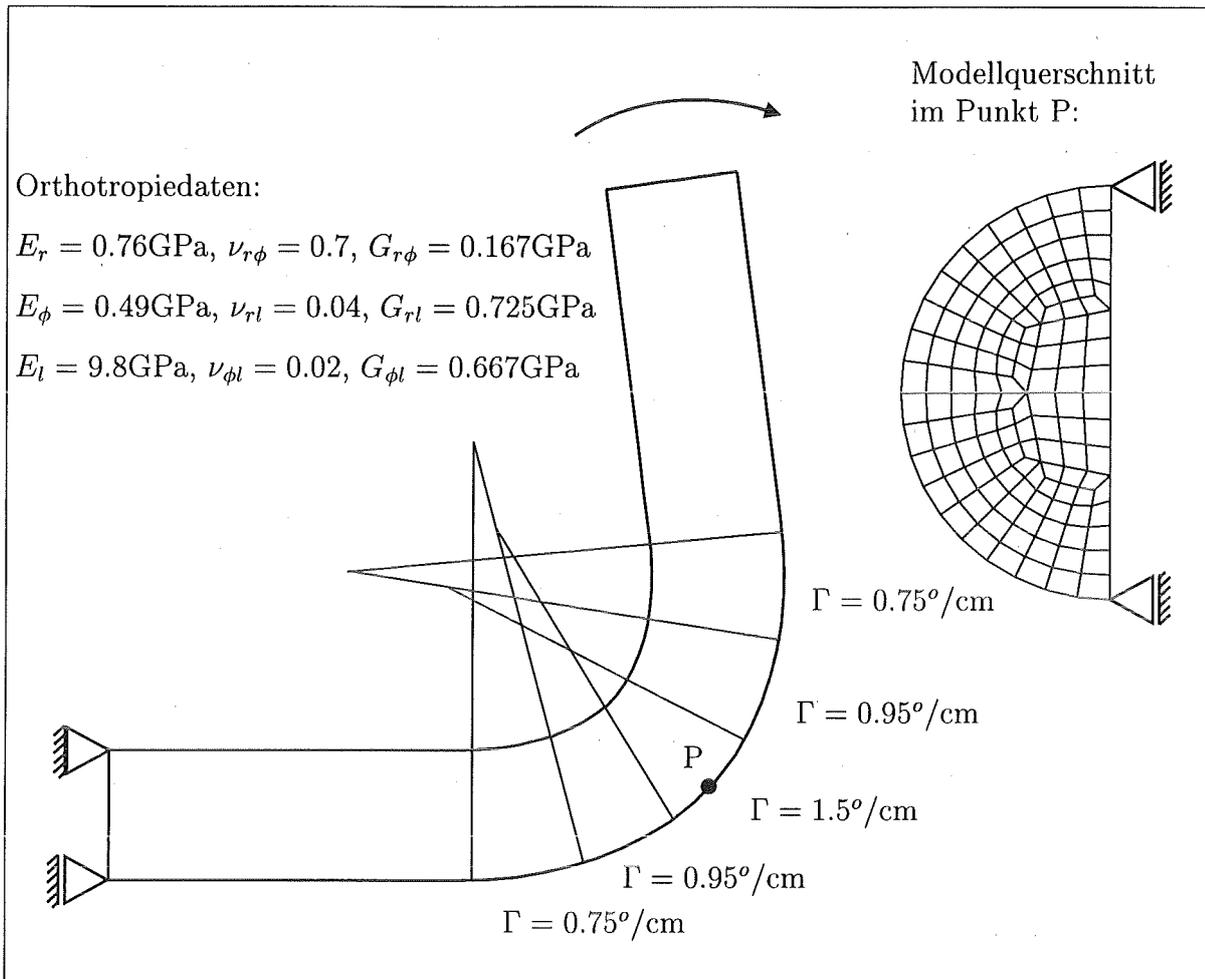


Abbildung 11: Geometrie und Einspannung des FE-Modell mit Krümmungsmaximum im Scheitelpunkt P.

zunehmende Abweichung der numerischen Lösung ist auf einen wachsenden Einfluß der Einspannung des FE-Modells zurückzuführen, der das Ergebnis verfälscht.

## 4.2 Den Bananenriß begünstigende Faktoren

Die Notwendigkeit der Krümmung bei der Entstehung von Bananenrissen ist somit klar herausgestellt und bewiesen worden. Um die dabei neu entstandenen Fragen beantworten zu können, sind weitere Berechnungen anzustellen. Da das bisher verwendete zweidimensionale Modell bereits Einspannungsprobleme bei zu scharfen Krümmungen in Verbindung mit orthotropem Materialverhalten zeigt, wird nun auf ein dreidimensionales Modell übergegangen. Das Modell stellt einen krummen Stab dar, dessen Krümmungsradius nicht konstant ist, sondern in seinem Scheitelpunkt einen Ort schärfster Krümmung aufweist. Zu den beiden Modellenden hin nimmt die Krümmung dann stufenweise ab und endet schließlich für  $R \rightarrow \infty$  in einem geraden Längsachsenverlauf. Unter Ausnutzung der Symmetrien wird nur eine Hälfte des gebogenen Stabes gerechnet. Die Orthotropiedaten entsprechen etwa denen von grünem Buchenholz unter Verwendung eines zylindrischen Koordinatensystems. Abbildung 11 zeigt die Modellgeometrie und die Einspannung. Die

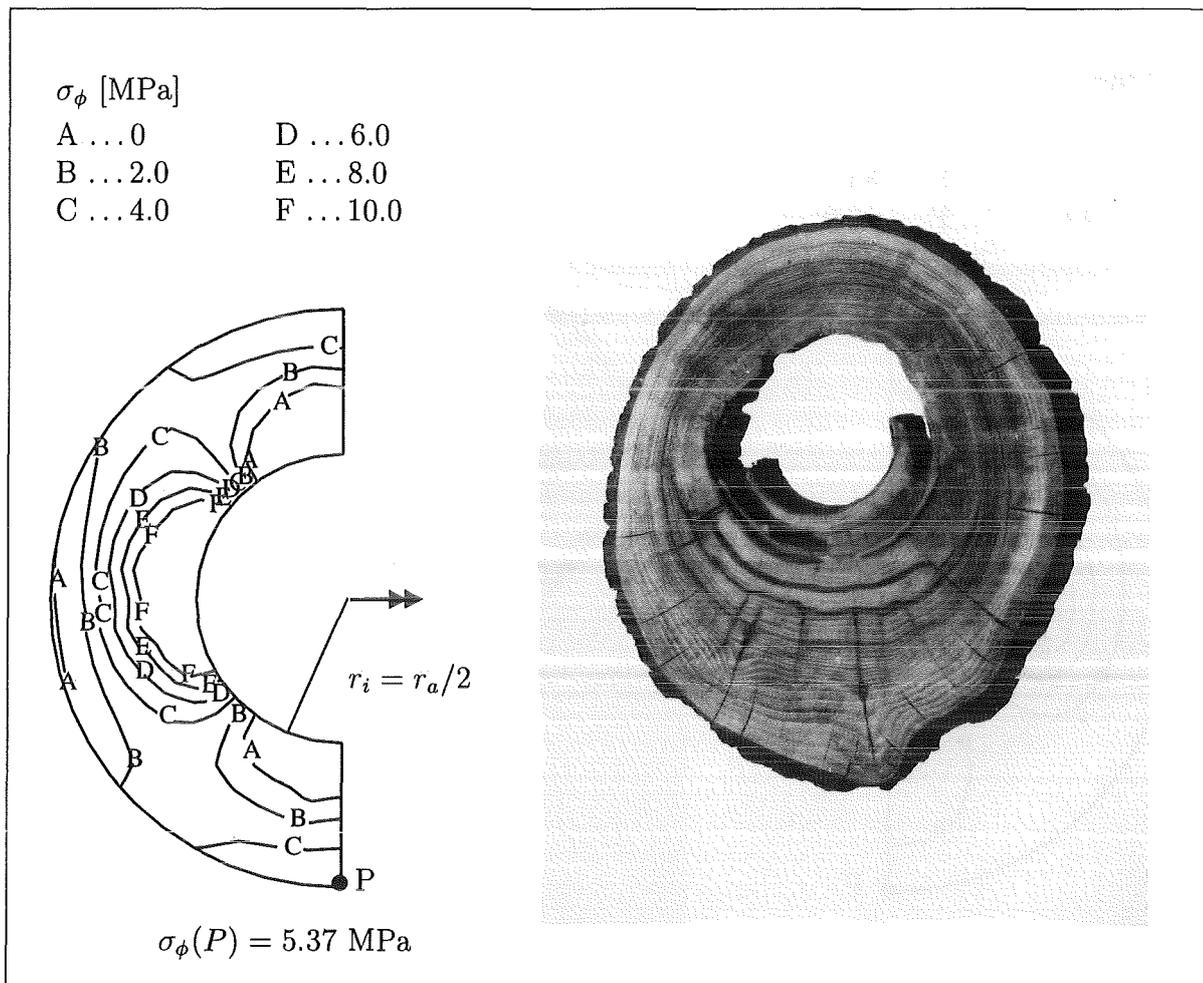


Abbildung 12: Tangentialspannungsverteilung bei hohlem Querschnitt eines unter Biegung beanspruchten Astknies und Bananenrißbildung am Beispiel einer hohlen Edelkastanie (rechts).

äußere Last ist so angesetzt, daß im konvexen Scheitelpunkt P die Längsspannung  $\sigma_l$  die Höhe der Druckfestigkeit von Buchenholz in Faser- bzw. Stammrichtung von  $-27.6 \text{ MPa}$  annimmt [50]. Die Querspannung in tangentialer Richtung liegt dann im Punkt P bei  $\sigma_\phi = 0.037 \text{ MPa}$ . Von diesem Modell ausgehend werden weitere dreidimensionale Modelle gleicher Krümmungsgeometrie erzeugt, wobei die Querschnittsform im Punkt P variiert wird. Dabei gilt es nun zu untersuchen, welchen Einfluß innere Defekte auf die tangentialen Querspannungen haben. Zunächst wollen wir den Fall einer coaxialen Höhlung im gekrümmten Stamm-Modell untersuchen. Das Wandstärke/Radius-Verhältnis wird dabei mit  $t/r_a = 0.5$  festgesetzt. Die Biegelast wird erneut so gewählt, daß im konvexen Scheitelpunkt P die Längsspannung  $-27.6 \text{ MPa}$  beträgt, um einen Vergleich mit dem vorigen Modell anstellen zu können. Abbildung 12 zeigt das Ergebnis. Wir sehen, daß sich verglichen mit dem Vollquerschnitt die Querspannung im Punkt P auf  $5.37 \text{ MPa}$  erhöht hat. Dies ist mehr als das 100-fache, verglichen mit dem Vollquerschnitt! Dieser Wert liegt auch bereits im untersten Festigkeitsbereich der für Buche in tangentialer Richtung gefunden werden kann (4 bis  $18 \text{ MPa}$ ). Die Tangentialzugspannungen haben sich zwar an den Flanken des Kreisrohrquerschnittes ebenfalls erhöht, ein Sekundärversagen in Ge-

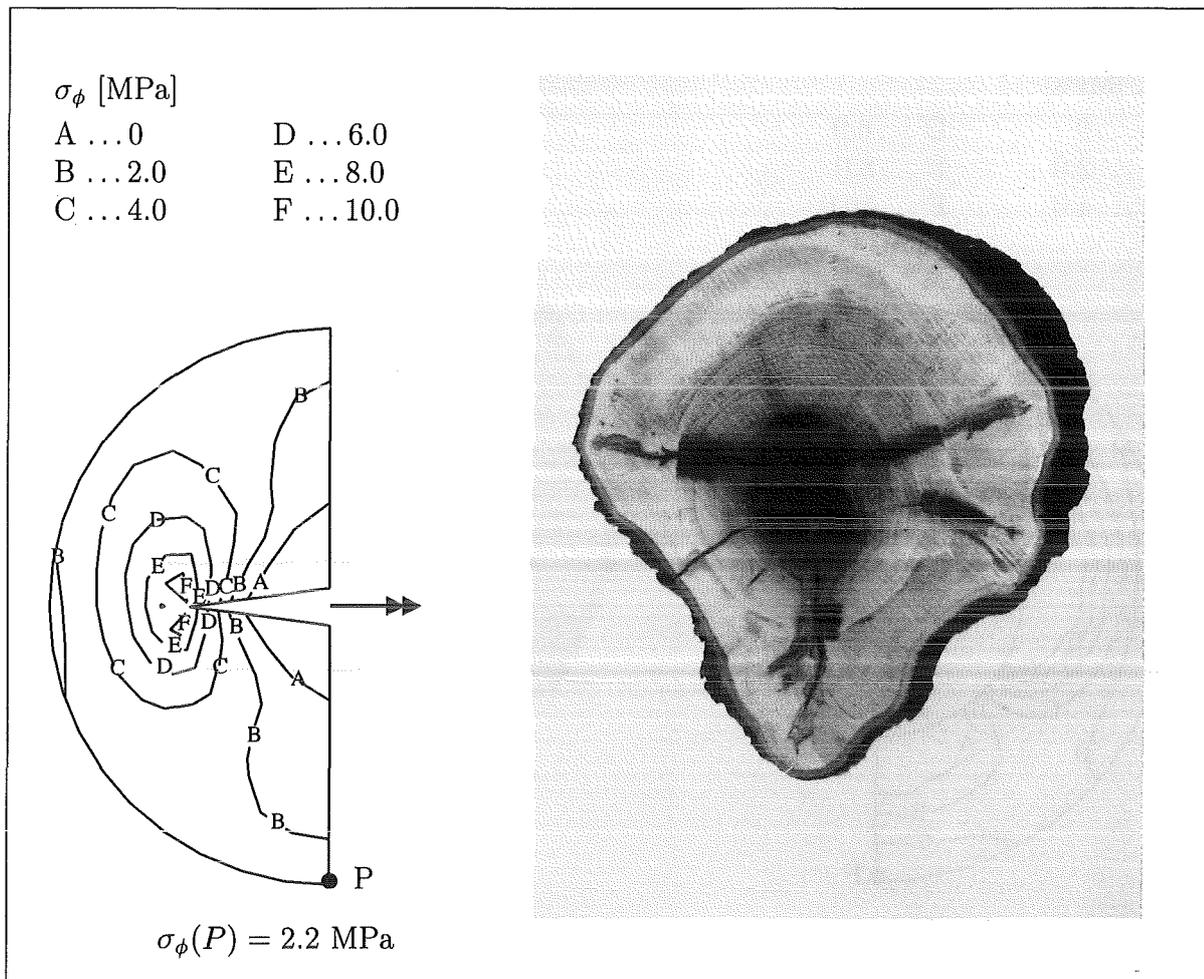


Abbildung 13: Tangentialspannungsverteilung bei mittigem Riß eines unter Biegung beanspruchten Astknies. Tritt ein Bananenriß senkrecht zu einem vorherigen Unglcksbalkenrisses auf, spricht man von einem T-Riß, wie in diesem Fall einer Eiche (rechts).

stalt eines Bananenrisses ist jedoch nicht mehr auszuschließen. Abbildung 12 zeigt rechts den Querschnitt eines dergestalt betroffenen Unglckskandidaten, einer Edelkastanie. Als wäre eine Faulhöhle nicht schon genug Unheil, versäumte es dieser Baum noch, gemäß dem phototropen Reiz Zugholz auf der Stammoberseite zu bilden, wodurch die Stammunterseite unter extrem hohen Längsdruck geriet. Auf diesen reagierte der Baum dann dort mit starkem Zuwachs an drucktragendem Holz, was aber die Bildung mehrerer Bananenrisse nicht verhindern konnte.

Was geschieht nun, wenn ein Ast mit vollem Querschnitt ausgehend von seinem Mark einen Riß ähnlich dem des Unglücksbalken erleidet, der nicht bis zur Außenseite aufreißt, von außen also zunächst nicht zu erkennen ist? So etwas kann durchaus geschehen, wenn der Riß in einen Bereich festeren Holzes läuft und dort zum Stillstand kommt, oder der Unglücksbalken sich partiell begradigt. Um dies zu simulieren, wird unser Modell mit einem Innenri versehen, dessen Länge die Hälfte des Schaftradius beträgt. Abbildung 13 zeigt die sich bei Biegung ergebende Tangentialspannungsverteilung. Im Punkt P ist die tangentialer Zugspannung nicht so hoch wie im Fall des hohlen Querschnittes, allerdings ergibt sich auch ein Wert in der Höhe von 2.2 MPa. Daß es Fälle gibt, in denen der

Unglücksbalkenriß zum Stillstand kommt und quasi als Sekundärschaden der Bananenriß auftritt, beweist folgendes Beispiel. Wie kein anderer Körper bietet der Baum die Möglichkeit, in seinen Jahresringen die Geschichte vergangener Schadensfälle nachzuvollziehen. So kann man in dem in Abbildung 13 gezeigten Querschnitt einer leicht gekrümmten Eiche am Original ablesen, wie 25 Jahre vor der Fällung des Baumes zunächst der Unglücksbalkenriß auftrat. Es gelang dem Baum zwar, die beiden Reißenden zu überwallen, aber 13 Jahre später erfolgt der Bananenriß senkrecht zu dem bereits vorhandenen, inneren Primärriß. Begünstigend wirkten hierbei die durch den ersten Riß erhöhten Tangentialzugspannungen auf der konvexen Schaftunterseite. Wegen seines Aussehens wurde diesem Rißbild auch der Name T-Riß gegeben. Der Bananenriß stellt hier also einen Sekundärriß nach vorheriger Schädigung des Baumes dar. Abbildung 14 zeigt das äußere Erscheinungsbild eines T-Risses am Fuß einer Eiche.

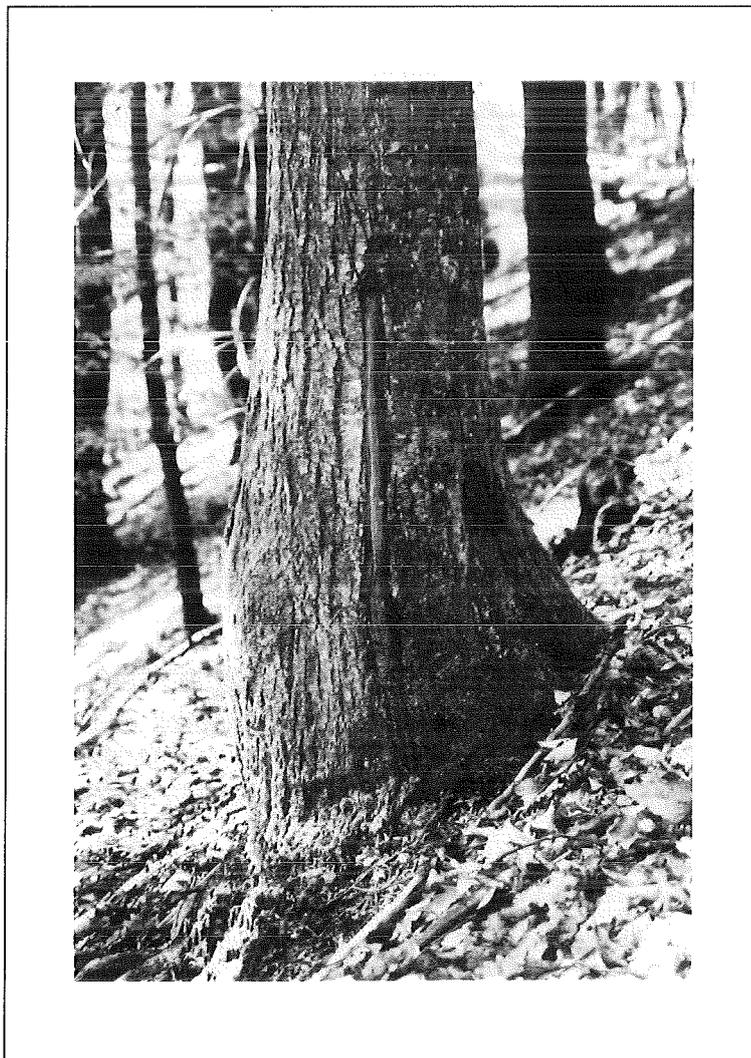


Abbildung 14: Am gekrümmten Stammfuß dieser Eiche erfolgte zunächst ein Riß, etwa entlang der neutralen Faser der Biegung. Dem folgte ein Bananenriß, der sich hinter der Wulst auf der Stammunterseite verbirgt.

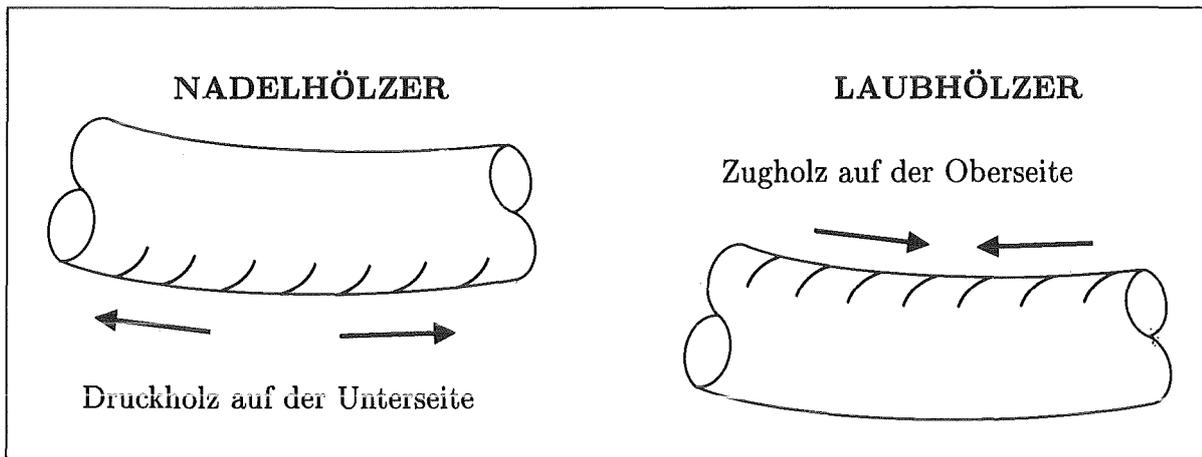


Abbildung 15: Druckholz „drückt“ den Ast nach oben, Zugholz „zieht“ ihn (nach Archer).

### 4.3 Der Einfluß nachlassender Zugholzwirkung

Ein weiteres Phänomen verlangt eine besondere Betrachtung des Zugholzes. Dieses allein von Laubbäumen gebildete Sondergewebe wird mit dem analogen Druckholz der Nadelbäume unter dem Sammelbegriff Reaktionsholz genannt. Die Aufgabe des Reaktionsholzes ist es, wie der Name schon sagt, auf bestimmte Reize zu reagieren. Ziel ist es dabei immer, für einen Ast oder gar den ganzen Stamm eine Änderung der Wuchsrichtung zu bewirken. Die Reize, die eine solche Umorientierung auslösen, sind bekannt und in [54] anschaulich erklärt:

- **Apicaldominanz:** Schon alleine um mit möglichst geringem Materialaufwand an möglichst viel Licht zu gelangen, ist es wichtig, daß Äste möglichst vom Stamm wegweisen. Dies wird durch eine Auxinausschüttung des dominierenden Wipfels erreicht, der so seinen Nebenästen Abstand gebietet. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Epinastie.
- **Phototropismus:** Die einzelnen Wipfeltriebe wachsen stets in Richtung des Lichtes. „Von ihrem Lichthunger getrieben“ - wie Mattheck es bezeichnet - lassen sich Äste auf manches mechanisch gewagte Abenteuer ein. Als Beispiel seien die mitunter extrem langen Starkäste in den unteren Bereichen freistehender Solitäräume genannt.
- **Negativer Geotropismus:** Er treibt den Baum dazu, seinen Kronenschwerpunkt möglichst über dem Stammfuß zu halten, was mechanisch absolut sinnvoll ist. Dies geschieht durch Wachstum entgegen der Schwerkraft, die offenbar für die Reizauslösung verantwortlich ist.

Die Kombination aus diesen drei und anderen, weniger bedeutenden Wachstumsregulatoren verlangt von jedem einzelnen Ast eine ständige Richtungskorrektur [85, 87]. Bei den Nadelbäumen ermöglicht dies das auf der Schaftunterseite angelagerte Druckholz, das entsprechend seinem Namen durch Ausdehnung in Längsrichtung den Ast nach oben drücken kann. Bei den Laubbäumen bewirkt das auf der Astoberseite angelagerte Zugholz durch Längsverkürzung entsprechend eine Anhebung (Abbildung 15). Die Neuorientierung

erfolgt also meist nach oben, weswegen für die Reaktionsholzbildung der negative Geotropismus als wichtigste Triebkraft anerkannt ist [85]. Welche Beziehung besteht nun speziell zwischen dem Zugholz und den Bananenrissen? Eine ausreichende Versorgung des Baumes mit Wasser spielt eine ausschlaggebende Rolle für den Funktionserhalt des Zugholzes. Den Zusammenhang werden wir später noch klären. Tatsache ist, daß eine ungenügende Wasserversorgung, etwa nach einer langen Trockenperiode zu einem Nachlassen der Zugwirkung des Reaktionsholzes führen kann. Die Folge ist ein Absenken des Astes mit einer damit verbundenen Erhöhung des Längsdruckes auf der Astunterseite. Clarke geht davon aus, daß intaktes Zugholz derart stark zieht, daß die Unterseiten der Äste ebenfalls unter Längszug geraten [19]. In diesem Falle würde das Erschlaffen des Zugholzes sogar einen Wechsel von Zug- in Druckbelastung auf der gegenüberliegenden Astunterseite bedeuten. Nun ist zu klären, welche Auswirkungen zu hoher Längsdruck auf den Faserverbund hat. In diesem Zusammenhang kommt den Holzstrahlen eine besondere Bedeutung zu. Die Längsfasern werden in der idealen Form einer Spindel um die Holzstrahlen herumgelenkt. Dies geschieht schubspannungsfrei, da sich Faserverlauf und Kraftflußrichtung decken. Allerdings birgt die dadurch lokal gebogene Form der Längsfasern das Risiko eines seitlichen Ausknickens in tangentialer Richtung in sich. Man spricht hier vom sogenannten Speicheneffekt [57]. Dazu stelle man sich eine bereits vorgebogene Fahrradspeiche vor, die man mit Längsdruck beaufschlagt. Das Ergebnis ist ein weiteres Aufbiegen bis hin zum Ausknicken, stets in Richtung der konvexen Speichenseite. Mattheck & Kübler beschreiben diesen, in Abbildung 16 dargestellten Sachverhalt für den Holzstrahl [61]. Aus dieser Erkenntnis erklärt sich auch, warum man Bananenrisse stets auf der konvexen Unterseite und nicht auch auf der konkaven Oberseite gekrümmter Äste findet, obwohl doch die Tangentialzugspannungen auf beiden Seiten bei Biegebelastung etwa gleich groß sind. Auf der mit Längsdruck belasteten Unterseite kommt der Speicheneffekt hinzu, der hier zu dem Schadensbild des Bananenrisses führen kann. Das Nachlassen der „Seilwinde“ des Zugholzes in trockenen Perioden und die daraus resultierende Längsdruckerhöhung auf der Astunterseite können zu scheinbar plötzlichem Bruchversagen führen. Man spricht in diesem Zusammen auch von Hitzeastbruch, der in einem Fall für einen Radfahrer sogar tödlich endete [58]. Ein allgemeinerer Ausdruck für diesen Schadensfall ist **Absenkungsriß**. In diesem Zusammenhang ist für Institutionen, die für die Verkehrssicherheit von Bäumen in Parks und Alleen zuständig sind, die Frage von äußerster Wichtigkeit, ob man solche Astabsenkungen nicht vielleicht doch vor dem Auftreten des Risses oder des Astbruches erkennen kann. Dies ist in der Tat möglich, wenn man sich an der Rinde der Bäume orientiert. Mattheck hat hier den Begriff der Rinde als „Reißlack der Bäume“ geprägt [57]. In der Materialforschung ist es durchaus üblich, durch das Belasten von mit Lack bestrichenen Proben Spannungsspitzen aufzuzeigen. An Stellen großer Deformationen im Bauteil springt der Lack an der Oberfläche ab. Dieses Prinzip kann man auch auf die Bäume übertragen: Wird die Rinde in Längsrichtung auseinandergerissen und blättert vom Stamm ab, so herrschen offensichtlich Zugspannungen. Die weniger elastische Rinde kann mit der Dehnung der Holzfasern nicht mithalten. Sie reißt und platzt ab. Wird die Rinde in Längsrichtung gestaucht und schiebt sich ineinander, so wirken Druckspannungen. Im Falle der Astabsenkung beobachtet man das Rindenabplatzen entsprechend auf der (Zug-) Oberseite, das Rindenstauchen auf der (Druck-) Unterseite (Abbildung 17). Das Abplatzen der Rinde ist allerdings nicht immer als besorgniserregendes Anzeichen mit baldigem Versagen des Astes zu werten. Abbildung 17 zeigt den Ast einer Roßkastanie, bei dem die Rinde auf der Unterseite abspringt. Hier ist genau das Gegenteil einer

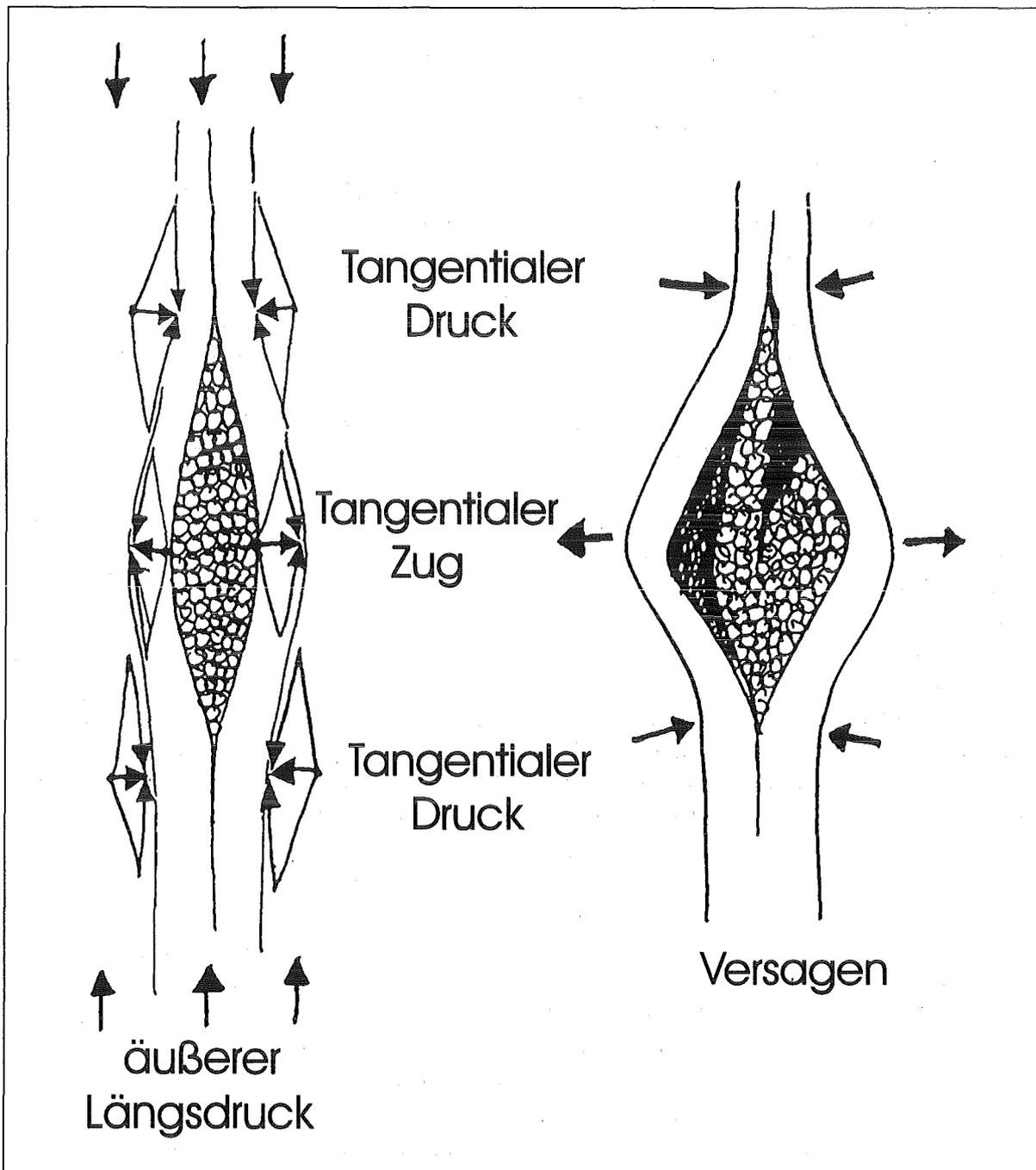


Abbildung 16: Wie eine gebogene Speiche biegt sich die Holzmatrix im Bereich eines Holzstrahles auf. Die Folge ist ein Erwecken des „schlafenden Risses“, den der Holzstrahl darstellt (nach Mattheck & Kübler [61]).

Astabsenkung der Fall: Der Baum muß hier ausgehend von negativ-geotropem Reiz mit Hilfe von Reaktionsholzanlagerung auf der Astoberseite enorme Zugkräfte entwickelt haben, die auf der Astunterseite ein deutliches Gegengewicht zu den vom Asteigengewicht herrührenden Längsdruckspannungen darstellen, ja diese sogar überwiegen. Das Ergebnis sind Längszugspannungen auf der Astunterseite, die zu einem Abblättern der Rinde führen [19]. In dem gezeigten Fall erlitt der Ast aufgrund seiner exponierten Lage allerdings einen Sonnenbrand, der dann Pilzbefall und das Absterben des Kambiums zur Folge hat [43]. Zusammenfassend kann man also sagen, daß belastungsseitig folgende Einflüsse bei der Bananenrißbildung eine Rolle spielen:

- Das Vorliegen einer Astkrümmung entgegen der Biegeungsrichtung ist Bedingung.
- Faulhöhlen erhöhen das Bananenrißrisiko um ein Vielfaches.
- Auch innere Defekte oder Risse, wie sie etwa im Falle des Unglücksbalkens vorliegen, können zu Bananenrissen als Sekundärrissen führen. Man spricht in diesem Zusammenhang von T-Rissen.
- Die notwendige Umlenkung der Längsfasern um die Holzstrahlen erhöht das Risiko seitlichen Ausknickens gemäß dem Speicheneffekt.
- Lange Trockenperioden bewirken ein Nachlassen der Zugholzwirkung und belasten Baumunterseiten mit zusätzlichem Druck, der in Kombination mit dem Speicheneffekt dann zu Absenkungsrissen führen kann.
- Ein langsames Absenken von Ästen infolge nachlassender Vitalität kann man durch sorgfältiges Studium der Rinde bereits frühzeitig erkennen.



Abbildung 17: Die Rinde als „Reißlack der Bäume“. Oben: Stauchung bei Druck am Beispiel eines Platanenastes. Unten: Abplatzende Rinde auf der Unterseite eines Kastanienastes. Das Zugholz übt hier derart großen Zug aus, daß die Unterseite ebenfalls unter Längszug gerät. Das Abplatzen der Rinde begünstigt allerdings Sonnenbrandbildung bei starker Einstrahlung.

## 5 Tangentiale Querkzugfestigkeit

Nachdem wir nun verschiedene Schadensmechanismen aufgezeigt und die Einflüsse mehrerer Faktoren auf die Belastung in tangentialer Richtung, speziell auf der Unterseite gekrümmter Baumschäfte untersucht haben, gilt es nun - gemäß dem Titel der Arbeit - zu ergründen, welche Widerstände der Baum solchen Belastungen entgegenzusetzen hat. Außerdem ist zu untersuchen, ob der Baum auch hierbei bestimmte Optimierungsstrategien verfolgt, wie es Albrecht für den Fall der radialen Richtung nachweisen konnte [1]. Er zeigte, daß sich z.B. im Bereich von Wurzelanläufen grüner Bäume die radiale Querkzugfestigkeitsverteilung mit der radialen Querspannungsverteilung deckt. Es stellt sich nun die Frage, ob der Baum in tangentialer Richtung in ähnlicher Weise auf Belastungen reagiert, was ein weiterer Mosaikstein in der Beweisführung wäre, daß der Baum eine natürliche „smart structure“ darstellt. Sucht man in der Literatur nach Werten für die Tangentialfestigkeit grüner Hölzer, so erfährt man eine herbe Enttäuschung. Oftmals werden nur Festigkeiten quer zur Faserrichtung angegeben, ohne zwischen radialer und tangentialer Richtung zu unterscheiden, die sich um den Faktor 2 unterscheiden können. Die radiale Zugseilfunktion der Holzstrahlen wird dabei sträflich ignoriert. Da Festigkeitswerte für Holz meist nur in Verbindung mit Holzkonstruktionen interessieren, liefern die meisten Bücher oftmals nur Werte für luftgetrocknetes Holz im „toten“ Zustand [88, 90]. Diese Werte sind für unsere Untersuchungen wenig relevant, da die Holzfestigkeit stark von der Feuchtigkeit abhängt. Findet man doch einmal Bruchwiderstandswerte für grünes Holz [50], so sollte man sich genau informieren, unter welchen Bedingungen diese Werte ermittelt wurden. Vor allem auf die Geometrie der Proben ist zu achten. Bei Pluvinage etwa weisen die Proben vordefinierte Kerben auf, deren Kerbspannungsfaktoren unbedingt zu beachten sind [72]. Speziell für orthotropes Werkstoffverhalten kann man sich hier leicht auf's Glatteis begeben. Es ist eigentlich nicht einzusehen, warum man nicht von vornherein kerbfreie Proben verwendet. Dies ist denn auch ein Kriterium bei der Wahl einer geeigneten Methode zur Querkzugfestigkeitsbestimmung. Ein weiteres Ziel ist es, den Baum dabei so wenig wie möglich zu beschädigen, da die Methode auch bei der Beurteilung zu erhaltender Stadt- und Parkbäume dienen soll, von denen nicht wenige als Naturdenkmäler eingestuft sind. Außerdem muß das Problem der Probenkonditionierung gelöst werden. Dabei geht es darum, bei der Durchführung des Bruchversuches in der Probe möglichst den Feuchtigkeitsgehalt zu erhalten, der im Stamm noch vorlag. Daraus resultiert, daß die Versuchsanordnung möglichst kompakt und handlich sein sollte, damit man sie im Wald, direkt neben dem untersuchten Baum einsetzen kann. Dies erfordert zugleich eine robuste Gestaltung der Prüfeinrichtung, da nicht jeden Tag Sonnenschein herrscht, sondern Regen die Bedingungen erschwert. All diese Voraussetzungen bietet die Kombination aus Zuwachsbohrer und Fractometer.

Der Zuwachsbohrer wird vor allem von Dendrologen benutzt, die damit Jahrringanalysen durchführen. Die Dendrologen können anhand der mit diesem Bohrer gewonnenen Bohrkern nicht nur auf das Alter eines Baumes durch einfaches Abzählen der Jahresringe schließen, sondern aus der Ausprägung der Jahresringe können sie auch Schlußfolgerungen auf klimatische Gegebenheiten in den entsprechenden Jahren ziehen. Der hohle Bohrer mit einem Innendurchmesser von 5 mm an der Schneide wird dabei radial in den Stamm gedreht. Dabei wird ein sogenannter Bohrkern aus dem Stamm herausgeschnitten, der nach Trennung an der Bohrerspitze mit Hilfe einer speziellen Zunge aus dem hinten offenen Bohrer entnommen werden kann. Abbildung 18 zeigt einen zum Teil geöffneten

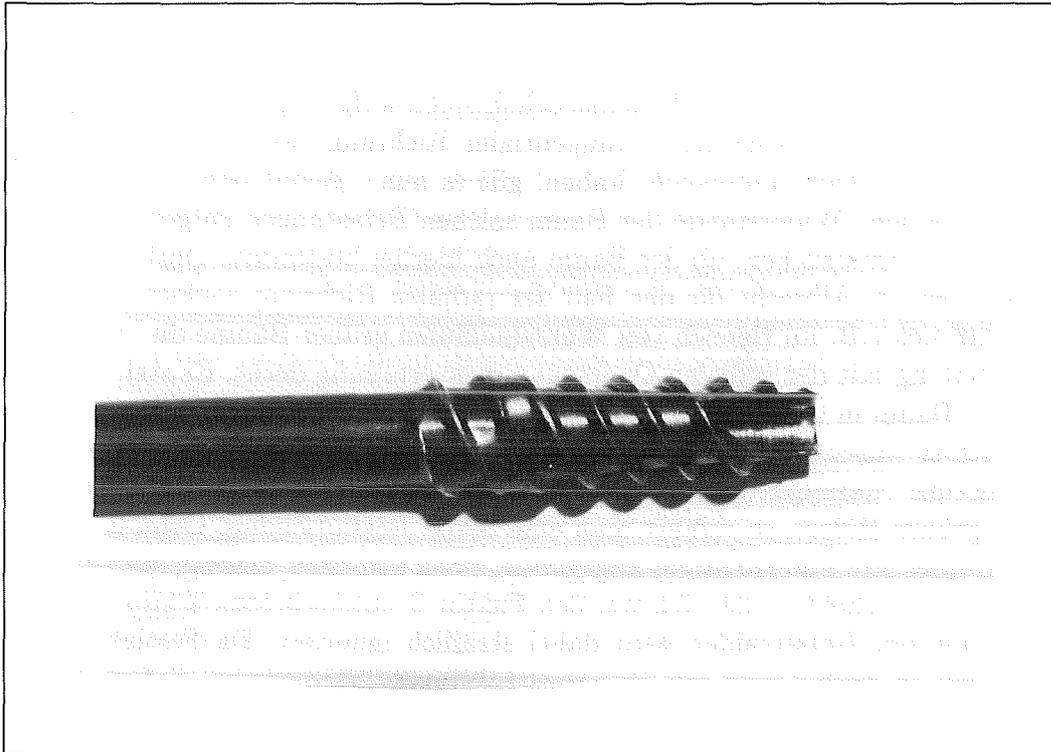


Abbildung 18: Aufbau des Zuwachsbohrerkopfes.

Bohrkopf. Zur Festigkeitsbestimmung wurden solche Bohrkern nach ihrer Entnahme vor Ort mit dem am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Fractometer [8, 59] gebrochen. Verwendet wurden dafür alle drei Mitglieder der Fractometerfamilie, die Versionen I, II und III.

## 5.1 Die Fractometerfamilie

Mit dem Fractometer wurde ein feldtaugliches Gerät entwickelt, mit dem man schnell und zuverlässig auf die Festigkeit eines Baumes schließen kann. Nach mehreren Prototypen stand mit dem Fractometer I ein solches Gerät zur Verfügung, das seit seiner Vermarktung zu einem in der Baumpflege anerkannten Hilfsmittel geworden ist. Abbildung 19 zeigt Aufbau und Wirkungsweise des Gerätes. Gemessen werden Bruchwiderstand gegen Biegung und Biegewinkel. Aus diesen beiden Größen lassen sich beispielsweise auch Rückschlüsse auf den Holzabbau durch bestimmte Pilze ziehen. So bedeutet ein hoher Biegewinkel den Abbau des versteifenden Zellklebstoffes Lignin. Einbußen in der Biegefestigkeit lassen auf Cellulose angreifende Pilze schließen. Ausführlich setzte sich Schwarze in seiner Dissertation mit der Auswirkung verschiedener Pilze auf die Festigkeit der Hölzer auseinander [82]. Die Kraft zum Probenbruch wird über eine durch Drehung des unteren Gerätetellers zu spannende Spiralfeder aufgebaut.

Ein weiteres Mitglied der Familie stellt das Fractometer II dar, mit dem neben der Biegefestigkeit des Bohrkernes zugleich auch die Druckfestigkeit senkrecht zur Bohrkernachse meßbar ist (Abb. 20). Das dritte und bisher letzte Glied der Familie bildet das Fractometer III (Abb. 21). Wie schon die beiden anderen Geräte entstand es in Zusammenarbeit mit der IML Instrumenta, Wiesloch. Das Gerät bietet folgende sechs Optionen:



Abbildung 19: Fractometer I zur Ermittlung der Querfestigkeit und der Steifigkeit von Hölzern anhand von Bohrkernen.

- Scherfestigkeit in tangential-longitudinaler und radial-longitudinaler Ebene
- Querfestigkeit radial und tangential
- Druckfestigkeit longitudinal und tangential

All diese Werte kann ein einziger, radial entnommener Bohrkern liefern. Für die vorliegende Arbeit ist allerdings nur die tangentiale Querfestigkeit von Interesse. Die Bestimmung der Tangentialfestigkeit erfolgt anhand von 2 mm dicken Scheiben des Radialbohrkernes. So ermöglicht das Fractometer III eine hohe lokale Auflösung der tangentialen Festigkeitsverteilung in radialer Stammrichtung.

Generell läßt sich sagen, daß die Verwendung der Fractometer gegenüber den bisher üblichen Untersuchungen in großen Zugprüfmaschinen im Labor folgende Vorteile bietet:

- Die Methode bietet die Möglichkeit der Messung vor Ort.
- Die Proben besitzen keine Kerben und sind damit auch kerbspannungsfrei.
- Die Methode ist zerstörungsarm; der Baum bleibt nahezu unbeschadet.
- Probleme mit der Konditionierung der Proben ergeben sich nicht.
- Eine Aussage über die Art des Pilzbefalles ist möglich.
- Die Anschaffungskosten sind im Vergleich zu teuren Laborzugprüfmaschinen äußerst gering.

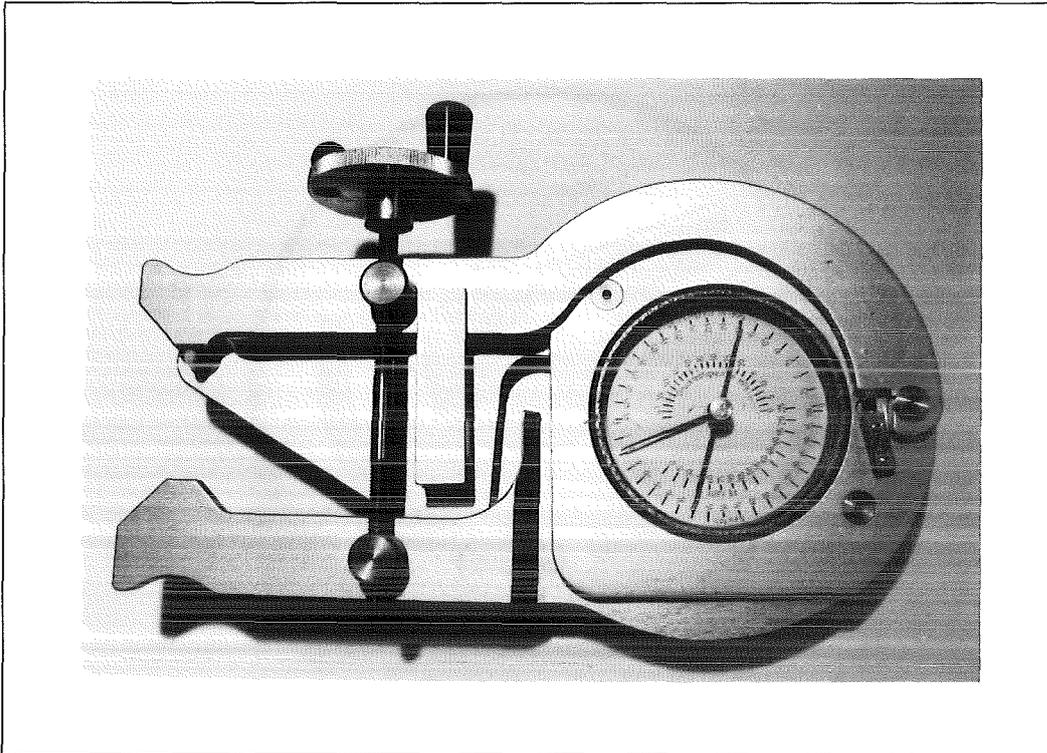


Abbildung 20: Fractometer II, mit dem neben der Querkraft auch die Druckfestigkeit anhand von Bohrkernen ermittelt werden kann.

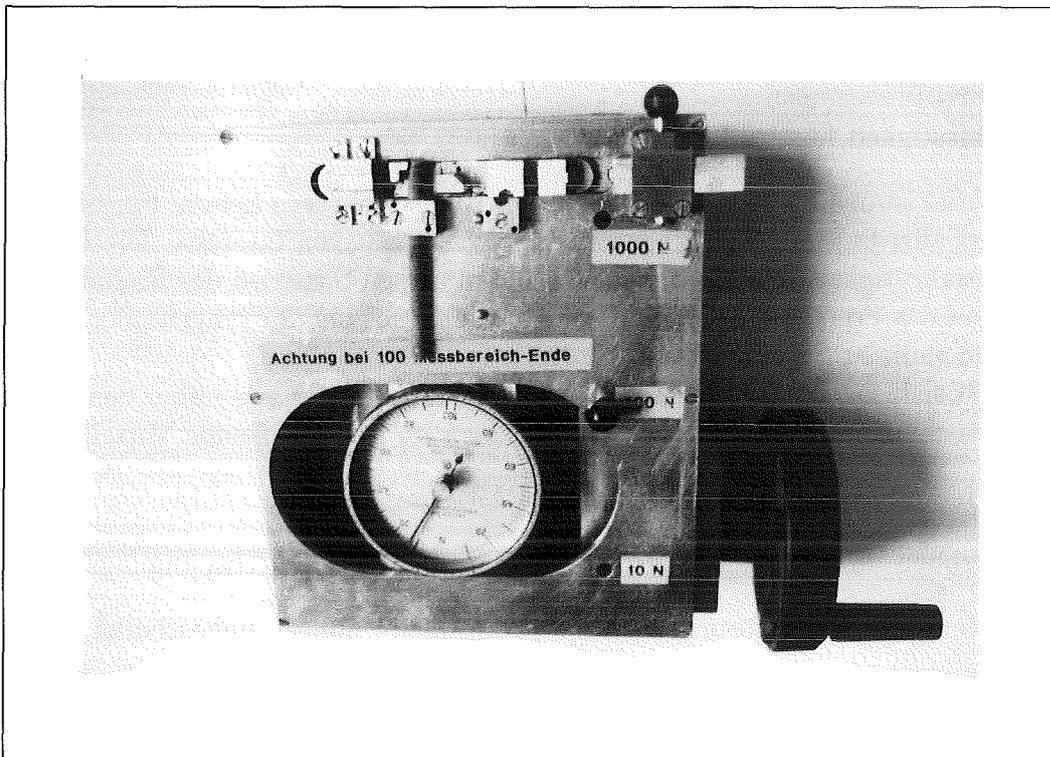


Abbildung 21: Das Fractometer III bietet die Möglichkeit, anhand eines einzigen Bohrkerns sechs verschiedene Bruchwiderstände zu ermitteln.

Zur Bestimmung der radialen Querfestigkeit entnimmt man Bohrkerne radial, d.h. man bohrt direkt in Richtung des Markes. Um nun die tangentiale Querfestigkeit mit dem Fractometer I oder II zu ermitteln, bohrt man entsprechend tangential. Abb. 22 zeigt die Lage eines derart entnommenen Bohrkerne im Stamm. Ermittelt man nun die Querfe-

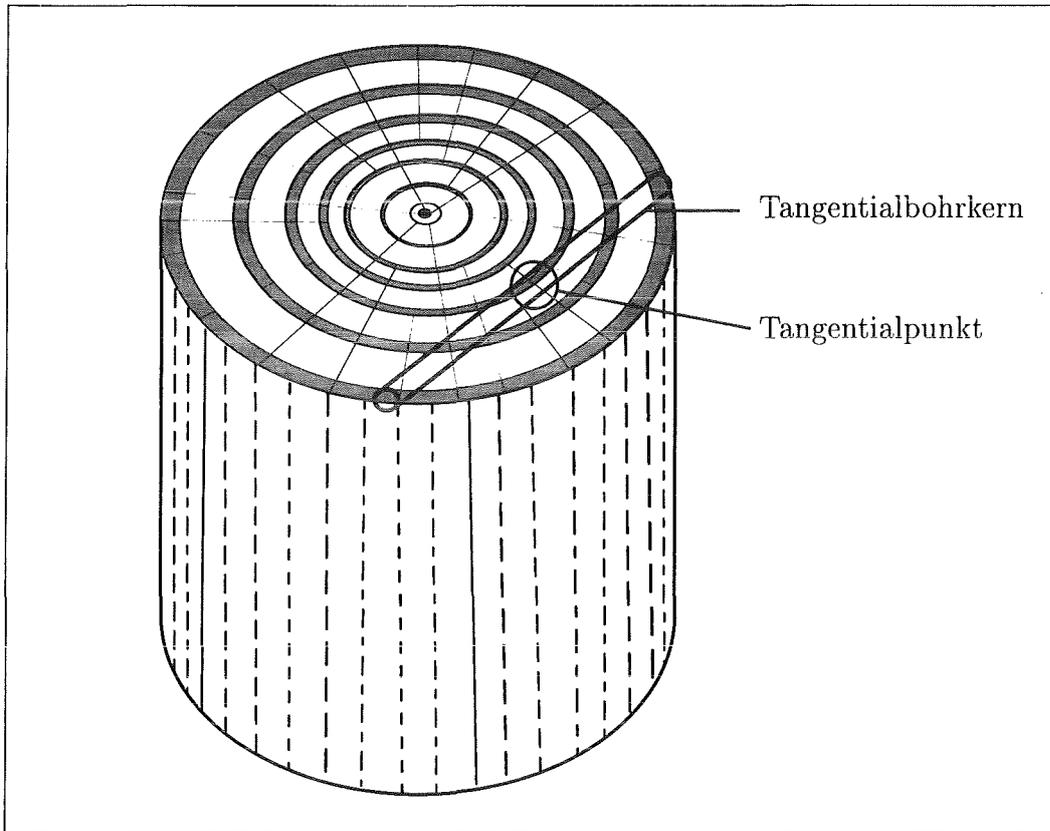


Abbildung 22: Lage des Bohrkerne zur Messung der Tangentialfestigkeit.

stigkeitsverteilung über die volle Länge eines solchen Bohrkerne, ergibt sich fast immer der in Abbildung 23 gezeigte Verlauf. Ziemlich genau in der Bohrkernmitte liegt stets das absolute Minimum. Zu den beiden Bohrkernenden hin steigt die Festigkeit an. Es kommt oft vor, daß der Bohrkern bereits vor der Entnahme aus dem Bohrer bricht. Der Bruch tritt dabei fast immer im Bereich des an anderen Bohrkernen ermittelten Festigkeitsminimums auf. Betrachtet man sich nun einen solchen tangential gezogenen Bohrkern, so erkennt man die Holzstrahlen, die an den beiden Bohrkernenden einen spitzen Winkel  $\psi$  zur Kernachse bilden, der zur Kernmitte hin zu einem rechten Winkel anwächst, d.h. hier liegen die Holzstrahlen genau senkrecht zur Kernachse, und genau an diesem Punkt, den wir von nun an als Tangentialpunkt bezeichnen wollen, liegt auch das Festigkeitsminimum, welches der eigentlichen Tangentialfestigkeit entspricht. Da bei dem Biegeversuch mit dem Fractometer letztendlich der Bruchwiderstand in Längsrichtung des Bohrkerne ermittelt wird, scheint es eine entscheidende Rolle zu spielen, welchen vektoriellen Anteil die Holzstrahlen in dieser Richtung zur Festigkeit beisteuern. Dies leuchtet ein, wenn man die Holzstrahlen als Zugseile interpretiert [56]. Nimmt man an, daß Holzstrahlen in ihrer Längsrichtung einen Elastizitätsmodul von der gleichen Größenordnung der Längsfasern haben, so wären diese Zugseile in radialer Stammrichtung etwa um den Faktor 20 steifer als der sie umgebende Faserverbund. Dies bedeutet bei radialer Zugbelastung, daß die

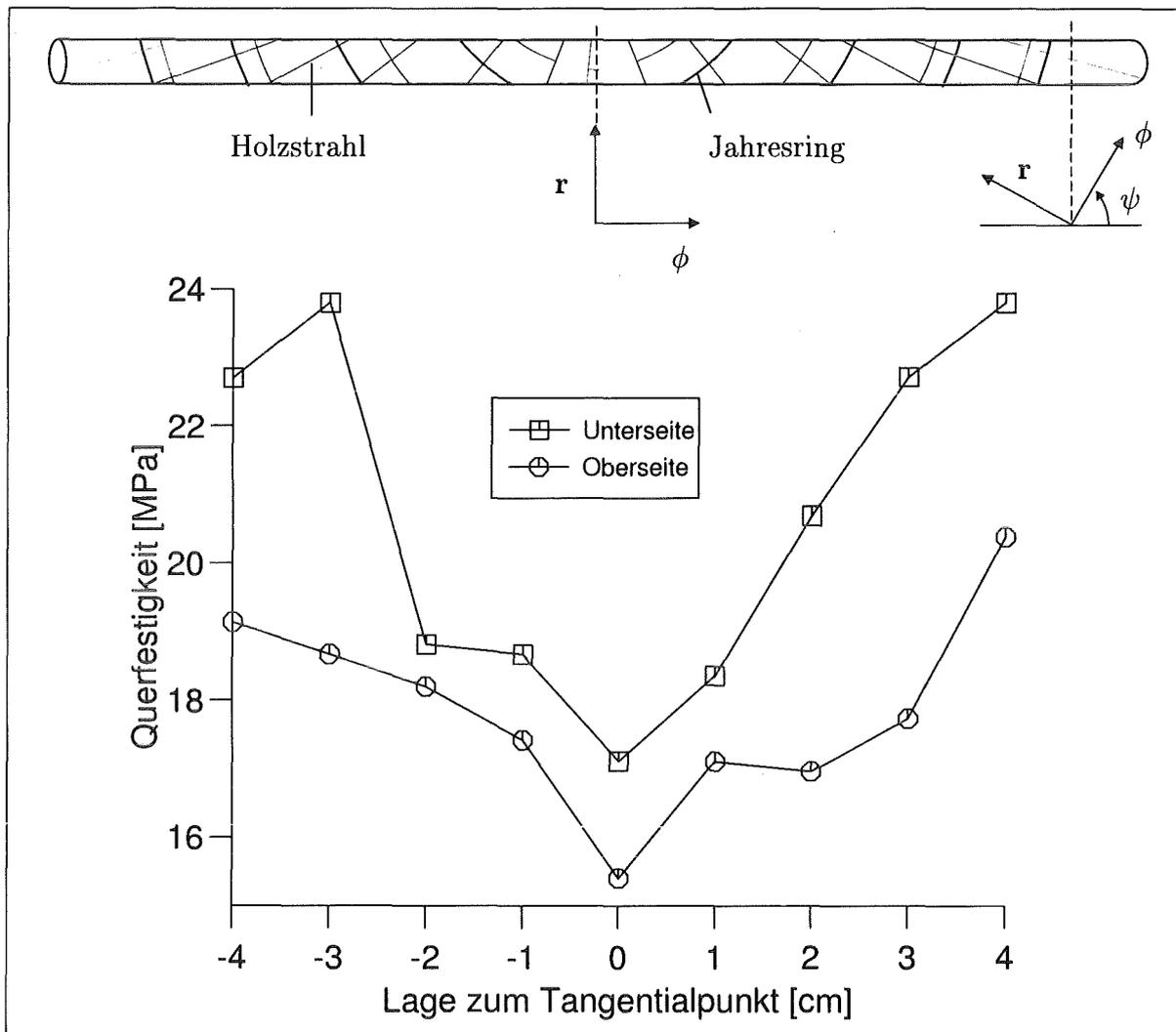


Abbildung 23: Ermittelte Querfestigkeit entlang eines tangential entnommenen Bohrkernes.

Holzstrahlen aufgrund ihres höheren Elastizitätsmodules den Kraftfluß förmlich auf sich ziehen, während an dem Tangentialpunkt unseres obigen Bohrkernes die Holzstrahlen keinen positiven Beitrag zur Festigkeit beisteuern können. Schon Kollmann erkannte 1956 bei seiner Untersuchung der Quersugfestigkeit der Hölzer, daß die Festigkeit in radialer Richtung höher ist [45]. Er ermittelte für luftgetrocknetes Holz (12% Feuchtigkeit) eine etwa doppelt so hohe Zugfestigkeit in radialer gegenüber der tangentialen Richtung. Myer fand heraus, daß ein hoher Anteil der Holzstrahlen an der Gesamtmasse des Holzes mit höheren Werten für Härte, Biegefestigkeit und Druckfestigkeit längs der Faserrichtung einhergeht [67]. Taylor gab an, daß Holzstrahlen auch das spezifische Gewicht des Holzes erhöhen, was manchmal etwas leichtfertig mit höheren Festigkeitswerten gleichgesetzt wird [84]. Delorme & Verhoff sprachen den Holzstrahlen eine stabilisierende Wirkung gegen das Ausknicken der Längsfasern in radialer Richtung bei Längsdruck zu [22]. Das Fehlen derartiger Zugseile in tangentialer Richtung ist der Grund, warum der Baum seine Festigkeit tangential nicht derart variieren kann wie in radialer Richtung. So werden für die Standardabweichung stets niedrigere Werte für die tangentiale Festigkeit ermittelt. Carlquist

wies darauf hin, daß die Holzstrahlen ein beachtliches Festigkeitspotential darstellen, da ihre Zellwände äußerst dick und stark lignifiziert sind [16]. Bei der Betrachtung von Holzfestigkeiten müsse man dies unbedingt berücksichtigen. Keller & Thiercelin betrachten die Holzstrahlen ebenfalls als festigkeitssteigernde Elemente in radialer Richtung, wiesen aber zugleich darauf hin, daß sie ebenso in tangentialer Richtung als Schwachstelle anzusehen sind [42]. Auch Schniewind sprach bereits von Holzstrahlen als Ursache für geringere Festigkeitswerte in tangentialer Richtung [81]. Zuletzt berichtete Albrecht darüber, daß der Baum gar in der Lage ist, die radiale Querfestigkeit zu optimieren [2]. Doch zurück zu der Messung der Tangentialfestigkeit. Man kann diese an einem tangential entnommenen Bohrkern nur an einem Punkt, dem bereits erwähnten Tangentialpunkt messen. Hier berührt die Bohrkernachse die Jahresringe, und hier können die Holzstrahlen keinen positiven Einfluß auf die Festigkeit mehr ausüben. Hier werden die Fasern einzig und allein von dem Holzklebstoff Lignin zusammengehalten, dessen Festigkeit niedriger ist als die der Holzfaser in Längsrichtung, bestimmt durch die Celluloseseile. Es spielt keine Rolle, wie dick diese Kleberschicht, die Mittellamelle, ist. Diese Erfahrung hat jeder schon als Kind gemacht, als er vergeblich versucht hat, mit Unmengen von Klebstoff die abgebrochene Tragfläche an dem Modellflugzeug oder den Arm wieder an der Puppenschulter zu befestigen. So findet man auch keine signifikanten Unterschiede in den tangentialen Festigkeitswerten für die verschiedenen Baumarten. Eine Untersuchung von drei ringporigen (Edelkastanie, Eiche, Esche), fünf diffusporigen (Ahorn, Birke, Buche, Pappel, Platane) Laubhölzern und von Douglasie als Vertreter der Nadelbäume zeigte für all diese Spezien eine mittlere Tangentialfestigkeit von ca. 9.0 MPa, ermittelt an ungekrümmten Stämmen:

Baumart	mittl. Tangentialfestigkeit $\bar{R}_\phi$ [MPa]	Standardabweichung S [MPa]
Edelkastanie	9.6	1.5
Eiche	9.5	2.3
Esche	10.7	1.7
Ringporige	9.9	1.8
Ahorn	9.4	1.2
Birke	9.0	1.3
Buche	9.1	1.4
Pappel	5.7	0.7
Platane	9.0	1.5
Douglasie	8.2	3.1
Diffusporige	7.8	1.7
<b>Insgesamt</b>	<b>9.0</b>	<b>1.5</b>

Es liegen jedem Mittelwert ca. 60 Werte von je zwei geraden Bäumen pro Spezie zugrunde. Die Werte wurden mit dem Fractometer III (Scheibenprobe) ermittelt. Nur für Pappel ist die mittlere Tangentialfestigkeit deutlich niedriger als bei den anderen untersuchten Baumarten. Grund dafür sind die enormen jährlichen Dickenzuwächse der Pappel während der Wachstumsperiode in Frühjahr und Sommer. Der Spätholzanteil ist sehr klein, so daß viele Proben ausschließlich aus dem dünnwandigeren und schwächeren Frühholz bestehen. Hier erfolgt auch nicht der sonst recht glatte Bruch der Proben, wie dies etwa bei Buche der Fall ist, sondern eher ein zähes Zerfasern. Da die Zellwände im Frühholz sehr dünn

sind, erfolgt der Riß nicht zwischen den Zellen entlang der relativ spröden Mittellamelle, sondern die Zellwände selbst zerreißen, der Riß läuft durch die Zellen hindurch [9]. Bei der konventionellen Methode, dem Brechen eines tangential gezogenen Bohrkernes, liefert die Pappel ebenfalls niedrigere Festigkeitswerte als die anderen untersuchten Baumarten, bei denen die Proben fast immer einen Anteil an festem Spätholz enthalten, welches entlang der fast ausschließlich aus Lignin bestehenden Mittellamelle reißt. Lediglich an einer Douglasie mit sehr breiten Jahresringen konnte der deutliche Tangentialfestigkeitsunterschied zwischen Früh- und Spätholz mit der lokal höher auflösenden Prüfweise an Scheibenproben eines radial gezogenen Bohrkernes gezeigt werden (Abb. 24). Der Zell-

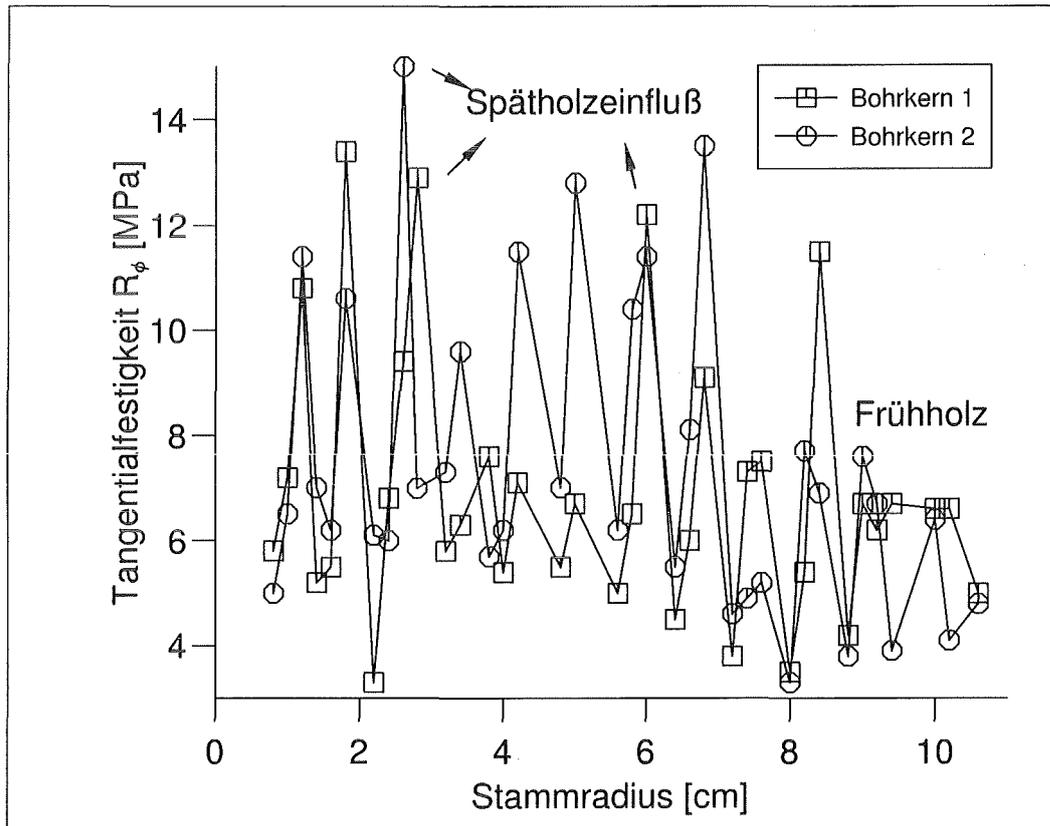


Abbildung 24: Tangentialfestigkeitsverteilung entlang dem radialen Bohrkern einer Douglasie mit sehr dicken Jahresringen. Die geringe Größe der Probenkörper erlaubt eine sehr hohe lokale Auflösung der Verteilung und macht den Festigkeitsunterschied zwischen Spät- und Frühholz deutlich.

klebstoff Lignin ist im Gegensatz zu den Holzstrahlen und Fasern steif, besitzt aber eine niedrigere Festigkeit als diese in ihrer Längsrichtung. Lignin bricht daher vergleichsweise spröde. Messungen mit dem Fractometer I ergaben recht kleine Biegewinkel, während Messungen der Radialfestigkeit relativ hohe Biegewinkel lieferten [41]. Der Bruch erfolgt hier durch das zähe Zerreißen der Holzstrahlen. Beim Bruch eines tangential gezogenen Bohrkernes erfolgt dagegen in der Regel ein spröder Bruch, wobei die Bruchfläche vorzugsweise entlang von Holzstrahlen läuft. Abbildung 25 zeigt eine solche Bruchfläche entlang eines großen Holzstrahles einer Buche. Daß die Holzstrahlen in tangentialer Richtung die Schwachstelle darstellen, wird auch bei der Holztrocknung deutlich. Die Schwindung des Holzes infolge des Feuchtigkeitsverlustes bewirkt Risse, die stets senkrecht zu den

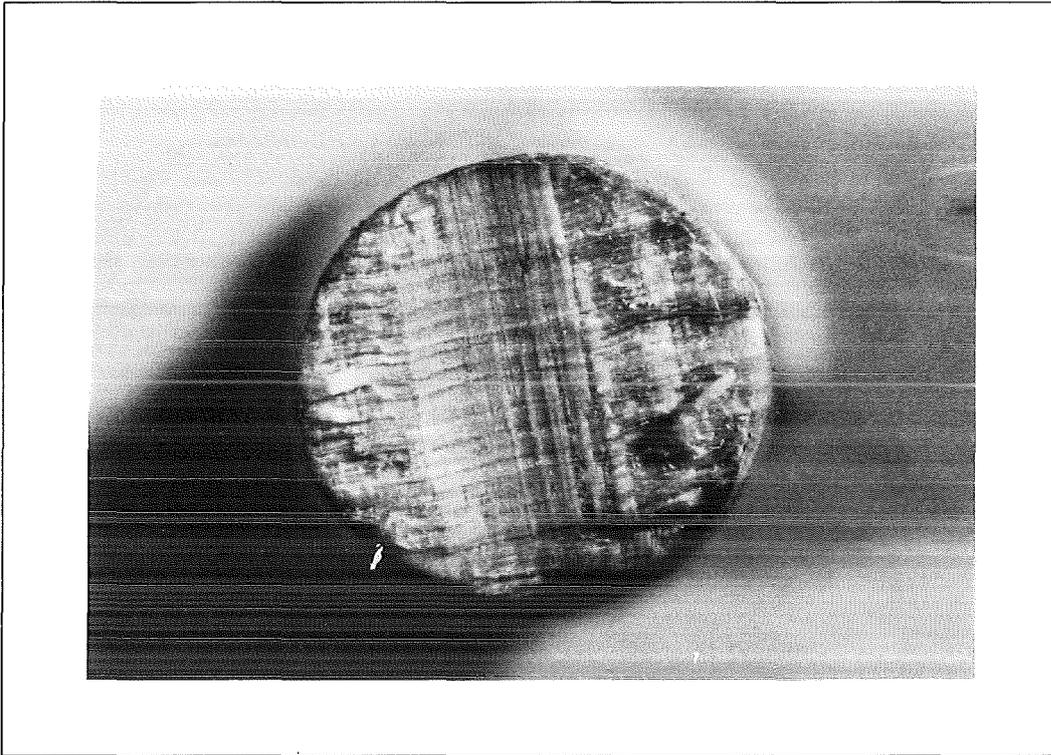


Abbildung 25: Bruchfläche im Tangentialpunkt des Bohrkernes einer Buche. Der Riß verläuft in diesem Fall genau entlang eines Holzstrahles.

Jahresringen bzw. parallel zu den Holzstrahlen verlaufen. Dies wird in besonders beeindruckender Weise verständlich, wenn man die Scheibe eines Baumstammes trocknet, der keine Anordnung einheitlich konzentrischer Jahresringe aufweist, sondern von dieser in bizarrer Weise abweicht, wie am Beispiel des Rotdorns in Abbildung 26. Die Risse senkrecht zu den Jahresringen sind deutlich erkennbar. Die Frage, ob der Baum durch den Einsatz der Holzstrahlen zum Zwecke der radialen Festigkeitserzielung den Schritt vom Regen in die Traufe in Form einer Schwächung der tangentialen Richtung eingeht, erhält aber noch durch einen weiteren Aspekt, den bereits angesprochenen Speicheneffekt, ihre Berechtigung. Bei Längsdruck droht dem auf Schubfreiheit optimierten Lngsfaserverband im Bereich der Holzstrahlen ein Ausknicken in tangentialer Richtung. Die Umlenkung der Fasern im Stamm um einen Ast erfolgt in geometrisch ähnlicher Weise genauso optimal wie um einen Holzstrahl. Steigt man tiefer in die Anatomie des Holzes ein, so findet man die Spindelform auch bei den sogenannten Holztpfeln wieder. Diese Verbindungsöffnungen benachbarter Zellen stellen mechanische Schwachpunkte dar, die ebenfalls optimal zu gestalten sind [9]. Die Spindelachse zeigt dabei stets in Richtung des Kraftflusses (Abb. 27). Schneidet man ein solches Tüpfel auf, so erkennt man, daß selbst die Zellwand im Bereich des Tpfels spindelförmig ausgebildet ist. Die wiederholte Anwendung der Spindelform in allen Dimensionen stellt ein eindrucksvolles Beispiel für die Selbstiteration in der Natur dar. Ganz nebenbei bietet die Spindelform auch die ideale Fasermulenkung um ein Loch in einer zug- oder druckbelasteten Platte aus Faserverbundwerkstoff [47]. Da jedoch nichts im Leben umsonst ist, hat auch die Spindelform der Holzstrahlen ihren Pferdefuß. Wenngleich sie die optimale Umgehung eines Loches oder wie hier eines schiffchenförmigen Holzstrahles darstellt, ist sie trotzdem noch infolge ihrer Abweichung von der Lngsrich-

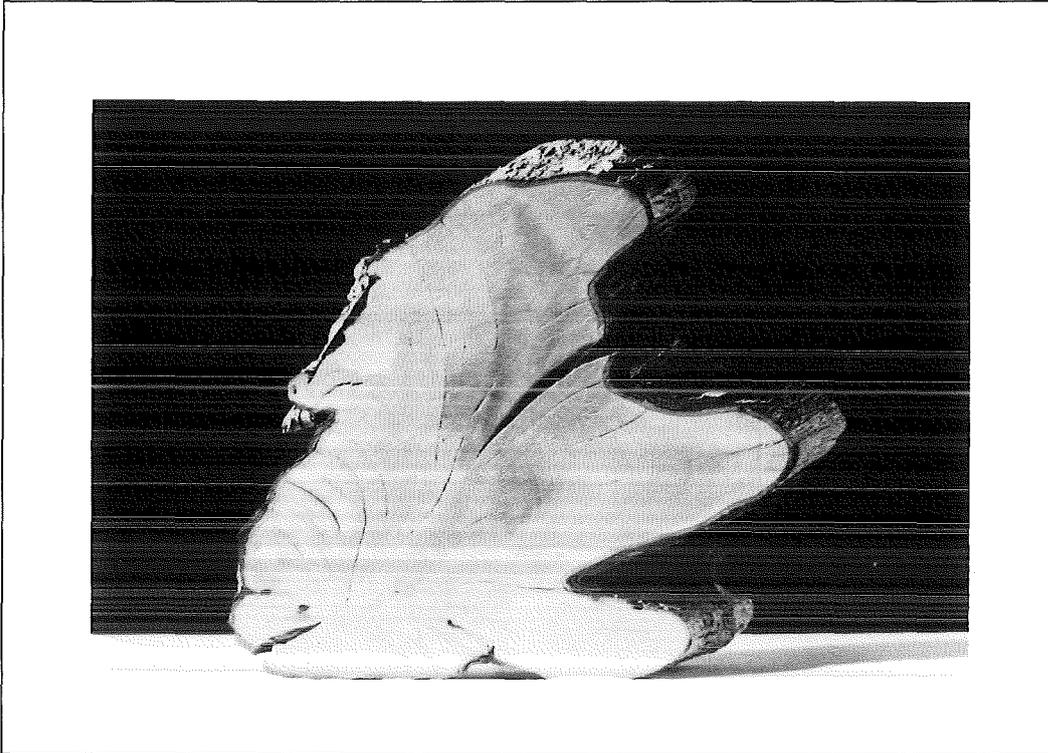


Abbildung 26: Bei der Trocknung einer Baumscheibe erfolgt die Rißbildung stets entlang der tangential schwächsten Ebenen, die entlang der Holzstrahlen, also senkrecht zu den Jahresringen verlaufen.

tung ein bevorzugter Ort für tangenciales Versagen der Fasern bei Längsdruck. In radialer Richtung wird das Ausknicken - wie bereits erwähnt - durch die Holzstrahlen selbst vermieden [22]. Die Längsfasern werden nur durch Lignin an den Holzstrahlen gehalten, insofern nicht weitere Kräfte durch die umgebenden Nachbarfasern aufgebracht werden, worauf wir später noch im Zusammenhang mit Wachstumsspannungen eingehen werden.

## 5.2 Tangentialmessungen mit dem Fractometer

Da das Fractometer III mit der Möglichkeit, anhand eines radial gezogenen Bohrkernes alle 2 mm einen tangentialen Festigkeitswert zu ermitteln, erst gegen Ende der vorliegenden Arbeit zur Verfügung stand, sind die im folgenden vorgestellten Ergebnisse alle an tangential gezogenen Bohrkernen mit dem Fractometer I bzw. II gewonnen worden. Die Tatsache, daß die tangentiale Querfestigkeit an einem entsprechend tangential gezogenen Bohrkern nur dort gemessen werden kann, wo er die Jahresringe berührt, erschwert natürlich die Bestimmung von Festigkeitsverteilungen innerhalb eines Stammes bei der angegebenen Bohrkernentnahme. Es ist hier nicht möglich, Werte im Zentimeterabstand voneinander zu erhalten, wie dies für die radiale Querfestigkeit der Fall ist, weil zwei Bohrungen nebeneinander zu falschen Ergebnissen führen; die Einflußnahme des Bohrers auf die unmittelbare Umgebung des Bohrloches ist nicht zu unterschätzen. Um das Bohrloch herum wird das Holz stark verdichtet. Abgesehen davon würde man schon gehöriges Augenmaß benötigen, um bei zwei Bohrungen den gleichen Jahresring im Tangentialpunkt zu treffen. An einer Buche wurden zur Untersuchung des Verdichtungseinflusses durch

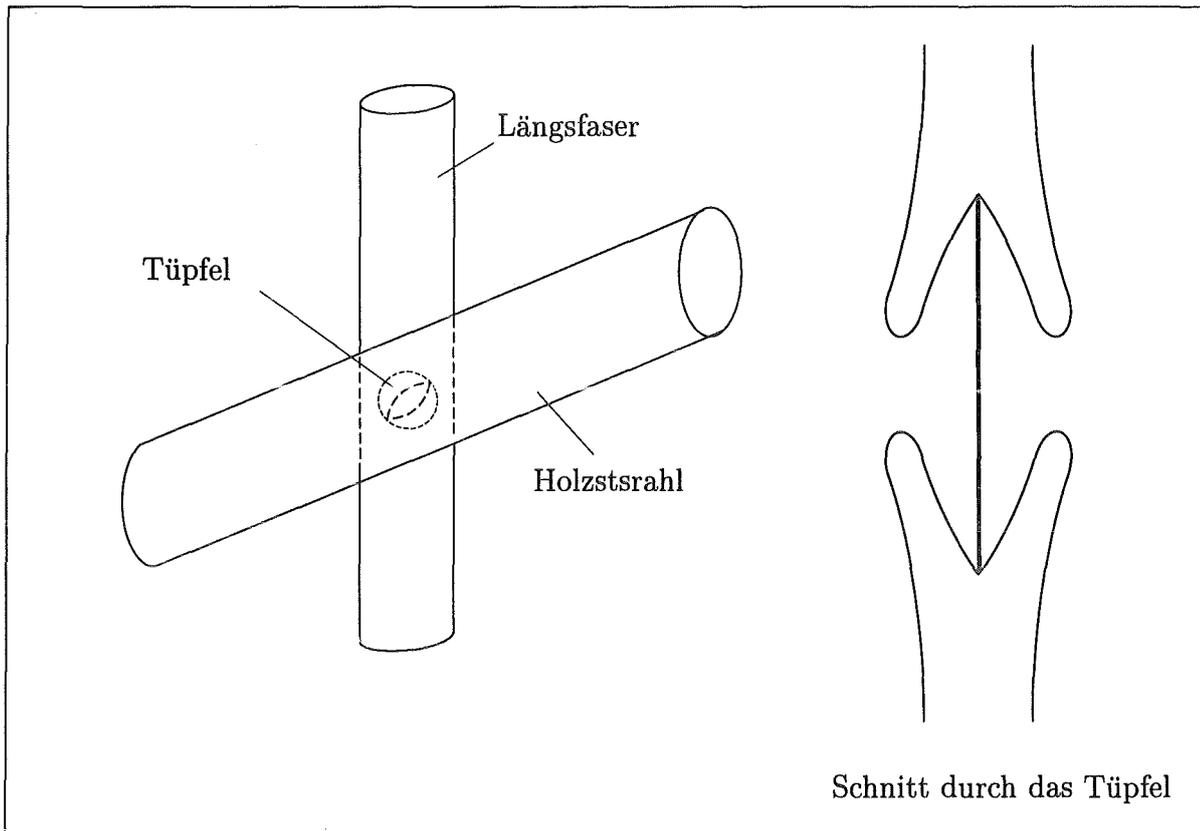


Abbildung 27: Tüpfel, die den Stoffaustausch benachbarter Zellen regulieren, weisen gleich in zwei Ebenen die Spindelform auf.

den Bohrer vier Reißbrettstifte mit dem Kopf auf die von Rinde befreite Xylemoberfläche im Abstand von 5, 7.5 und 10 cm aufgeklebt. Die Stiftspitzen wurden rechtwinklig abgebogen, so daß man klar definierte Meßpunkte erhält. Anschließend wurde zwischen den Reißbrettstiften mit dem Zuwachsbohrer ein Loch gebohrt. An der Stammoberfläche ergab sich eine Verformung des betrachteten Bereiches. In Längsrichtung sind die bleibenden Verformungen größer aufgrund der höheren freigesetzten Wachstumsspannungen. In tangentialer Richtung sind die Wachstumsspannungen kleiner und wirken ihrerseits verdichtend, was einer weiteren Ausdehnung des plastisch verformten Bereiches entgegenwirkt:

Entfernung von Bohr-achse [cm]	2.5	3.75	5.0
longitudinal			
$\epsilon_{l,plast.}$ [%]	2.8	1.5	0.4
	2.9	1.8	0.4
tangential			
$\epsilon_{\phi,plast.}$ [%]	0.8	0.4	0.1
	0.9	0.4	0.2

Man erkennt, daß die Verformung des umliegenden Holzes durch den Bohrer nach etwa 5 cm abklingt. Der Einfluß longitudinal ist stärker, da hier die höheren Wachstumsspannun-

gen vorliegen, die durch den Bohrer praktisch freigeschnitten werden. Die Verformungen bleiben auch nach dem Herausdrehen des Bohrers erhalten.

### 5.2.1 Einfluß der Biegeachse

Bestimmt man die radiale Querfestigkeit mit dem Fractometer, so ist der Bohrkern so in das Prüfgerät einzulegen, daß die Längsfasern auf den Hammer des Hebelarmes zeigen (Abb. 28). Dies ist wichtig, da sich bei dieser Biegerichtung die I-Balkenwirkung der Holzstrahlen erst auswirken kann <sup>2</sup>. Will man die Tangentialfestigkeit bestimmen, stellt sich natürlich die Frage, ob man hier ebenfalls eine bestimmte Orientierung bei der Bohrkernspannung einhalten muß. Dazu wurden Vergleichsmessungen an geraden Buchenstämmen durchgeführt. Es wurden pro Baum je 20 Tangentialfestigkeitsmessungen mit der Biegeachse parallel und senkrecht zu den Längsfasern durchgeführt. Abbildung 28 zeigt, daß die Lage der Biegeachse ohne erkennbaren Einfluß ist. Dies leuchtet auch ein,

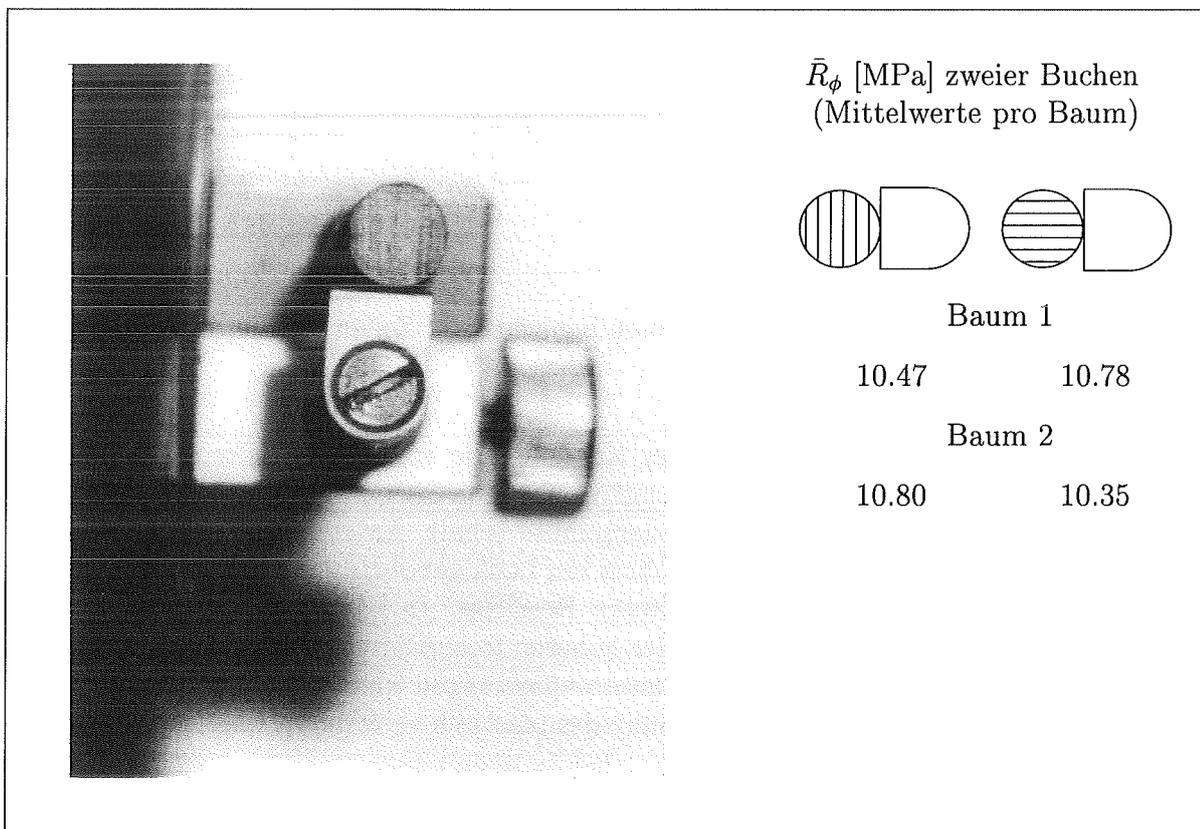


Abbildung 28: Bei der Bestimmung der Radialfestigkeit müssen die Fasern auf den Hammer zeigen. Für die Tangentialfestigkeit spielt dies keine Rolle, da die Holzstrahlen stets senkrecht zur Versagensrichtung stehen.

da die Bruchfläche ja durch die als homogen anzusehende, aus Lignin bestehende Mittel-lamelle verläuft, unabhängig von der Biegeachse. Längsfasern und Holzstrahlen verlaufen entlang der Bruchfläche, müssen also nicht gebrochen werden, unabhängig davon, wie der

<sup>2</sup>Die Holzstrahlen weisen an den Spitzen des schiffchenförmigen Querschnittes mehr versteifendes Lignin auf als in der Mitte, wie von Schwarze für Esche herausgefunden wurde. Überträgt man dies auf ein homogenes Material, ergibt sich die Geometrie eines I-Balkens [8].

Bohrkern gebogen wird. Es war daher schon allein aus holzanatomischen Gründen zu erwarten, daß die Biegeachse bei Bestimmung der Tangentialfestigkeit keinen Einfluß hat. Auch wenn der Winkel zwischen Fasern und der Biegeachse keine Fehlerquelle darstellt, wurden alle weiteren Messungen in senkrechter Anordnung beider Achsen zueinander vorgenommen.

### 5.2.2 Messungen an Säbelbäumen

Da wir uns speziell mit den Bananenrissen beschäftigen wollen, werden Tangentialmessungen entlang den Ober- und Unterseiten gekrümmter Bäume vorgenommen. Schon die bloße Betrachtung der Biegefestigkeiten entlang dreier Bohrkern, die ober-, unterhalb und durch das Mark entnommen wurden, zeigen neben dem bereits beschriebenen Einfluß der Holzstrahlen ein typisches Bild (Abb. 29). Der durch das Mark genommene Bohrkern

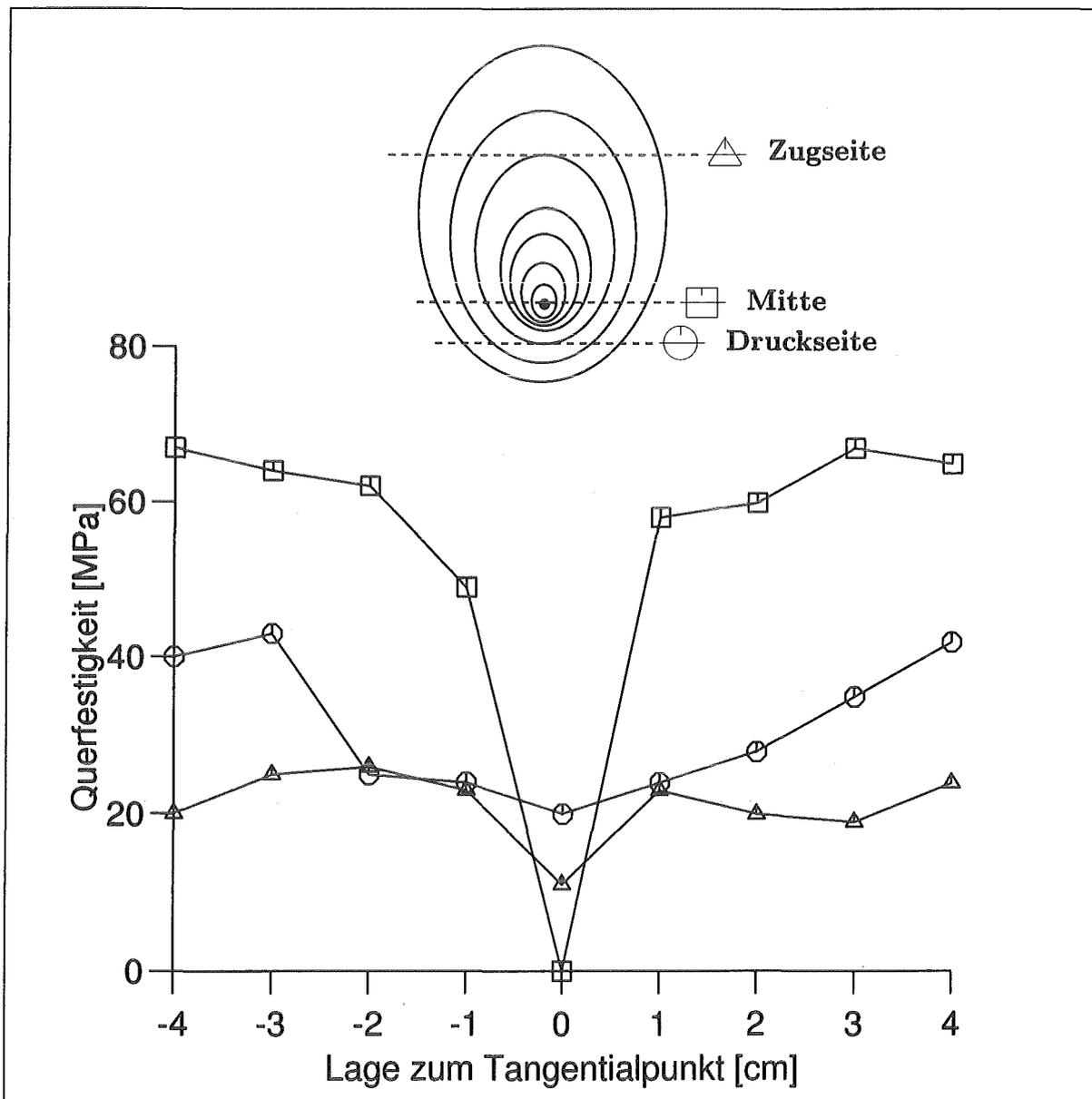


Abbildung 29: Festigkeitsverteilung an drei parallel zueinander verlaufenden Bohrkernen.

liefert aufgrund der Lage der Holzstrahlen parallel zur Kernachse die höchsten Festigkeiten auf einem relativ konstanten Niveau. Hierbei handelt es sich ja auch praktisch um Radialfestigkeitswerte. Im Mark bietet das Holz keinen Widerstand. Dort liegt eine korkähnliche Konsistenz vor. Die beiden anderen Bohrkerne zeigen wieder das typische, bereits vorgestellte Bild mit dem Minimum am Tangentialpunkt. Kennzeichnend ist aber darüber hinaus nun, daß die Festigkeiten des auf der Stammunterseite genommenen Bohrkernes fast durchweg höher liegen. Besonders im eigentlich wichtigen Punkt, dem Tangentialpunkt, liegt der Bruchwiderstand in diesem Fall sogar doppelt so hoch. Ist dies ein Zeichen, daß der Baum das Schadensrisiko, durch Bananenriß zu versagen, kennt und dem gegenzusteuern versucht? Um diese Frage zu klären, entnehmen wir nun tangentiale Bohrkerne auf den Stammober- bzw. -unterseiten weiterer gekrümmter Bäume, die auch ihrer Form wegen als Säbelbäume bezeichnet werden. Die Entnahme der Holzproben erfolgt in einem Abstand von 10 cm entlang der Stammschäfte. Auf beiden Seiten werden etwa 10 Bohrkerne gezogen, die nur jeweils am Tangentialpunkt gebrochen werden (Abb. 30). Tatsächlich zeigt sich, daß die mittlere Tangentialfestigkeit  $\bar{R}_\phi$  auf der bananenrißgefährdeten Stammunterseite durchweg höher ist. Dies konnte für die untersuchten Baumarten Buche, Eiche und Douglasie gezeigt werden:

Baumart	$\bar{R}_{\phi, \text{Druckseite}}$ [MPa]	$\bar{R}_{\phi, \text{Zugseite}}$ [MPa]
Buche	13.3	11.4
Eiche	11.7	9.9
Douglasie	11.1	7.8

Der Untersuchung liegen 20 Buchen, 5 Eichen und 2 Douglasien zugrunde. Betrachtet man nun die Tangentialfestigkeitsverläufe entlang den Krümmungen, so ergibt sich auch hier ein auffälliges, immer wieder gleiches Bild. Im stark gekrümmten, nahe dem Wurzelanlauf gelegenen Stammbereich fallen die Meßwerte entlang der Schaftunterseiten höher aus und fallen mit zunehmend vertikaler Lage der Baum längsachse ab, bis sie am Ende den gleichen Werten zustreben, die auf der Schaftoberseite gemessen werden. Die Abbildungen 31 bis 35 zeigen die Festigkeitsverteilungen weiterer Bäume, die für fast alle untersuchten Säbelbäume repräsentativ sind. Auf den Stammunterseiten fällt der Zusammenhang zwischen lokaler Neigung des Stammes und den dort gemessenen Festigkeitswerten auf. Die lokale Stammneigung war auch beim negativen Geotropismus ein Kriterium zur Anlagerung von Reaktionsholz. Darum wollen wir uns nun der Frage zuwenden, ob es hier einen Zusammenhang gibt. Findet sich etwa in einer unterschiedlichen Zellgestaltung die Möglichkeit für die Säbelbäume, ihre empfindlichen Unterseiten stärker zu bewehren? Betrachten wir dazu die Unterschiede der Zelltypen von „normalem“ Holz und Reaktionsholz unter dem Aspekt der Festigkeit.

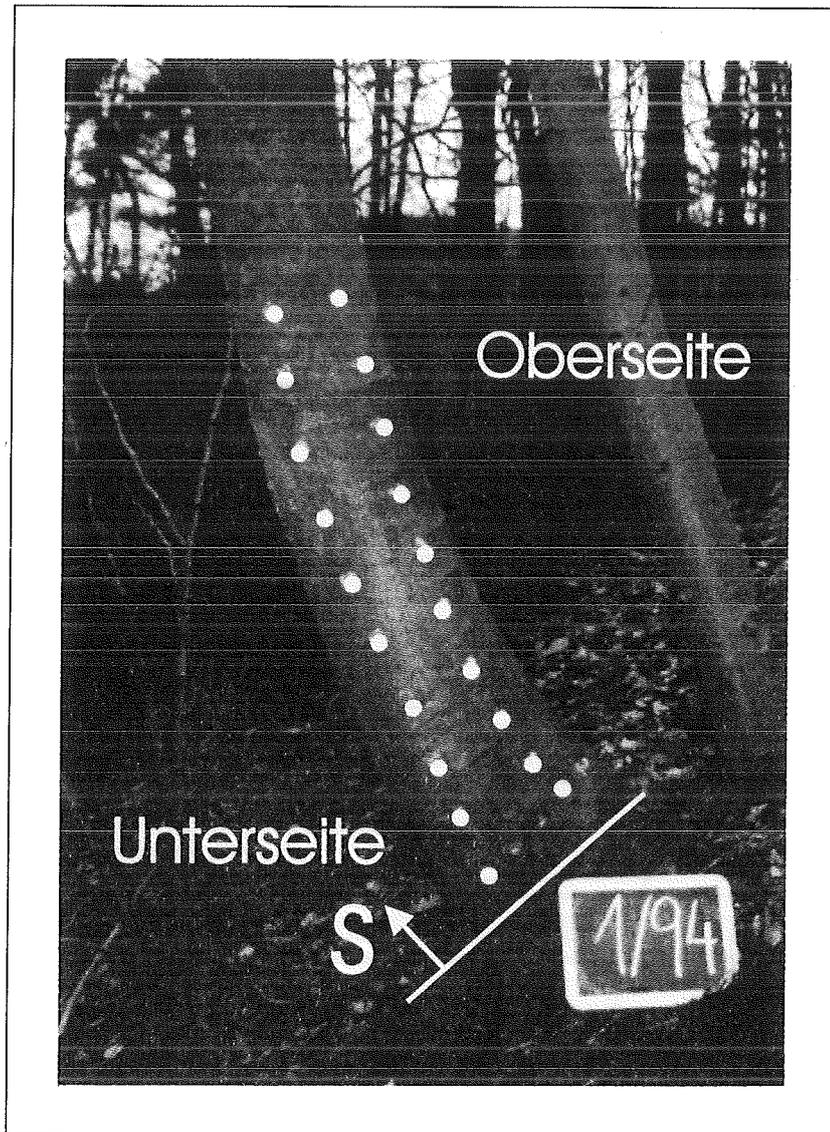


Abbildung 30: Entnahmestellen der tangentialen Bohrkerne entlang der Ober- und Unterseite eines Säbelbaumes.

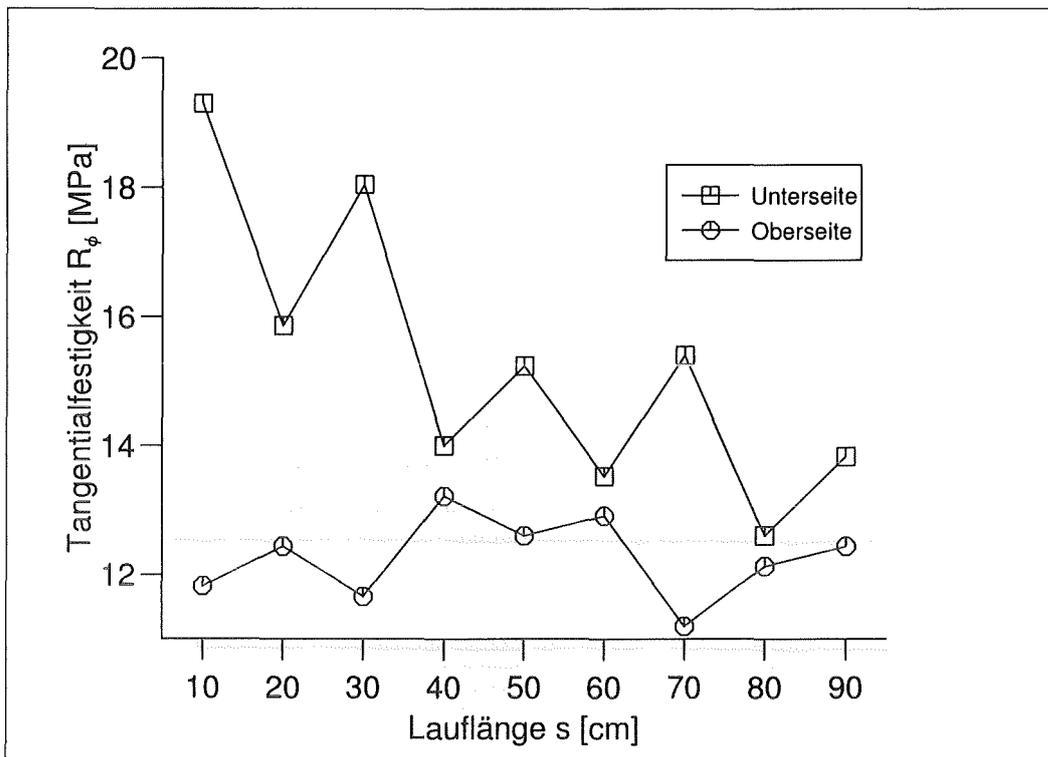


Abbildung 31: Tangentialfestigkeitsverteilung entlang einer Buche.

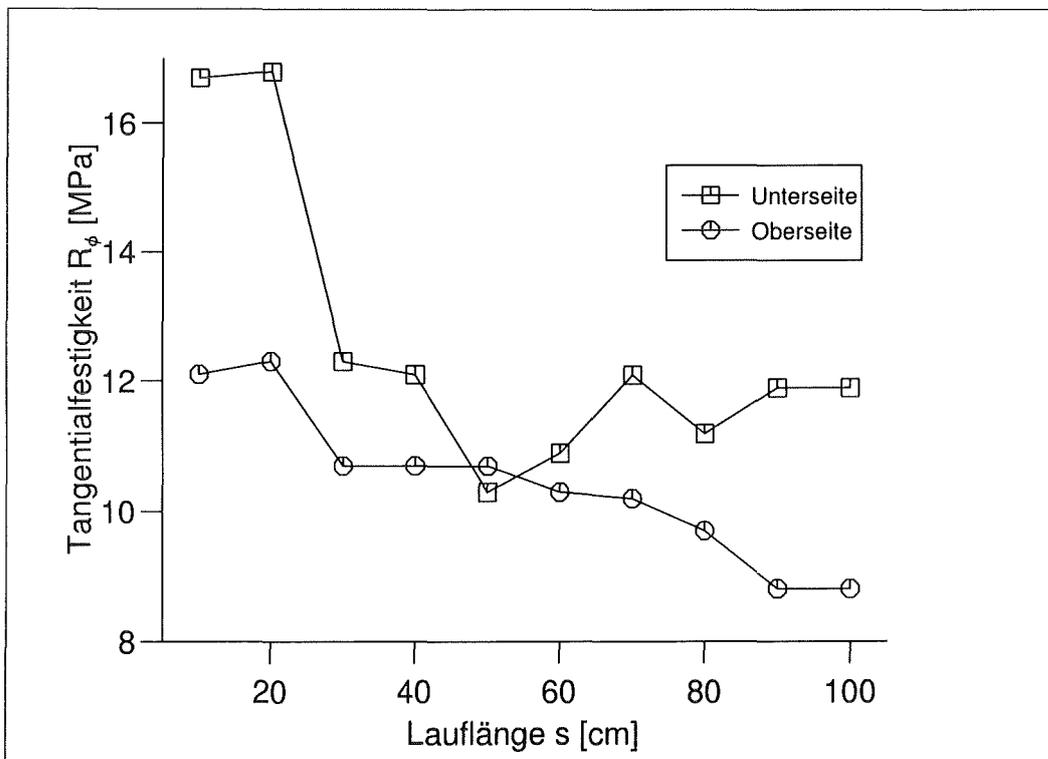


Abbildung 32: Tangentialfestigkeitsverteilung entlang einer Buche.

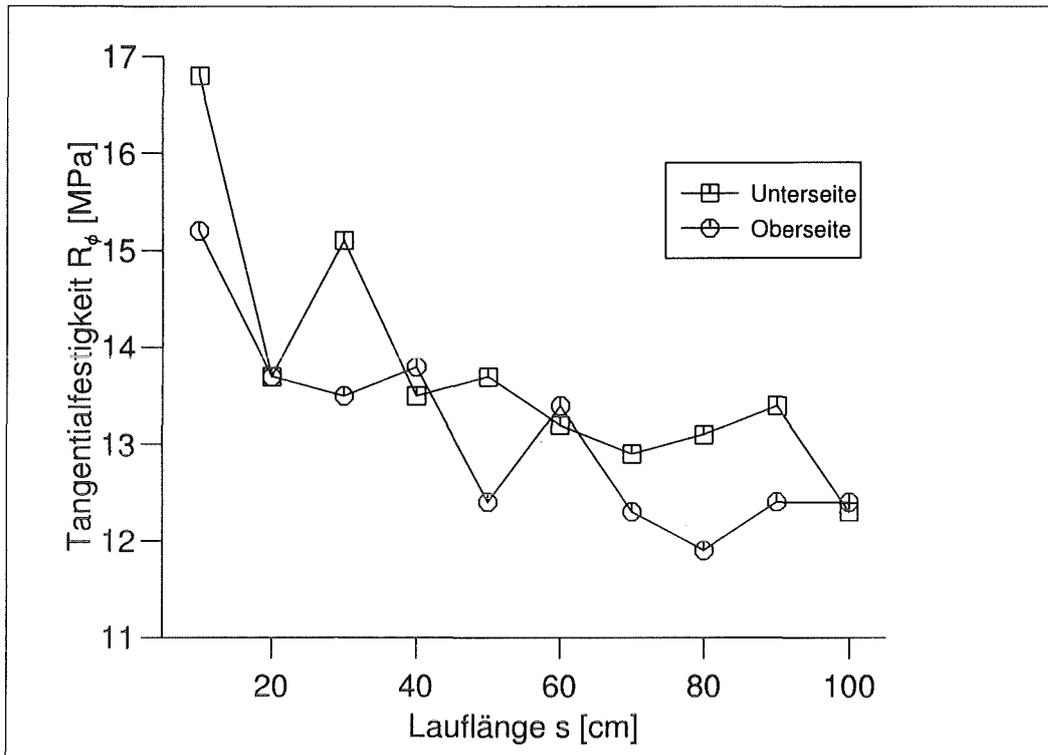


Abbildung 33: Tangentialfestigkeitsverteilung entlang einer Buche.

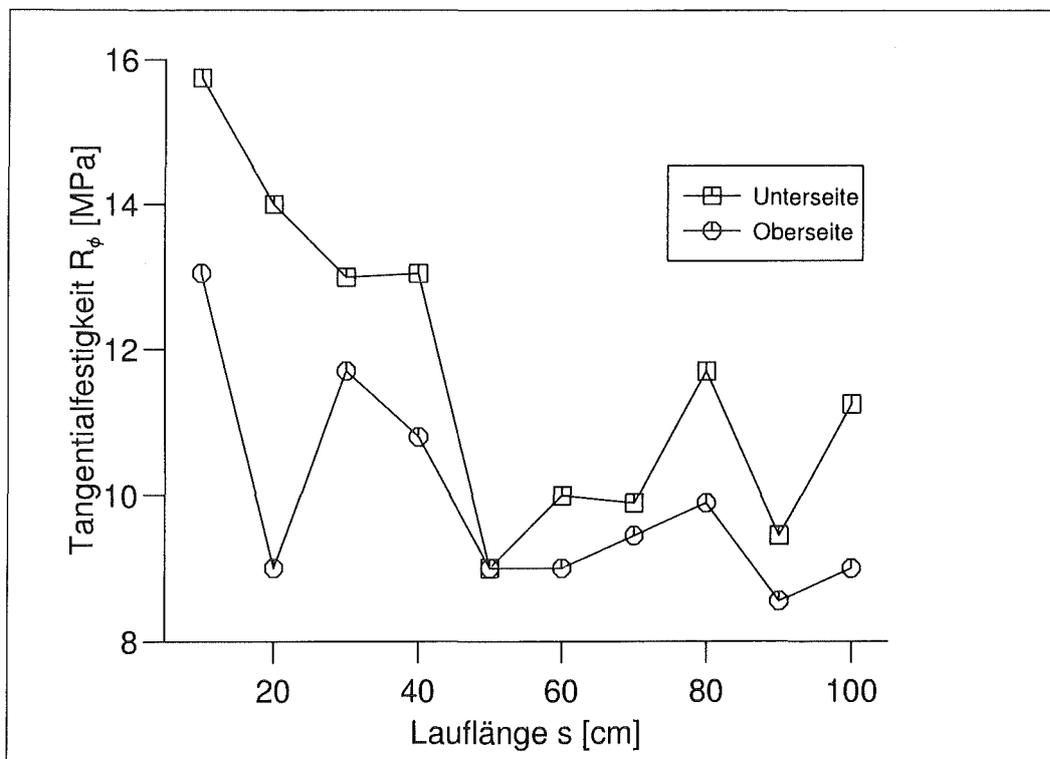


Abbildung 34: Tangentialfestigkeitsverteilung entlang einer Eiche.

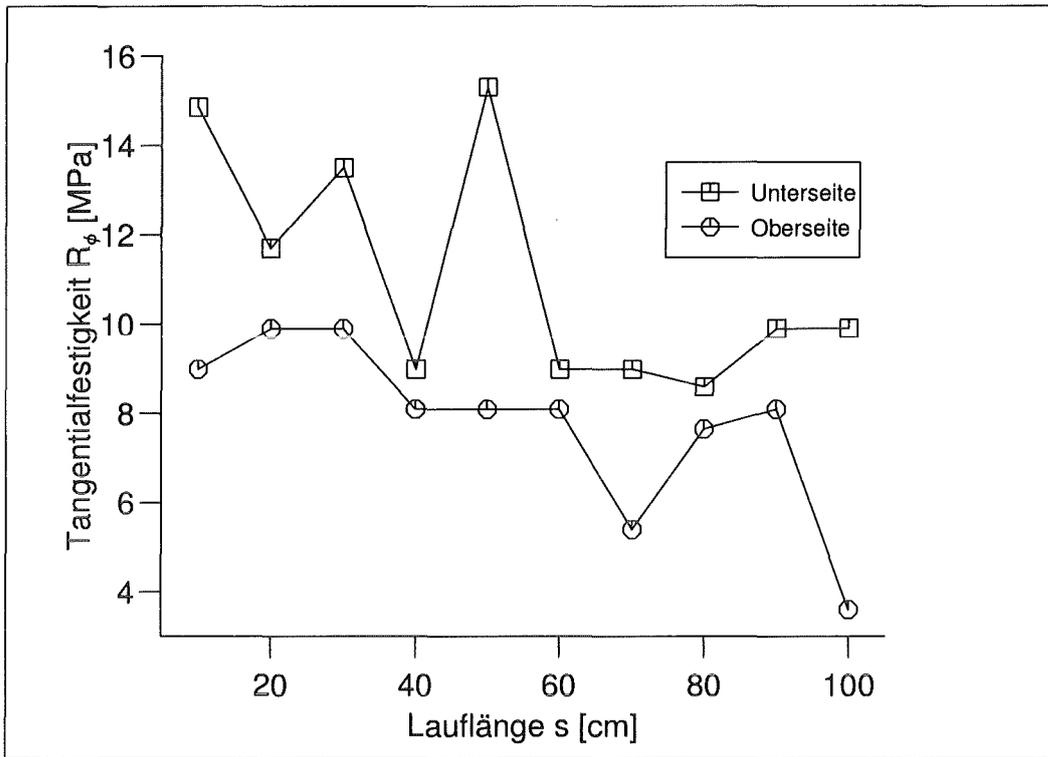


Abbildung 35: Tangentialfestigkeitsverteilung entlang einer Douglasie.

### 5.3 Festigkeitsgewinn durch Zellanpassung

Zum Aufbau seiner Holzzellen verwendet der Baum stets dieselben Grundmaterialien Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Allgemein kann man die Verteilung der Aufgaben auf diese drei Grundstoffe zum Erhalt einer mechanisch starken Struktur folgendermaßen zuordnen:

Die Cellulose, von Kollmann als Gerüstsubstanz des Holzes bezeichnet, ist für die Zugfestigkeit und die Flexibilität im Strukturverbund zuständig. Sie ist im höchsten Maße als orthotrop anzusehen. Wainwright *et al.* geben einen Elastizitätsmodul der Reincellulose in Längsrichtung von  $E_L = 100 \text{ GPa}$  an, also etwa 50 % des E-Modules von Stahl [91]. Als chemische Formel für Cellulose wird  $(C_6H_{10}O_5)_n$  angegeben [46]. Die Hydrolyse von Cellulose liefert zu 98 % Glucose, also Zucker.

Das Lignin dagegen besitzt amorphe Eigenschaften und bildet zusammen mit der Hemicellulose den Matrixwerkstoff, in den die Cellulosefäden eingebettet sind. Dabei dient die Hemicellulose als vernetzendes Organ zwischen den Cellulosefäden. Was die Stahleinlage für den Stahlbeton ist, sind die hohlen Cellulosefasern für das Lignin. Die Wände der Holzzellen sind aus mehreren Schichten aufgebaut: Die äußerste Schicht bezeichnet man dabei als Primärwand (P), die bei der Entstehung der Zelle als erste Wand gebildet wird. Die beiden Primärwände benachbarter Zellen sind durch die bereits erwähnte, aus Lignin bestehenden Mittellamelle zusammengekittet. Auch die Primärwand ist äußerst ligninhaltig. Ihre Cellulosefäden, auch Fibrillen genannt, sind ziemlich regellos ausgerichtet, was Troll auch als Streuungstextur bezeichnet [87]. Der Primärwand schließt sich zum Zellinneren hin die Sekundärwand an, die man ihrerseits in zwei bis drei Schichten unterteilt (S1, S2, S3). Die Fibrillen stellen Bündel mit einem Durchmesser von etwa 20 nm dar, die ihrerseits aus sogenannten Elementarfibrillen bestehen [87]. Eine Elementarfibrille besteht aus sogenannten Micellen, die teilweise geordnete Bündel aus etwa 100 Cellulosemolekülen darstellen. Man spricht hier von kristallinen Bereichen, die durch Einlagerung anderer Substanzen wie etwa Wasser oder Lignin ein beachtliches Quellvermögen entwickeln können, wie wir später noch sehen werden. Ungeordnete Micellbereiche werden als amorph bezeichnet.

Entscheidend für die mechanischen Eigenschaften der Holzfasern sind neben der Wandstärke und dem Ligninanteil die Ausrichtung der Fibrillen in den einzelnen Zellwänden. Unter dem Fibrillenwinkel versteht man dabei den Steigungswinkel der sich schraubenförmig um die Zelle windenden Fibrille zur Faserlängsachse. Für eine typische Holzzelle besitzt die relativ dünne S1-Schicht (0.28 - 0.5  $\mu\text{m}$ ) einen Fibrillenwinkel von etwa 72 Grad. Mechanisch weit bedeutungsvoller ist jedoch die S2-Schicht, die mit 0.85 - 3.4  $\mu\text{m}$  den größten Anteil der Zellwand ausmacht. Sie weist mit etwa 30 Grad einen relativ steilen Fibrillenwinkel auf. Die innerste Sekundärwandschicht, die S3-Schicht, ist nicht bei allen Hölzern vorhanden. Für ihre Dicke gibt Timell Werte zwischen 0.14 und 0.4  $\mu\text{m}$  an [85], und Wainwright *et al.* fanden Fibrillenwinkel um 63 Grad [91]. Wegen dieses relativ flachen Winkels schreibt Booker der S3-Schicht auch die mechanische Rolle zu, Zellkollaps aufgrund des Unterdruckes im Zellumen zu verhindern [11]. Für diese Theorie würde sprechen, daß Druckholzzellen keine S3-Schicht besitzen, denn ihre S2-Schicht weist bereits einen flacheren Fibrillenwinkel als in den Normalholzzellen auf und ist zudem wesentlich dicker und ligninreicher, weswegen sie auch oft als  $S2_L$ -Schicht bezeichnet wird. In dem Spezialfall von Zugholz gibt es noch eine weitere Innenwand, die sogenannte gelatinöse (G-) Schicht. Ihre Fibrillen sind fast parallel zur Faserlängsachse ausgerichtet

[66, 92], woraus später wichtige Schlußfolgerungen bei der Behandlung der Wachstums-  
spannungsgenerierung zu ziehen sind. Abbildung 36 faßt die Fibrillenwinkel der einzelnen  
Zelltypen zusammen. Abweichend von der Normalholzzelle zeigen die beiden Zelltypen für

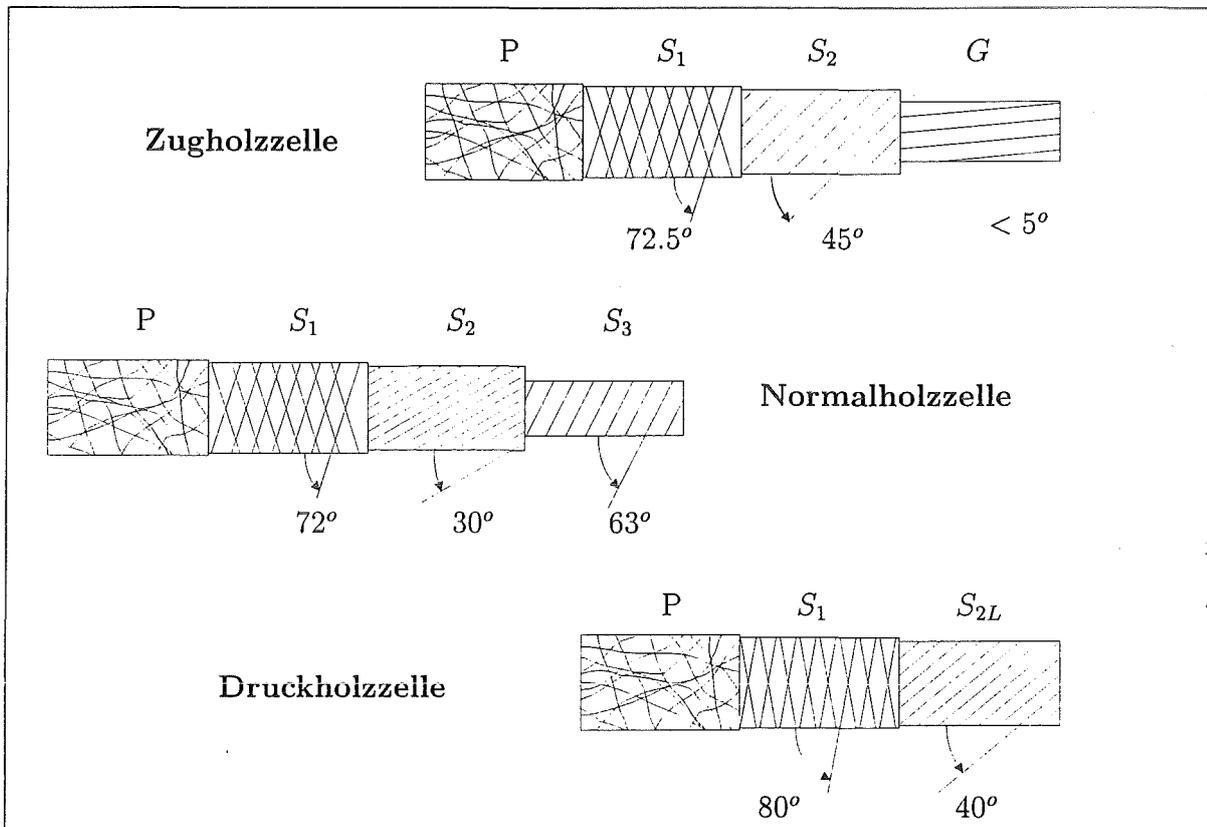


Abbildung 36: Fibrillenwinkel der Zellwandschichten von Zug-, Normal- und Druckholzzellen im Vergleich.

Zug- und Druckholz eine Spezialisierung auf ihre jeweilige mechanische Rolle in Längsrichtung. Das Zugholz, das sich selbst durch Längskontraktion unter hohe Zugspannungen setzt, besitzt mit der gerade beschriebenen G-Schicht ein zusätzliches Instrument höchster Zugfestigkeit in der Zellstruktur. Das Druckholz dagegen stellt mit dem flacheren Fibrillenwinkel in der die Hauptlast tragenden S<sub>2</sub>-Schicht (ca. 40 Grad), die darüber hinaus auch dicker (2.4 - 4  $\mu\text{m}$ ) und stärker lignifiziert ist als die Normalholzzelle, ein optimales Instrument dar, nicht nur um den auf ihm lastenden Längsdruck durch das Eigengewicht des Astes zu ertragen, sondern um seinerseits zusätzliche Druckkräfte zu entwickeln [85]. Münch hat sich sehr ausführlich mit den mechanischen Vorzügen des schraubigen Baus verschiedener Holzzellen bei Belastung in Längsrichtung befaßt [66]. Sein Beitrag sei dem interessierten Leser wärmstens empfohlen. Was uns an dieser Stelle jedoch interessiert, ist der Einfluß auf die tangentielle Festigkeit. Die höheren Werte auf den Unterseiten von Säbelbäumen wurden sowohl für Laub- als auch für Nadelbäume ermittelt. Der Festigkeitsgewinn muß also auf Eigenschaften zurückzuführen sein, die einerseits die Fasern des Druckholzes denen des normalen Nadelholzes und andererseits die Normalholzfaser der Laubbäume ihren Zugholzfaser voraus haben. Man kann der Literatur folgende Zelleigenschaften entnehmen, die auf die Tangentialfestigkeit einen Einfluß haben könnten [85, 71]:

- Ligningehalte der Zellwände
- Fibrillenwinkel
- Zellwanddicke bzw. Wandstärke/Radiusverhältnis der Zellwände

Wie könnten sich diese drei markanten Unterschiede nun mechanisch verstärkend auswirken. Einen beachtlichen Beitrag hierüber lieferten Boatright & Garrett [9]. Sie untersuchten u.a. das unterschiedliche Bruchverhalten von Früh- und Spätholzzellen. Hier zeichnet sich das Spätholz einerseits durch kleinere Zellen, andererseits aber durch ein größeres Wandstärke/Radiusverhältnis gegenüber dem weitlumigen Frühholz aus. Außerdem sind die Spätholzzellen ligninhaltiger. Boatright & Garrett ermittelten die kritischen Spannungsintensitätsfaktoren  $K_{IC}$  für beide Holztypen in den sechs möglichen Lagen der Rißausbreitung. Davon mag uns nur das System für tangenciales Versagen interessieren. Daß Holz bei Probengrößen, die wesentlich über den Dimensionen der Einzelzellen liegen, als linear-elastisches Kontinuum betrachtet werden kann, hat schon Dinwoodie festgestellt [25]. Atack *et al.* belegten die Anwendbarkeit der linear-elastischen Bruchmechanik auf Holz, indem sie zeigten, daß der Term  $\sigma\sqrt{a}$  für stabiles Rißwachstum etwa konstant ist [5]. Boatright & Garrett fanden nun für die Rißausbreitung in radial-longitudinaler Richtung einen deutlich höheren  $K_{IC}$ -Wert für das Spätholz ( $0.42 \text{ MNm}^{-3/2}$ ) als für das Frühholz, bei dem dieser Wert bei etwa  $0.25 \text{ MNm}^{-3/2}$  lag. Kennzeichnend war auch der Ort des Rißverlaufes. Während im Spätholz die Risse stets entlang der Mittellamelle, also interzellulär verliefen, was Gibson & Ashby auch als „pelling“ bezeichnen [32], trat im Frühholz stets ein intrazellulärer Rißverlauf auf, d.h. durch die Zellen hindurch unter Bruch der Zellwände, deren Fläche senkrecht zur Krafrichtung natürlich kleiner ist, als bei Bruch entlang der Mittellamelle (Abbildung 37). Die Gründe für die unterschiedlichen Rißverläufe liegen auf der Hand. Denn erstens sind die Zellwände im Frühholz nicht so dick und zweitens sind die Fibrillen innerhalb der Zellwände nicht so gut durch Lignin verklebt wie im Spätholz. Dies sind beides Eigenschaften, die eben auch die Zellen auf der Ober- und der Unterseite der Säbelbäume unterscheiden. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß der Baum keinen großen Spielraum hat, um seine Tangentialzugfestigkeit durch mehr oder weniger Lignin äußeren Belastungen anzupassen. Im Frühholz und in einem beträchtlichen Umfang auch auf den Stammoberseiten von Säbelbäumen scheint er diese Regel jedoch selbst zu unterlaufen, indem er die Zellwände schwächer ausbaut; nur so stark wie es gerade nötig ist. Sie stellen dann das schwächste Glied bei Zugbelastung in tangentialer Richtung dar. Auch hier zeigt sich, wie sparsam die Natur mit den ihr zur Verfügung stehenden Mitteln umgeht. Jegliche Überdimensionierung wäre reine Energieverschwendung.

Im Falle des intrazellulären Rißverlaufes kann nun auch der Fibrillenwinkel eine Rolle spielen. Ein flacher Winkel bedeutet bei einem solchen Bruch, daß die Fibrillen durchtrennt werden müssen. Das ist mit relativ hohem Kraftaufwand verbunden, da die Fibrillen selbst als Seilfäden aufzufassen sind, die im Verbund als Seil dann die Zelle bilden. Ein Seil aufzudrehen, ist dagegen nicht schwer, da die einzelnen Seilfäden nur zu trennen sind. Diese Separation der Fibrillen tritt nun bei intrazellulärem Rißverlauf durch Fasern mit steilem Fibrillenwinkel auf, wie er bei den Zugholzzellen auf der Stammoberseite der Laubbäume in der G-Schicht vorzufinden ist [91]. Es erfolgt nur eine Trennung der Fibrillen, was ohnehin leichter fällt, wenn dort nur wenig Ligninkitt vorhanden ist.

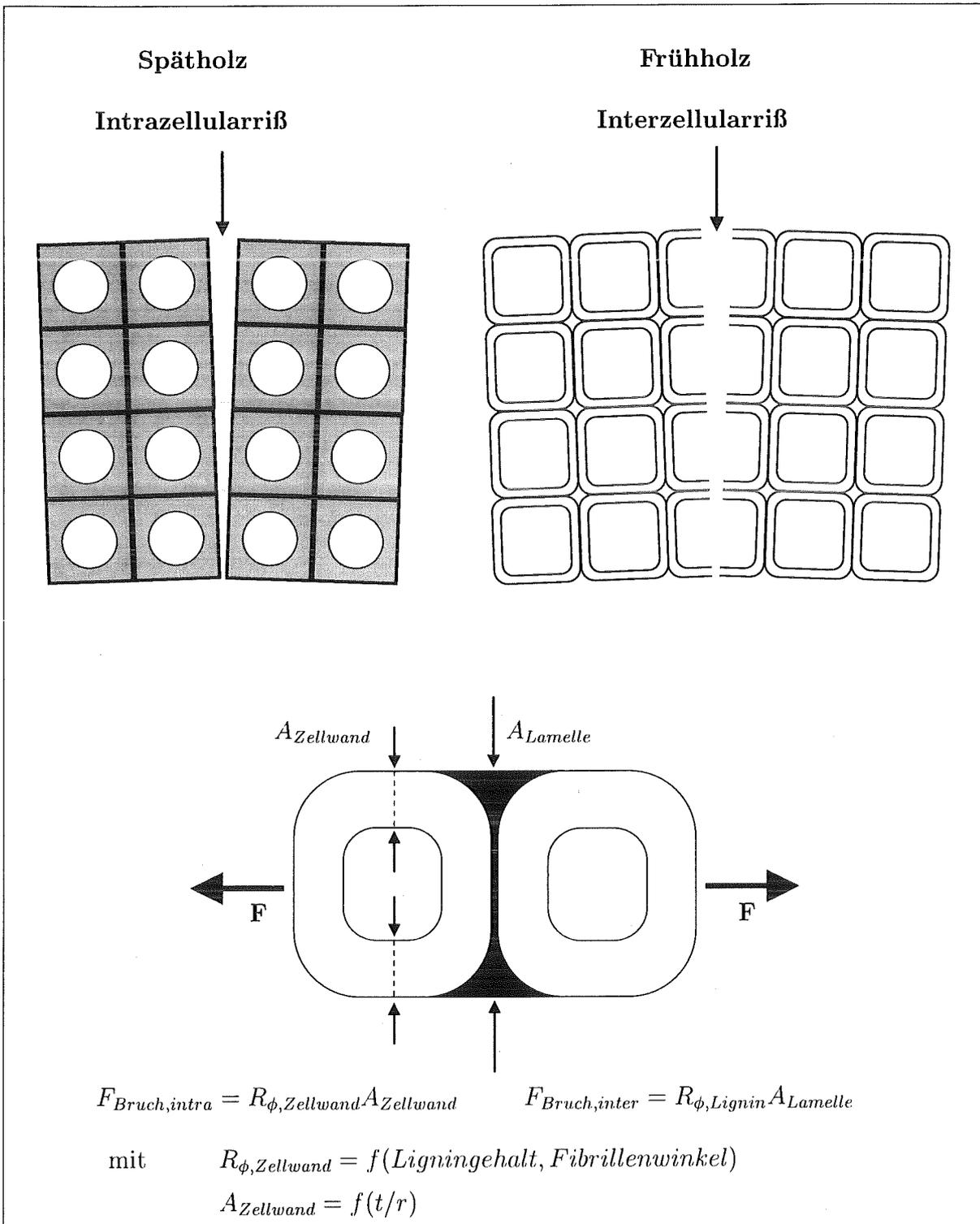


Abbildung 37: Der Rißverlauf hängt davon ab, wie stark die Zellwand im Vergleich zur Mittellamelle ist. Entscheidend dafür ist die Wandstärke, der Fibrillenwinkel und der Ligningehalt. Das Frühholz reißt meist interzellular, das Spätholz eher intrazellular.

Somit erweisen sich die genannten drei Merkmale, die die Holzzellen auf den gegenüberliegenden Seiten gekrümmter Schäfte voneinander unterscheiden, als die möglichen und auch ideal eingesetzten Mittel zur Anpassung der tangentialen Festigkeit an mögliche Zugspannungen, die sonst zur Bildung eines Bananenrisses führen könnten.

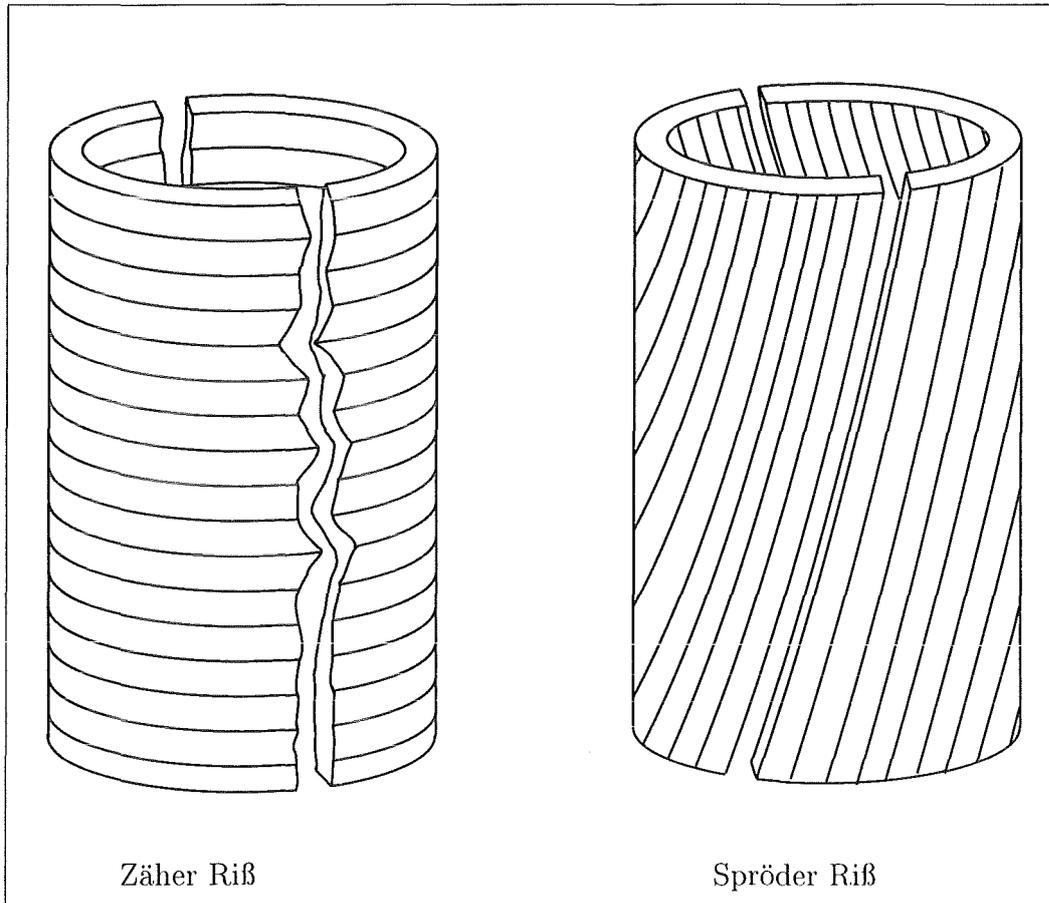


Abbildung 38: Ein flacher Fibrillenwinkel bedeutet bei intrazellularem Rißverlauf, daß die Fibrillen durchtrennt werden müssen. Bei steilem Fibrillenwinkel sind diese lediglich voneinander zu separieren, was mit weniger Kraftaufwand verbunden ist, wie jeder Holzhacker weiß.

## 6 Tangentiale Eigenspannungen

Nachdem wir also die Zugfestigkeit der Matrixsubstanz Lignin als physikalische Obergrenze für die tangentielle Bruchfestigkeit erkannt haben, wollen wir uns der zweiten Möglichkeit zuwenden, mit der auftretenden Zugspannungen präventiv begegnet werden kann, nämlich den Eigenspannungen, die im biomechanischen Sprachgebrauch auch als Wachstumsspannungen bezeichnet werden. Es gehört zum Konstruktionsalltag, Bauteile an Stellen hoher Zugbelastung durch Nitrieren, Walzen oder Kugelstrahlen im Falle metallischer Werkstoffe lokal unter Druckeigenspannungen zu setzen, um Rißbildung zu vermeiden. Bei Glas erreicht man dies durch Ionenaustausch an der Oberfläche. Setzt man Materialien ein, die besonders empfindlich auf Zug reagieren, wie etwa Beton, beaufschlagt man gar ganze Konstruktionen mit Druckspannungen mit Hilfe vorgespannter Stahleinlagen. Warum sollten sich nicht auch die Bäume, in Jahrtausenden bewährte, natürliche Faserverbundstrukturen, dieses zusätzlichen Mittels zur Schadensvermeidung bedienen?

Von der Existenz der Wachstumsspannungen braucht man diejenigen nicht zu überzeugen, die sich täglich mit Holz auseinandersetzen müssen. Baumfäller wissen sehr wohl, daß starke, gekrümmte Buchen beim Fällvorgang sehr leicht aufreißen und meist schon gespalten sind, noch ehe sie am Boden aufschlagen. Gekrümmte Stämme sind bei den Holzverarbeitenden Industrien alles andere als gefragt. Seit jeher werden sich krümmende Holzplanken als ein Ärgernis betrachtet. Gerade dieses Symptom der Wachstumsspannungen machte sich Jacobs zunutze, der mit seiner Methode des „plank-stripping“ schon 1938 der Verteilung der Wachstumsspannungen im Stamm auf die Spur kommen wollte [38, 39, 40]. Dabei versuchte er, Informationen über den inneren Eigenspannungszustand von Baumstämmen zu erhalten, indem er breite Holzplanken in Streifen sägte. Diese begannen sich daraufhin zu verbiegen. Außerdem konnte man eine Veränderung ihrer Länge beobachten. Aus der Deflektion und der Längenänderung zog Jacobs dann seine Schlüsse. Er bediente sich also der Verformung einzelner Baumsegmente, in denen durch Freischnitt vom Reststamm die Wachstumsspannungen freigesetzt wurden. Er maß einen Dehnungszustand, aus dem er auf den vorherigen Spannungszustand zurückschloß. Auf diesem Prinzip beruhten ausnahmslos alle weiteren, seither unternommenen Versuche, die Verteilung der Wachstumsspannungen zu ermitteln, so auch die vom Verfasser zuletzt favorisierte.

### 6.1 Verteilung der Wachstumsspannungen

Um die Verteilung der Wachstumsspannungen im Stamm zu bestimmen, sind seit Jacobs weltweit unzählige Versuche unternommen worden. Meist steckte das Motiv dahinter, die Wuchsbedingungen für Nutzhölzer so zu gestalten, daß die Wachstumsspannungen möglichst gering ausfallen und der Wert der Stämme nicht durch Fällrisse einerseits und Verformungen der daraus hergestellten Teile (z.B. Planken) andererseits gemindert wird. Man kann alle bisher unternommenen Versuche in zwei Kategorien aufteilen. In der einen werden nur die Wachstumsspannungen an der Stammoberfläche gemessen. Die Ergebnisse beschränken sich dann natürlich auf die Messungen der longitudinalen und der tangentialen Komponente. In der zweiten Kategorie wird der Eigenspannungszustand im Bauminern zu ergründen versucht. Hier kommt dementsprechend noch der radiale Anteil der Wachstumsspannungen hinzu. Jacobs' „plank stripping“ zählt dabei sogar schon zu der

zweiten Kategorie. Jacobs interessierte sich besonders für die Längseigenstressungen, die auch weit größer sind als die Eigenstressungen in radialer und tangentialer Richtung. So war Jacobs bereits in der Lage, eine Aussage über die Verteilung der Wachstumsspannungen in Längsrichtung über den gesamten Stammquerschnitt zu treffen. Er zeigte, daß diese im Stamminneren als Druckspannungen und in der Peripherie zur Stammoberfläche hin als Zugspannungen vorliegen. Bereits dieser Tatbestand zeigt, daß die Bäume mit ihren Eigenstressungen in sinnvoller Weise umgehen: Holz ist in Längsrichtung nur halb so druck- wie zugfest. Bei Biegung des Stammes durch Windbelastung der Krone treten auf der Druckseite betragsmäßig genauso hohe Längsspannungen wie auf der Zugseite auf. Eine erste Materialschädigung ist also auf der Druckseite in der Gestalt lokalen Faserknickens zu erwarten und zwar im Bereich der höchsten Last an der Stammoberfläche. Aber gerade dort herrschen nun die Zugeigenstressungen, die Schlimmstes zu vermeiden helfen. Nicholson ermittelte die longitudinalen Wachstumsspannungen, indem er die Längen von Holzstreifen vor und nach ihrer Entnahme an der Stammoberfläche mit Hilfe des sogenannten Huggenberger Tensotastes an Eukalyptus maß [68]. Er ermittelte Werte für die longitudinalen Wachstumsspannungen von ca. 17 MPa. Die Druckfestigkeit von Eukalyptus liegt bei -37 MPa [50]. Setzt man nun die Zugfestigkeit auf den doppelten Betrag an [48] und berücksichtigt diese zusätzlichen Zugeigenstressung von 17 MPa, so wird auf Druck- und Zugseite die Bruchlast etwa gleichzeitig bei -54 bzw. 57 MPa erreicht (Abbildung 39). Im Falle symmetrischer Biegespannungsverteilung wird so auf ideale Weise das zur Verfügung stehende Festigkeitsspektrum fast voll ausgeschöpft. Die gleiche Methode wandte Nicholson auch an gekrümmten Eukalyptusstämmen an. Das vorhandene Reaktionsholz bewirkt eine unsymmetrische Eigenstressungsverteilung. Nicholson bestimmte nun die resultierenden Längsspannungen an der aufgrund der äußeren Belastung unter Druck stehenden Stammunterseite und der zugbeanspruchten Oberseite. 14 MPa auf der Zugseite standen -7 MPa auf der Druckseite gegenüber, also betragsmäßig genau im Verhältnis 2:1 [3], welches ja eben auch für das Zug-/Druckfestigkeitsverhältnis des Holzes in Längsrichtung charakteristisch ist.

Die Verteilungen der radialen und tangentialen Wachstumsspannungen über dem Stammquerschnitt wurden von Kübler aufgezeigt [48, 49]. Dazu setzte er auf frischen Baumscheiben von Eichen Meßstifte in tangentialer und radialer Richtung. Nachdem er die Abstände der Stifte gemessen hatte, zersägte er die Scheiben zu Keilen, die er dann weiter zerteilte, bis er jeweils zwei Meßstifte auf einem Scheibenausschnitt von umgebendem Holz freigeschnitten hatte. Mit einer erneuten Messung der Meßstiftabstände konnte er aus der Änderung zu dem ursprünglich auf der unversehrten Vollscheibe gemessenen Wert auf die jeweiligen Wachstumsspannungen schließen. Radial ist die Stammoberfläche natürlich spannungsfrei. Zum Mark hin liegen aber zunehmend Zugeigenstressungen vor. Dies klingt zunächst nach Sabotage. Wir dürfen jedoch nicht vergessen, daß die Holzstrahlen hier ihrer Rolle als radiale Zugseile gerecht werden. Daß die Stammoberfläche tangential unter Druckeigenstressungen steht, vermutete schon Jacobs [40]. Führt man an einer frischen Baumscheibe einen radialen Sägeschnitt, so bekommt man diesen Druck auch recht schnell zu spüren. Die Säge beginnt nämlich zu klemmen [55]. Zum Mark hin geht die tangentiale Wachstumsspannungsverteilung dann in Zug über. Kübler leitete aus seinen Messungen und denen seiner Vorgänger die folgenden qualitativen Funktionen für die Eigenstressun-

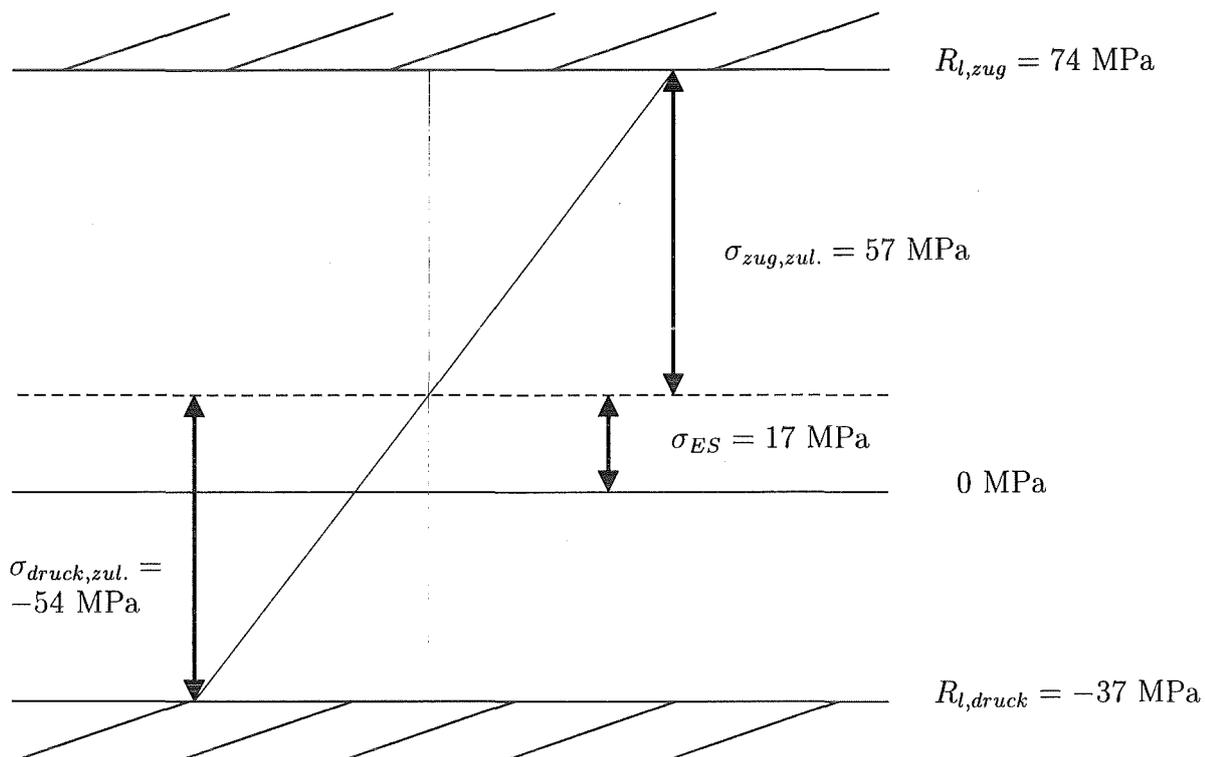


Abbildung 39: Zusätzliche Zugeigenspannungen auf der Stammoberfläche können zu etwa gleichzeitigem Versagen auf Druck- und Zugseite eines unter Biegung belasteten Stammes führen. Das Festigkeitsspektrum wird so voll ausgenutzt.

gen aller drei Achsen ab:

$$\sigma_r = \hat{\sigma}_\phi \ln(r/R)$$

$$\sigma_\phi = \hat{\sigma}_\phi (1 + \ln(r/R))$$

$$\sigma_l = \hat{\sigma}_l (1 + 2\ln(r/R))$$

mit  $\hat{\sigma}_l, \hat{\sigma}_\phi$ ... Spannungswerte an der Stammoberfläche.

Diese theoretischen Verteilungen sind allgemein anerkannt. Die vielfältigen Methoden, die seither zur Eigenspannungsermittlung entwickelt wurden, führten fast ohne Ausnahme zu den von Kübler aufgestellten Verteilungsfunktionen. Die vom Verfasser zuletzt bevorzugte Meßmethode der tangentialen Wachstumsspannungen erbrachte ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Die Japaner Sasaki, Okuyama & Kikata zeigten eine bemerkenswerte, wenn auch recht aufwendige Meßtechnik, mit der sie in der Lage waren, alle drei Eigenspannungsverteilungen in einem Versuch zu ermitteln [78]. Dazu sägten sie ein 50 cm langes, gerade Stammstück aus einer frisch gefällten japanischen Zeder (*Cryptomeria japonica*).

Auf zwei gegenüberliegende Seiten dieses Holzzylinders setzten sie dann Dehnmeßstreifen. Nun bohrten sie diesen Zylinder Schritt für Schritt auf und erhielten so tangentiale und longitudinale Dehnungen an den Zylinderoberflächen mit zunehmendem Radius der Innenbohrung. Aus den Dehnungsänderungen gelang es, die Verteilung der Wachstumsspannungen zu ermitteln. In longitudinaler und tangentialer Richtung erfolgte dies direkt aufgrund des Dehnungsgradienten. Die radiale Komponente wurde über einen Umweg berechnet. Aus den Meßergebnissen wurde jeweils ein theoretischer Innendruck berechnet, der wiederum unter der Anwendung der Theorie für dickwandige, polar anisotrope Rohre unter Innendruck in eine radiale Spannungskomponente überführt wurde. Die Methode ist sogar für einen vom laufenden Zylinderradius abhängigen Elastizitätsmodul einsetzbar. Archer errechnete aus den von Kübler angegebenen Eigenspannungsfunktionen die theoretischen Verläufe für die tangentialen und longitudinalen Dehnungen in dem Experiment der Japaner und zeigte die gute Übereinstimmung beider Ergebnisse [3]. Nun ist die Methode des schrittweise Aufbohrens recht aufwendig und direkt im Wald kaum durchführbar. Eine Veränderung des Eigenspannungszustandes durch den Feuchtigkeitsverlust beim Transport des Stammabschnittes ins Labor und während des Aufbohrens selbst muß dabei in Kauf genommen werden. In gekrümmten Stammbereichen ist die Methode gar nicht anwendbar. Einen Weg, auf einfache Art und Weise Aussagen über den Eigenspannungszustand vor Ort treffen zu können, stellt die Entnahme geeigneter Holzproben aus dem Stamm und deren Vermessung dar. Eine solche Entnahme kommt einem Freischnitt gleich und bewirkt eine Freisetzung der Eigenspannungen in der Holzprobe. Eine in radialer Richtung entnommene, zylinderförmige Probe - ähnlich dem Bohrkern - bietet sich an. Diese müßte sich infolge der freigesetzten Eigenspannungen in Gestalt einer Ellipse ovalisieren. Durch die Bestimmung der Ellipsenachsenlängen kann man dann auf die longitudinalen und tangentialen Wachstumsspannungen schließen. Zur Probenentnahme wurden folgende Möglichkeiten getestet:

- Herausstanzen der Probe mit einem  $\phi 20$  mm Stanzwerkzeug, das mit einem Hammer in den Stamm getrieben wird. Der Hammer braucht nur geringfügig außermittig auf das Stanzwerkzeug aufzutreffen, um dieses wieder aus dem Stamm zu drücken. Daher ist nur eine maximale Stanztiefe von ca. 10 mm erreichbar.
- Einsatz einer  $\phi 20$  mm Ringsäge. Verhakt sich einer der Sägezähne, dreht sich dann die ganze Säge um diesen. Dem kann zwar dadurch etwas Abhilfe geschaffen werden, daß man die Säge vorher etwas mit dem Hammer in das Holz klopft, so daß alle Sägezähne greifen. Es treten dabei aber unerwünschte Folgen für die Standzeit der Säge auf. Das Verhaken löst man besser durch den Einsatz eines Zentrierstiftes. Aber auch dann sind Sägeiefen von höchstens 10 mm erreichbar, da keine Spanabfuhr erfolgen kann.

Bei beiden Methoden stellt sich anschließend das Problem, das Holzzylinderchen auf seiner Rückseite vom Stamm zu trennen. Dazu kann man mit einem Stechbeitel das Holz neben der Probe entfernen und versuchen, ebenfalls mit dem Stechbeitel die Holzprobe hinten abzutrennen. In der Regel spaltet sich die Probe dabei und ist somit unbrauchbar.

- Verwendung eines elektrisch angetriebenen, hohlen Bohrwerkzeuges. Der Bohrkern, der mit diesem Hohlbohrer gewonnen wird, besitzt einen Durchmesser von 10 mm. Eine Vermessung der so gewonnenen Bohrproben erwies sich aber als unsinnig, da der Innendurchmesser über die volle Lochlänge des Bohrers konstant ist. Nach der

Trennung an der Bohrschneide mag sich der Holzkern zwar entsprechend den freigesetzten Wachstumsspannungen dehnen, er wird aber auf seinem weiteren Weg an der Bohrerinnenwandung einfach rundgeschliffen. An eine Messung der Verformungen infolge der Wachstumsspannungen ist also nicht zu denken. Außerdem stellt sich auch bei dieser Entnahme das Problem, die Probe an ihrer Rückseite vom Stamm zu trennen, von der Notwendigkeit einer Stromquelle beim Einsatz im Wald ganz zu schweigen.

- Vermessung von  $\phi 12$  mm-Bohrkernen. Diese Kerne wurden mit dem Goliath der Zuwachsbohrerfamilie gezogen, wozu man kräftemäßig kein David sein sollte. Aber dies ist nicht der Grund, warum auch eine Probenentnahme mit diesem Bohrer auschied. Trotz seines größeren Durchmessers besitzt das Außengewinde dieses Bohrers die gleiche Gewindehöhe wie der  $\phi 5$  mm-Bohrer. Da man beim Bohren den Zuwachsbohrer immer leicht verkantet, drückt man mit dem Bohrschaft das umliegende Holz stets etwas beiseite. Es entsteht zunehmend Spiel zwischen Stamm und Bohrschaft. Möchte man nun den Bohrer wieder herausdrehen, steht man vor einem echten Problem, wenn die Gewindehöhe kleiner als das entstandene Spiel ist. Das Gewinde greift dann nicht mehr und der Bohrer dreht auf der Stelle. Durch absichtliches Verkanten erhält das Gewinde zwar einseitig wieder Kontakt zum umliegenden Holz, man erzeugt dabei aber stets noch mehr Spiel im Bereich des noch zurückzulegenden Restweges aus dem Stamm heraus.

Zuletzt blieb denn doch wieder die Verwendung des  $\phi 5$  mm-Zuwachsbohrers, zumal es mit Bohrkernen dieser Abmessung bereits umfangreiche Untersuchungen von Polge gibt [74]. Da sich der Innendurchmesser des Zuwachsbohrers hinter der Schneide weitert, ist ein Rundschleifen des sich verformenden Bohrkernes auszuschließen.

## 6.2 Vermessung von $\phi 5$ mm-Bohrkernen

Welche qualitativen Verformungen sind an einem Bohrkern zu erwarten, den man radial entnimmt? Da im rindennahen Stammbereich starke Längszug- schwachen Tangentialdruckeigenstressspannungen gegenüberstehen, ist eine Ovalisierung des Bohrkernes in der Form zu erwarten, daß er sich in Faserrichtung verkürzt und quer dazu, also in tangentialer Richtung, ausdehnt. Schon nach der Vermessung weniger, frischer Bohrkern mit einer Mikrometerschraube (0.01 mm Genauigkeit) vor Ort stellte man aber genau das Gegenteil fest. Der Bohrkern wird in Faserrichtung länger und senkrecht dazu schmaler. Ein möglicher Grund dafür könnte die Tatsache sein, daß man den Bohrkern bei der Entnahme aus dem Stamm ja auch von den Spannungen infolge äußerer Last freischneidet. Sägt man einen Stamm jedoch in Brusthöhe ab und entnimmt dem verbleibenden Stumpf einen Bohrkern, so ergibt sich das gleiche Bild, auch wenn man zur Vermeidung von Einflüssen durch die Spannungsumlagerung nach dem Sägeschnitt weit genug von der Schnittfläche entfernt den Kern entnimmt: Der Bohrkern weist stets den größten Durchmesser in Faserrichtung auf. Was sind nun die Ursachen dieses unerwarteten Ergebnisses? Polge & Thiercelin äußerten ihrerseits selbst eine Vermutung, nachdem auch sie diese Beobachtung an frisch gezogenen Bohrkernen gemacht hatten [73]. Sie nahmen an, daß die Verformbarkeit der Bohrschneide dabei eine Rolle spielt. Dies schlossen sie daraus, daß die Bohrkern besonders stark in den Bereichen des dichteren Spätholzes in beschriebener

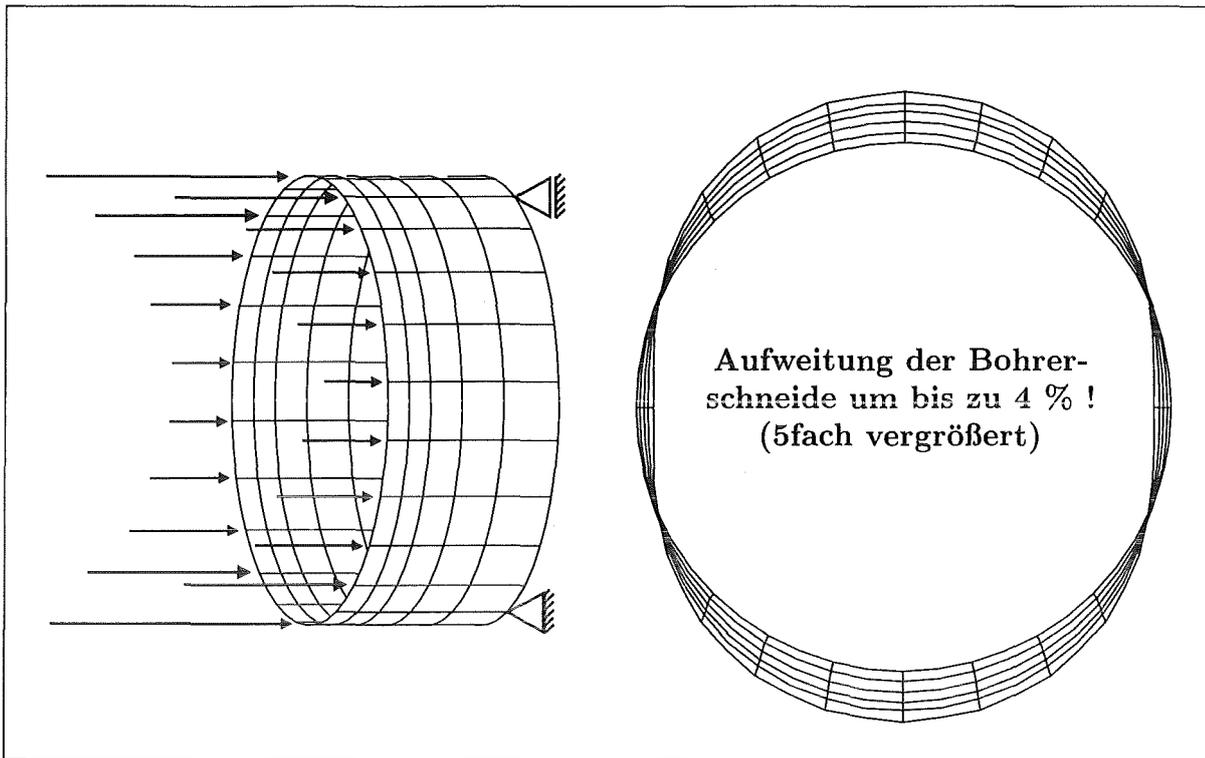


Abbildung 40: Verformung der Bohrschneide aufgrund des unterschiedlichen Holzwiderstandes über dem Schneidenumfang. Die Orthotropie des Holzes ist hierfür verantwortlich.

Weise ovalisierten. Da dichteres Holz dem Bohrer einen größeren Widerstand entgegengesetzt, muß also die Belastung der Bohrschneide die entscheidende Rolle spielen. Polge & Thiercelin glaubten, daß die Eigenspannungen selbst für eine ungleichmäßige Schneidenbelastung verantwortlich sind. Diese Theorie ist aber klar zu verwerfen. Die Wirkung der tangentialen Wachstumsspannungen wird dabei doch überschätzt. Zieht man in betracht, daß Holz orthotrop ist, wird sehr schnell klar, wo die Ursache dieses Phänomens zu suchen ist. Diese Orthotropie ist es nämlich, die zu einer ungleichmäßigen Belastung der Bohrschneide beim Trennvorgang führt. Während die Schneide im oberen und unteren Scheitelpunkt die Längsfasern glatt durchschneiden muß, müssen an den beiden seitlichen Flanken, dort wo die Bohrschneide parallel zu den Fasern verläuft, diese nur voneinander separiert, quasi gespalten werden. Wie groß der Unterschied im Kraftaufwand ist, kann jeder beim Holzhacken selber erfahren. Längs zu den Fasern läßt sich das Holz vergleichsweise leicht spalten. Senkrecht zu den Fasern dagegen kann man sich recht lange mit einem Holzstamm beschäftigen, bis man schweißgebadet vor einem Trümmerhaufen von Hackschnitzeln steht. Entsprechend wendet jedermann instinktiv die zuerst genannte Technik zum „Holz machen“ an. Den Einfluß, den das Holz entsprechend der Faserlage auf die Bohrschneide ausübt, kann man in einer FE-Rechnung nachvollziehen. Die Bohrschneide ist mit Schalenelementen nachempfunden. Das dreidimensionale Modell wird mit einer angenommenen sinusförmigen Belastung über dem Umfang der Schneide belastet, wie in Abbildung 40 dargestellt. Die maximale Belastung erfolgt entsprechend dort, wo die Bohrschneide senkrecht zu den Fasern liegt. Aus dem im FE-Lauf ermittelten Verformungsbild erkennt man deutlich die Ovalisierung der Bohrschneide, die man als Abbild in den gezogenen Bohrkernen wiederfindet. Um nach der qualitativen Erklärung der Ova-

lisierung auch eine quantitative Aussage über die Verformung der Bohrkerne treffen zu können, wurden aus längere Zeit gelagertem Holz, das infolge von Spannungsrelaxation als eigenspannungsfrei anzusehen ist, Bohrkerne entnommen und vermessen. Es ergab sich für Buche eine mittlere Dehnung in Faserlängsrichtung von bis zu 4 % des Bohrerinnendurchmessers! Dies übersteigt bei weitem die von Jacobs angegebenen Dehnungen im Bereich von 0.12 % in Längsrichtung [39]. Dessen waren sich Polge & Thiercelin nicht bewußt. Die Erkenntnis, daß die Schneidengeometrie eine Rolle spielt, veranlaßte sie aber dazu, stets nur Bohrkerne zu vergleichen, die mit demselben Bohrer entnommen wurden. Der Bohrer durfte außerdem nicht zwischendurch neu geschliffen werden [74]. Unter diesen Bedingungen sollte es doch eigentlich möglich sein, die Meßergebnisse durch Einführung eines Korrekturfaktors, der die symmetrische Ovalisierung des Bohrers berücksichtigt, zur Bestimmung der Wachstumsspannungen heranzuziehen. Doch auch dies erweist sich als Trugschluß, da es die ideal gleichmäßig geformte Bohrschneide nicht gibt. Was eine ungleichmäßig geformte Bohrschneide aber für Folgen hat, zeigt die folgende Meßreihe: Mit einem fast neuen Bohrer, der äußerlich einen guten Zustand zeigte, wurden Bohrkerne gezogen, deren jeweiliger mittlerer Durchmesser (längs und quer) mit 40 Einzelmessungen bestimmt wurde. Abbildung 41 zeigt die mittlere Abweichung der Bohrkerne von 5 mm. aufgetragen über die fortlaufende Bohrkernnummer. Die Durchmesserzunahme deu-

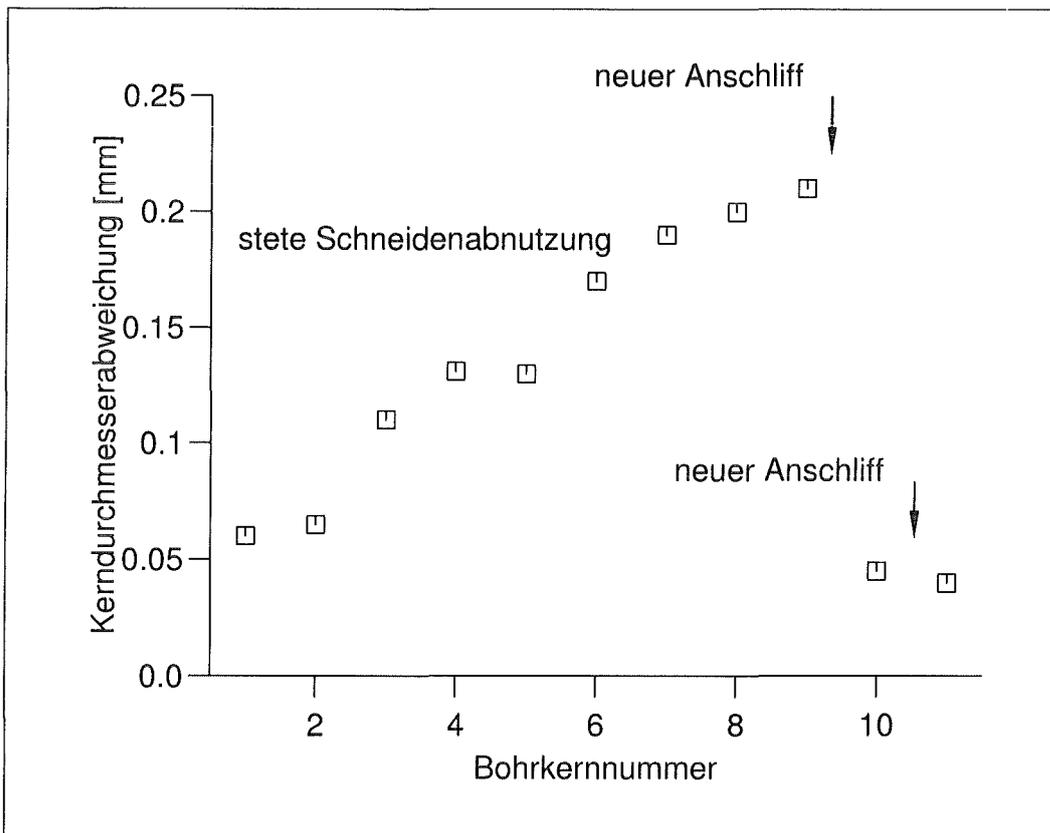


Abbildung 41: Der zunehmende Bohrschneidenverschleiß schlägt sich auch im Durchmesser der gezogenen Bohrkerne nieder.

tet auf eine immer weiter fortschreitende Aufweitung des Bohrers hin. So etwas kann jedoch nur geschehen, wenn entweder der Bohrer sich selbst infolge eines Verschleißes der Schneide aufweitet oder die Konsistenz des Holzes sich gleichmäßig erhöht. Da Letzteres

sehr unwahrscheinlich ist, scheint der sich verschlechternde Zustand der Schneide ausschlaggebend zu sein. Dies wurde dadurch bestätigt, daß man dem Bohrer einen neuen Anschliff gab. Schlagartig ging der mittlere Kerndurchmesser wieder zurück. Ein weiterer Anschliff brachte nur wenig Veränderung; der erste Anschliff hatte offenbar bereits die Unregelmäßigkeit an der Schneide eliminiert. Eine lokale Aufweitung des Bohrers im Schneidenbereich hat zwangsläufig eine Erhöhung der axial wirkenden Kräfte an diesem Punkt zur Folge. Was eine über den Schneidenumfang ungleiche axiale Belastung bewirken kann, haben wir ja bereits bei dem Einfluß der Faserrichtung gesehen. Abbildung 42 zeigt, wie man sich eine solche lokal beschädigte Schneide vorstellen kann. Die FE-Simulation der Bohrschneide mit einer lokalen Axiallastspitze liefert das entsprechende Verformungsbild der Schneide, das dann zu einer Erhöhung des mittleren Bohrkerndurchmessers führt. Auch wenn Folge stets die Verwendung nagelneuer Bohrer empfiehlt, kann er nicht davon ausgehen, bei jedem Bohrkern, der mit demselben Bohrer geschnitten wird, auch dieselben Schneidenverhältnisse vorzufinden. Dementsprechend verändern sich auch die Bohrkernschritte schrittweise.

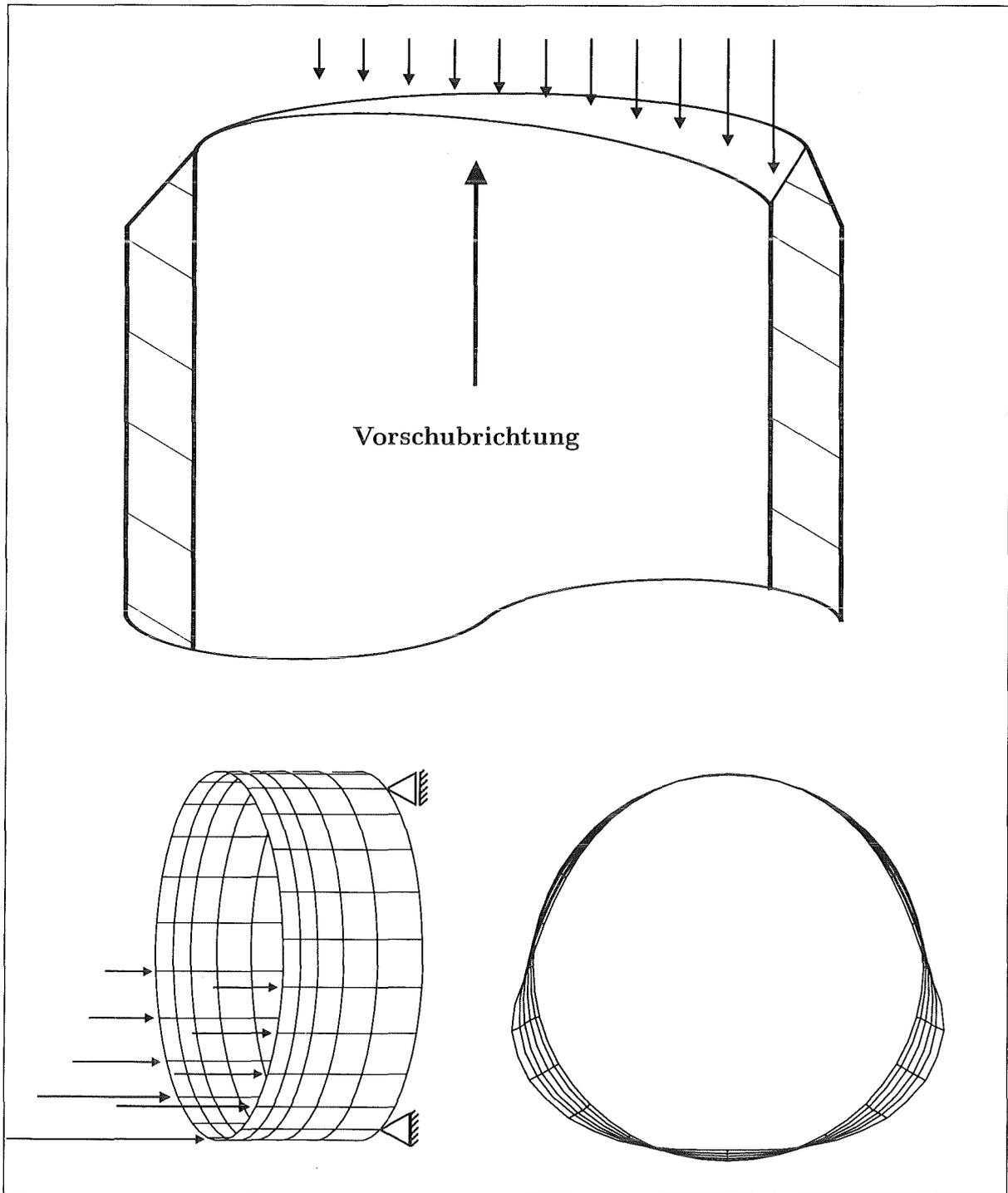


Abbildung 42: Eine lokale Beschädigung der Bohrschneide bewirkt eine weitere Aufweitung des Bohrers, da axial eine größere Angriffsfläche geboten wird. Die FE-Rechnung liefert das Deformationsbild.

Da auch Polge seine Messungen an Buchen vornahm, die mit ihrem harten Holz einen beachtlichen Widerstand beim Bohren leisten, dürfte der Schneidenschleiß bei ihm in der gleichen Größenordnung unserer Messungen liegen. Darüber hinaus nahm Polge seine Messungen an den Bohrkernen im Bereich zwischen dem Kambium und einer Entfernung von 25 mm in den Stamm hinein vor. Hier erfolgt aber gerade eine ganz besonders extreme Verformung der Kerne, da der Bohrkopf noch nicht tief genug im Holz verankert ist. Die einwandfreie Fixierung und damit die ordentliche Zentrierung des Bohrers ist aber Grundvoraussetzung für einen gleichmäßigen Bohrkern. Ein Anwender der Polgemethode, Ferrand, erkannte dies bereits bei einem Vergleich der Kernabmessungen in den Bereichen bis bzw. ab 5 mm Bohrtiefe. Er stellte einen Unterschied von  $40 \mu\text{m}$  fest [27]! Dementsprechend empfahl er auch, erst ab 5 mm Bohrtiefe unter der Rinde mit den Messungen zu beginnen.

Zu guter Letzt betrachtete Polge auch nicht die Abmessungen des frisch gezogenen Kerns, sondern er legte die Bohrproben nach der Entnahme in Wasser ein. Damit wird aber der Zustand des Kerns, wie er eben noch im Stamm vorlag, verändert. Es erfolgt eine Quellung, die quer zu den Fasern besonders stark ausgeprägt ist. Damit erhält Polge auch eine Ausdehnung in tangentialer Richtung. Allerdings kann man mit den anschließenden Messungen lediglich eine Aussage über das Quellvermögen treffen, nicht jedoch quantitativ über die Wachstumsspannungen.

Grundsätzlich stellt sich bei der Bestimmung der Eigenspannungen anhand kleiner Holzproben das Problem der äußerst geringen absoluten Längenänderungen, die zu messen sind. Dies wird sehr schnell klar, wenn man die Verformung einer entnommenen Probe mit der des verbliebenen Loches im Stamm vergleicht (Abb. 43). In dem aus Symme-

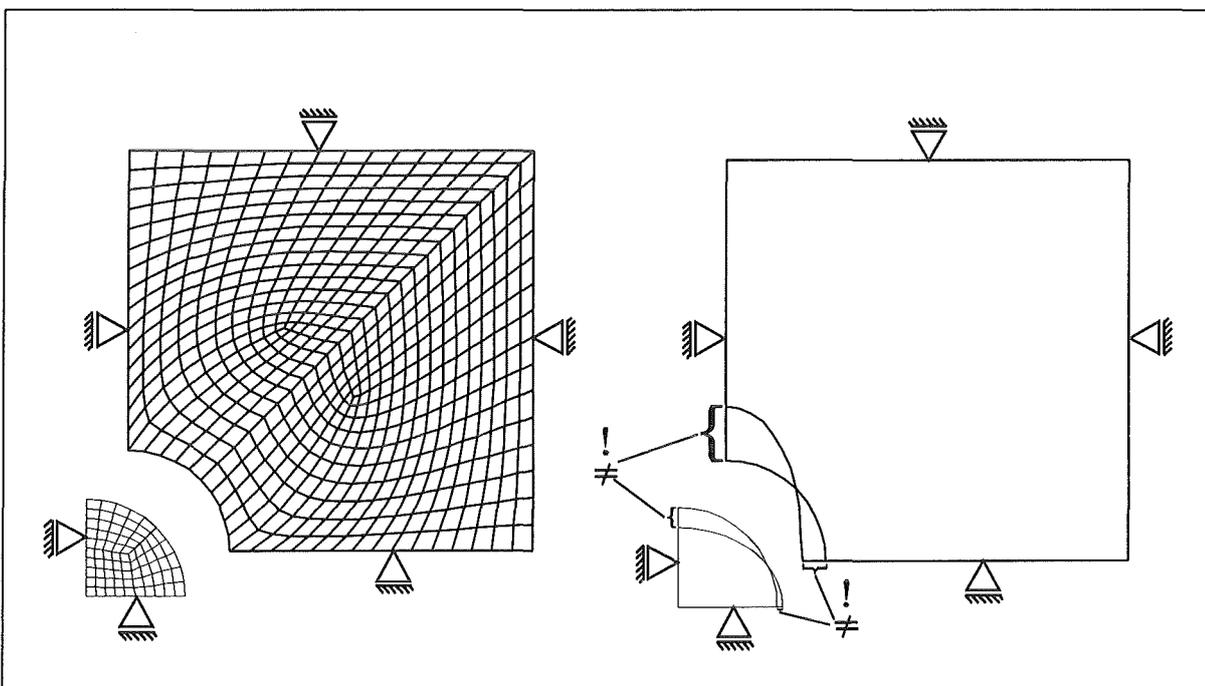


Abbildung 43: FE-Modell für eine kreisförmige Probe und das Loch, das diese im Stamm hinterläßt.

triegründen nur zu einem Viertel erzeugten und berechneten FE-Kreismodell wurde ein Temperaturfeld angelegt, das einen typischen Eigenspannungszustand liefert, wie er in der

Stammeripherie einer Buche vorzufinden ist, deren Orthotropiedaten angewandt wurden. Das Verformungsbild des herausgetrennten Kreises zeigt wesentlich geringere Knotenverschiebungen als das verbliebene Kreisloch. In der für uns so interessanten Tangentialrichtung macht die Dehnung des Kreiskörpers nur 26 % der Dehnung des Kreisloches aus. In Längsrichtung werden an der Kreisprobe wenigstens noch 35 % der Verformung des Kreisloches bei gleichem Temperaturfeld, i.e. gleichem Potential zur Eigenspannungsgenerierung erreicht. Will man also die Verformungen zur Bestimmung der Eigenspannungen messen, so ist dies am Kreisloch aufgrund der deutlich höheren Werte wesentlich leichter. Eine solche Methode wurde denn auch zur weiteren Bestimmung der Wachstumsspannungen herangezogen.

### 6.3 Messung der Verformung eines Kreisloches

Archer führte solche Messungen bereits an Pinien (*Pinus caribaea*) durch [3]. Die gemessenen Dehnungen rechnet er mit Hilfe der von Kollmann angegebenen Orthotropiedaten in Eigenspannungen um [46]. Er ermittelte Längsspannungen im Bereich von 10 MPa und Tangentialspannungen von -0.3 MPa. Auch wir wollen uns nun dieser Methode in modifizierter Form bedienen.

Nachdem man die Rinde in dem zu untersuchenden Bereich entfernt hat, zeichnet man einen Kreis auf den freigelegten Stammbereich auf. Der Kreisdurchmesser beträgt 50 mm. Anschließend werden auf dem Kreis Meßpunkte angeordnet. Archer verwendete spezielle Meßstifte, die auf sein Längenmeßgerät, ein Huggenberger Tensotast, abgestimmt waren. Unsere Messungen wurden mit Messingplättchen vorgenommen, die mit einem Schnellkleber auf dem aufgezeichneten Kreis paarweise in gegenüberliegenden Positionen mit einem speziellen Distanzstück aufgeklebt wurden. Die Messingplättchen besitzen in ihrer Mitte einen Pin. Der Abstand zwischen den Pins eines Plättchenpaares kann dann mit einem speziellen Meßrahmen bestimmt werden. Dieser Rahmen besitzt auf der einen Seite einen fixen Arm mit einer auf den Pin abgestimmten Aufnahme. Ein zweiter, beweglicher Arm besitzt ebenfalls eine solche Pinaufnahme. Die Bewegung dieses Armes wirkt auf einen Dehnmeßstreifen. Das elektrische Signal des Dehnmeßstreifens kann dann in eine Längenabweichung der Nullage von 50 mm umgerechnet werden. Abbildung 44 zeigt die Meßanordnung. Eine alternative Möglichkeit der Messung, mit der die gleiche Meßgenauigkeiten von 0.01 mm erreicht werden kann, stellt die Kombination von Reißbrettstiften dar, deren Spitzen um 90 Grad abgebogen werden, in Verbindung mit einer Schiebelehre. Die Reißbrettstifte werden ebenfalls mit ihren Köpfen entlang des vorher aufgezeichneten Kreises paarweise gegenüberliegend aufgeklebt. Die umgebogenen Stiftspitzen zeigen dabei voneinander weg. So liegen zwei definierte Meßpunkte vor. Die Wahl eines geeigneten Klebstoffes erwies sich zunächst als schwierig. Da die Meßpunkte an einem stehenden Baum, im Extremfall auf der Unterseite eines gekrümmten Stammes sogar über Kopf hängend, leicht verrutschen, sollte der Klebstoff möglichst schnell anziehen. Außerdem soll er ziemlich steif sein, da jede Nachgiebigkeit der Verbindung zwischen dem Meßpunkt und dem Holz zu Ungenauigkeiten führt. Der verwendete Cyanacrylatklebstoff DELO-CA wurde diesen Anforderungen gerecht. Da man klar eine Ovalisierung des Loches mit einer Ellipsenhauptachse senkrecht und einer parallel zur Faserrichtung erwarten kann, ordnet man zwei Meßpunktpaare entsprechend diesen Achsen an. Zur Kontrolle werden zwei weitere Meßpunktpaare um 45 Grad versetzt zu den ersten beiden Paaren aufgebracht. Da es durchaus vorkommt, daß man mit den beiden ersten Paaren die Faserlängsrichtung nicht

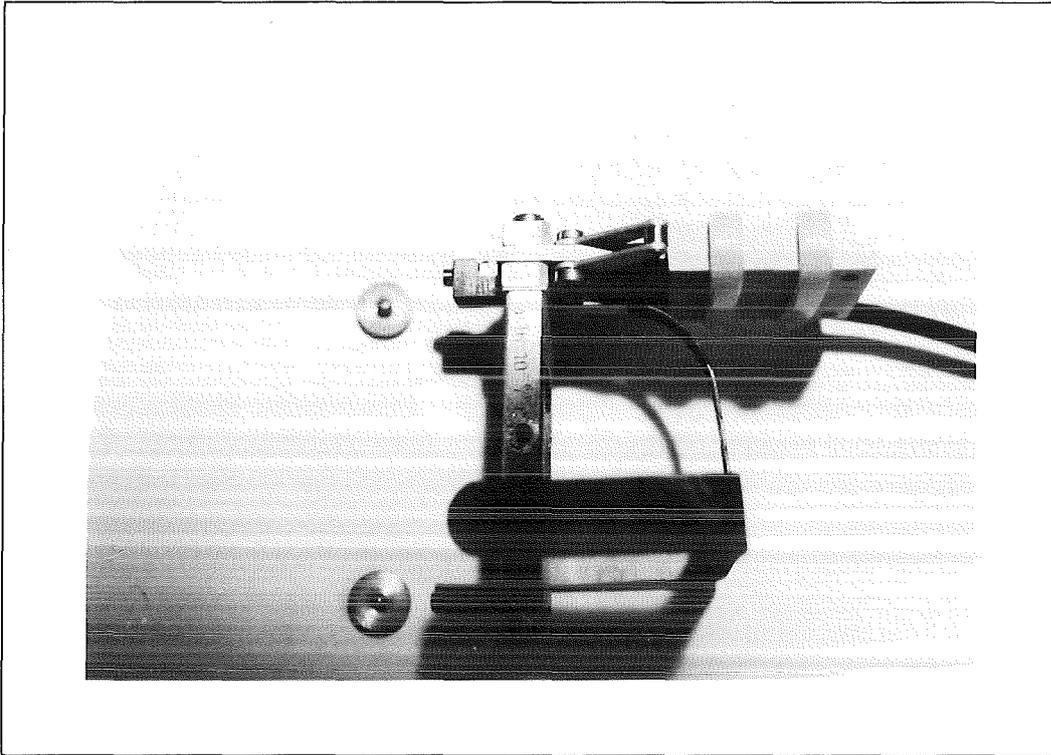


Abbildung 44: Meßeinrichtung zur Bestimmung der Kreislochdeformation (alternativ zur Schiebelehre).

genau trifft, wird die Messung eines der beiden letzteren Meßpunktpaare zur Bestimmung der Ellipsengleichung und -lage herangezogen. Hierzu benötigt man drei Ellipsenpunkte. Wir haben also stets ein Meßpunktpaar als Reserve. Abbildung 45 zeigt die derart angeordneten Meßstifte entlang des auf den nackten Stamm eingezeichneten Kreises. Die im Stamm wirkenden Spannungen setzen sich zusammen aus den Eigenspannungen und den durch die äußere Belastung anstehenden Spannungen! Um Letztere zu eliminieren, wird der Stamm in einem Abstand von zwei Stammdurchmessern oberhalb des Meßkreises abgesägt. In diesem Abstand sind keine wesentlichen Einflüsse des freien Schnittendes mehr auf die Meßergebnisse zu erwarten [3]. Nun mißt man die einzelnen Abstände der Meßpunktpaare am verbliebenen Baumstumpf. Anschließend bohrt man in den Meßkreis ein Loch, wodurch man die Eigenspannungen freisetzt. Der Abstand der Meßpunktpaare wird erneut vermessen. Aus den beiden Messungen kann man Dehnungen errechnen, die zur Bestimmung der Ellipsenachsen und deren Lage dienen. Aus diesen Dehnungen lassen sich vier fiktive Ellipsenpunkte berechnen. Die Kenntnis dreier Punkte genügt aber schon. Man hat also immer einen Reservepunkt für den Fall etwa, daß sich ein Meßpunkt löst. Die Hauptachsenlängen der Ellipse und ihre Drehung in einem festen  $x$ - $y$ -Koordinatensystem erhält man über folgenden Weg: Die Koordinaten eines laufenden Ellipsenpunktes ( $x_i/y_i$ ) lassen sich wie folgt ausdrücken.

$$x_i = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad y_i = -x \sin \varphi + y \cos \varphi$$

Eingesetzt in die Ellipsengleichung

$$\frac{x_i^2}{a^2} + \frac{y_i^2}{b^2} = 1$$

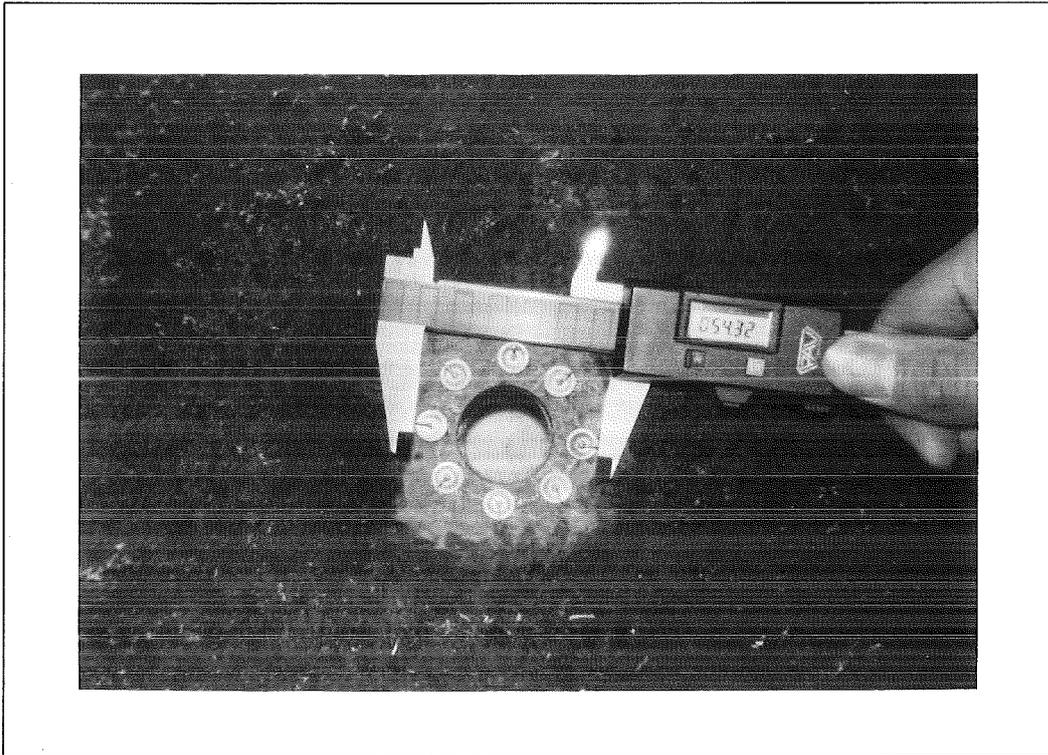


Abbildung 45: Anordnung der Meßstiftpaare, zwischen denen ein Loch die Eigenspannungen freisetzt.

mit a... Länge der 1. Hauptachse  
und b... Länge der 2. Hauptachse

ergibt sich folgende Gleichung für drei Ellipsenpunkte:

$$\frac{(x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi)^2}{a^2} + \frac{(y_i \cos \varphi - x_i \sin \varphi)^2}{b^2} = 1 \quad i = 1,2,3$$

Somit stehen uns drei Gleichungen für die drei Unbekannten a, b und  $\varphi$  zur Verfügung. Die Lösung dieses Gleichungssystems führt zu

$$a =$$

$$\sqrt{\frac{(x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi)^2 (y_2 \cos \varphi - x_2 \sin \varphi)^2 - (y_1 \cos \varphi - x_1 \sin \varphi)^2 (x_2 \cos \varphi + y_2 \sin \varphi)^2}{(y_2 \cos \varphi - x_2 \sin \varphi)^2 - (y_1 \cos \varphi - x_1 \sin \varphi)^2}}$$

$$b =$$

$$\sqrt{\frac{(y_1 \cos \varphi - x_1 \sin \varphi)^2 (x_2 \cos \varphi + y_2 \sin \varphi)^2 - (x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi)^2 (y_2 \cos \varphi - x_2 \sin \varphi)^2}{(x_2 \cos \varphi + y_2 \sin \varphi)^2 - (x_1 \cos \varphi + y_1 \sin \varphi)^2}}$$

und

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(-\frac{I_1}{I_2}\right)$$

mit

$$I_1 = x_3^2 y_1^2 - x_3^2 y_2^2 - x_1^2 y_3^2 + x_2^2 y_3^2 - x_2^2 y_1^2 + x_1^2 y_2^2$$

$$I_2 = -x_1 x_3^2 y_1 + x_2 x_3^2 y_2 + x_1^2 x_3 y_3 - x_2^2 x_3 y_3 + x_3 y_1^2 y_3 - x_3 y_2^2 y_3 \\ - x_1 y_1 y_3^2 + x_2 y_2 y_3^2 + x_1 x_2^2 y_1 - x_1^2 x_2 y_2 - x_2 y_1^2 y_2 + x_1 y_1 y_2^2$$

Somit ist eine nachträgliche Korrektur bei einer etwaigen Abweichung der Meßpunktanordnung vom Faserverlauf möglich. Dies erwies sich nachträglich auch als sehr zweckmäßig, da für  $\varphi$  noch Winkelabweichungen von bis zu 15 Grad auftraten. Die Bohrungen wurden von Hand mit einem  $\phi 28$  mm-Bohrer vorgenommen, der das Holz kreisförmig herauschält und nach hinten abführt. Eine Beeinflussung des umliegenden Holzes durch bleibende Verdichtung, wie dies beim Zuwachsbohrer der Fall war, ist hier nicht zu befürchten, da keine seitliche Verdrängung erfolgt. Es wurde aber untersucht, wie tief die Bohrung vorzunehmen ist. Archer sah 20 – 25 mm als ausreichend an [3]. Darüberhinaus würde sich seinen Beobachtungen an *Pinus caribaea* zufolge keine weitere Verformung im Lochbereich mehr ergeben. Unsere Ergebnisse an Buchen zeigten noch meßbare Veränderungen bis zu 50 mm Bohrtiefe, wie in Abbildung 46 zu sehen ist. Die Dehnungen in Längsrichtung

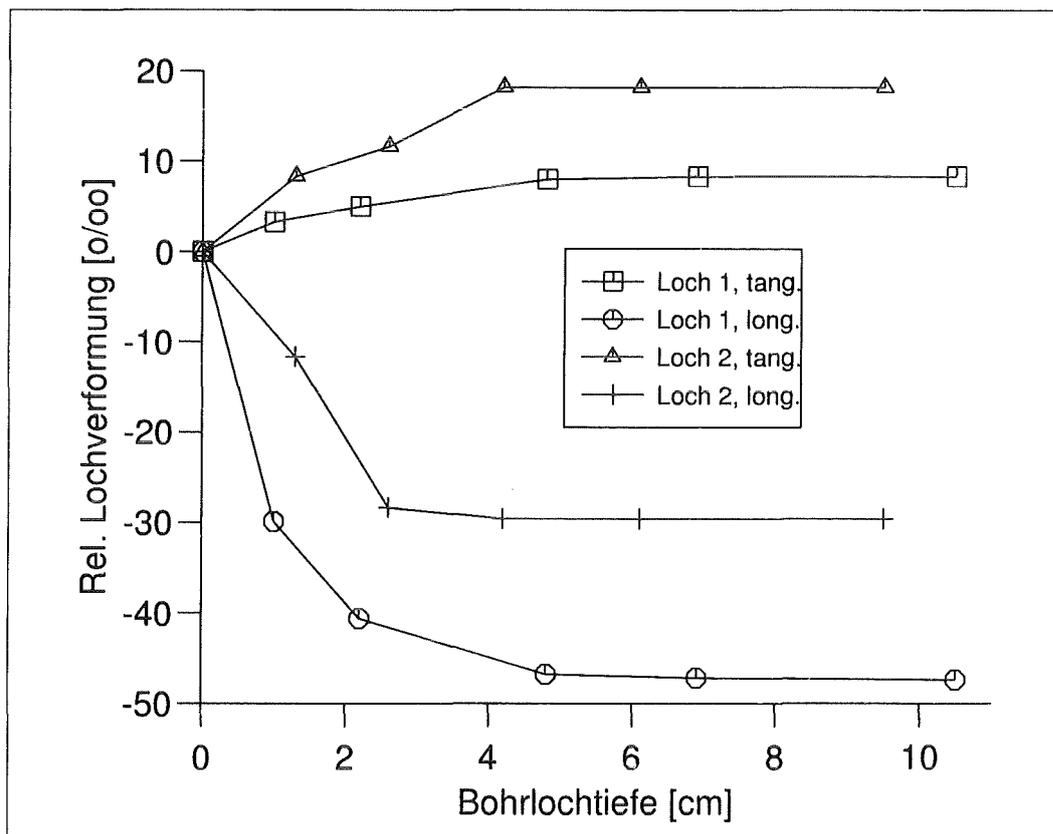


Abbildung 46: Einfluß der Lochtiefe auf die Messungen der Meßpunkteabstände.

ergeben ein klares Bild der dominierenden Eigenzugspannungen. Es erstaunt zunächst, daß die Längsdehnungen infolge Biegung und infolge Eigenspannungen etwa die gleiche Größenordnung besitzen. Es ist aber dabei zu berücksichtigen, daß der Messung praktisch nur Biegung durch Eigengewicht des Holzkörpers zugrunde lag, da meist bei windstillem

Wetter gemessen wurde und sich die Bäume zum Teil auch in unbelaubtem Zustand befanden. Die Lastspitzen, die die Baumkandidaten im Sturm zu erdulden haben, dürften wesentlich höher liegen. In tangentialer Richtung sind die Dehnungen, wie erwartet, niedriger, lassen aber nicht eindeutig auf Druckeigenspannungen schließen. Lediglich die tangentialen Messungen an der Buche 309 sind von ihren Vorzeichen her einheitlich.

$\epsilon$ [o/oo]	Biegung				Eigenspannungen			
	Zugs.		Drucks.		Zugs.		Drucks.	
	tang.	longit.	tang.	longit.	tang.	longit.	tang.	longit.
Buche 309	0.2	1.6	0.1	-1.0	-0.1	1.9	-0.5	0.7
	0.2	1.0	0.1	-0.9	-0.4	1.6	-0.4	0.4
	0.3	1.3	0.1	-1.1	-0.3	1.8	-0.3	0.6
Buche 310	0.5	1.6	-0.3	-3.1	-0.6	1.2	-0.2	0.6
	-0.4	0.9	0.8	-0.9	0.6	0.8	0.4	1.5
Buche 311	0.2	2.1	0.7	-0.8	0.2	1.2	-0.4	0.8
	-0.5	0.9	-0.3	-0.5	-0.5	0.6	-0.6	0.6
Buche 314	-0.1	1.4	0.3	-0.6	0.7	1.3	0.3	0.4
	0.1	2.6	0.0	-0.4	-0.6	1.3	0.4	0.8
	-0.2	0.5	-0.7	-2.7	0.0	2.0	-0.2	1.2

Die Messung vor und nach dem Absägen des Reststammes oberhalb der Meßstelle liefert die Verformungen aufgrund der Biegung. Das anschließende Bohren des Kreisloches setzt dann die Eigenspannungen frei. In Querrichtung (tangential) ist schon schwerlich eine Aussage über das Vorzeichen zu treffen! Unter Zuhilfenahme der Elastizitäts- und Schubmoduli, sowie der Querkontraktionszahlen gelang es Archer, seine Dehnungen in Spannungen umzurechnen. Eine solche Rechnung hat jedoch einen Pferdefuß. Eine Dehnung bezieht sich immer auf die Änderung des Abstandes zweier Punkte in *einem* Material. In unserem Fall wird aber der Abstand zweier Punkte gemessen, zwischen denen sich einmal Holz und einmal Luft befindet. Man kann die „Dehnung“ also gar nicht als Materialdehnungen ansehen. Der zuletzt gemessene Abstand hängt von der das Kreisloch umgebenden Holzmasse und dem in ihr vorhandenen Eigenspannungspotential ab. Die gleiche Lochverformung in einem dicken und einem dünnen Baumstamm bedeutet, daß die weniger Zellen des dünnen Stammes verglichen mit denen des dicken Stammes weit mehr leisten, um das gleiche Eigenspannungsniveau zu erreichen. Da die Lochdeformation nicht einmal ein klares Bild in der uns interessierenden tangentialen Richtung darüber liefert, ob hier Druck- oder Zugspannungen vorliegen, wollen wir uns daher von dieser Methode abwenden, die daran scheitert, daß das Loch in einem Stamm nun einmal nicht der unendlich ausgedehnten Lochplatte entspricht, die so oft als Berechnungsgrundlage dient. Die beschriebene Methode erfreut sich trotz alledem derzeit großer Beliebtheit, v.a. in Frankreich [20, 6]. Die Autoren verwenden diese Methode allerdings nur noch für die Wachstumsspannungen in Längsrichtung. Es werden auch nur noch Verformungen angegeben. Die Anwender scheinen sich der Schwierigkeiten bei der weiteren Auswertung der so gewonnenen Meßwerte bewußt zu sein.

Auf der Suche nach einer geeigneten Meßmethode möge man sich eines eingangs beschriebenen Phänomens erinnern: Dem Verklemmen des Sägeblattes bei radialer Säge-schnittführung in eine frische Holzscheibe. Der Druck auf die Flanken des Sägeblattes ist ein Maß für die tangentialen Wachstumsspannungen, die ja gerade für uns von Interesse

sind. Aus dieser Überlegung wurde ein überaus effizientes und einfaches Meßverfahren entwickelt.

## 6.4 Die Radialschnittmethode

Schon die Tatsache, daß man *immer* eine Sägeschnittzusammenpressung bei radialem Einsägen frischer Scheiben feststellt, ist ein Indiz dafür, daß man auf diese Art und Weise einen guten Zugang zu den tangential anliegenden Wachstumsspannungen hat. Man denke nur zurück an die gemessenen Tangentialverschiebungen der Lochkreismethode, bei der man nicht einmal eine eindeutige Aussage über das Vorzeichen treffen konnte. Selbstverständlich ist auch für das radiale Einsägen ganz wichtig, daß es sich um frische, gerade dem Stamm entnommene Scheiben handelt, da sich der Eigenspannungszustand mit zunehmendem Feuchtigkeitsverlust infolge Ausdunstung und dem damit verbundenen Schwinden des Holzes verändert. Im lufttrockenen Zustand (12% Feuchte) findet man in tangentialer Richtung gar eine entgegengesetzte Wirkung. Führt man hier einen radialen Sägeschnitt, so klaffen die Schnittflächen meist sogar auf. Der Grund liegt in dem besonders in tangentialer Richtung starken Schwinden. Bosshard, der die Anisotropie der Holzschwindung anhand von 1.0cm x 1.0cm - Holzklötzchen untersuchte, fand einen Anisotropiekoeffizienten der Tangential- zur Radialschwindung von 1.65 [13]. Als Ursache für diesen Faktor machte er die Markstrahlen verantwortlich, die seiner Meinung nach die Radialschwindung hemmen. In einer grafischen Auswertung kam er zu dem Schluß, daß „jedes weitere Prozent Markstrahlanteil zu einer höheren Tangentialschwindung des untersuchten Schnittes führt“.

Nun wollen wir uns der praktischen Ausführung der Radialschnittmethode zuwenden. Es wurden 40 - 60jährige Buchen in 10 cm dicke Scheiben zersägt. Anschließend schlug man auf einer der beiden Stirnflächen jeder Scheibe ein Nägelpaar ein. Dabei liegen die beiden Nägel in einem Abstand von ca. 30 mm auf etwa demselben Jahresring. Nachdem ihr Abstand voneinander gemessen ist, wird der Radialschnitt zwischen dem Nagelpaar hindurch geführt. (Abb. 47). Mit dem abermals gemessenen Nagelabstand hat man nun ein Wertepaar, dessen Differenz ein Maß für die tangentialen Eigenspannungen ist. Dabei spielen neben den Eigenspannungen noch der Stammdurchmesser, die Sägeschnittlänge und natürlich die durch die Trennung vom Stamm umgelegten Längsspannungen an den beiden „freien Enden“ der Scheibe eine Rolle. All diese Einflüsse werden im folgenden noch näher beleuchtet. Zunächst interessierte uns aber, ob man nicht gleich zwei Tangentialeigenspannungsmessungen auf den gegenüberliegenden Schaftseiten ein und derselben Scheibe vornehmen kann. Zu diesem Zweck wurden in Stammrichtung aufeinander folgende Scheiben abwechselnd ein- bzw. beidseitig eingesägt (Abb. 48). Es zeigt sich, daß man durchaus zwei Radialschnitte an derselben Scheibe an gegenüberliegenden Seiten durchführen kann, ohne daß eine signifikante gegenseitige Beeinflussung auftritt. Dieser Umstand erweist sich als äußerst erfreulich, da wir ja gerade daran interessiert sind, auch gegenüberliegende Seiten von Stammschäften zu untersuchen und zu vergleichen. Daraus ließe sich dann eine direkte Aussage darüber treffen, ob die Wachstumsspannungen an gekrümmten Bäumen einen Unterschied zwischen Ober- und Unterseite aufweisen.

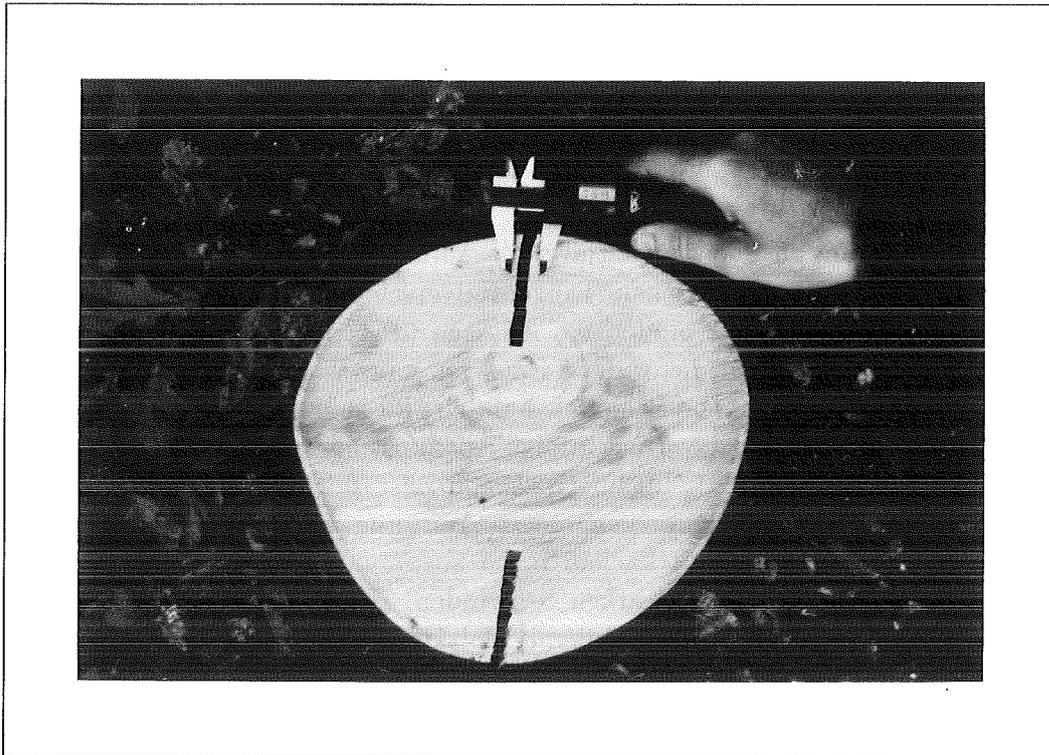


Abbildung 47: Nach der Bestimmung des Nagelabstandes mit der Schiebelehre erfolgt der Radialschnitt mit der Motorsäge und eine erneute Messung des Nagelabstandes, woraus man dann auf die Tangentaleigenstressungen schließen kann.

	Scheibe 1	Scheibe 2	Scheibe 3
<b>Verformung <math>\epsilon</math> [%]</b>			
Zugseite:	0.8	0.7	-
Druckseite:	-	3.5	3.2

Abbildung 48: An einer Scheibe können zwei Tangentialspannungsmessungen an gegenüberliegenden Seiten vorgenommen werden. Dies zeigen Vergleichsmessungen an benachbarten Scheiben eines schiefen, aber krümmungsfreien Stammes.

### 6.4.1 Ermittlung der Tangentialeigenspannungen aus den Meßergebnissen der Radialschnittmethode

Die Radialschnittmethode liefert, wie alle Meßmethoden zur Ermittlung der Wachstumsspannungen zuvor auch, zunächst einmal nur eine Verschiebung, d.h. eine Änderung des Nagelabstandes von  $l_0$  zu  $l_1$ . Im Falle frischer Baumscheiben tritt im Normalfall immer eine Verringerung des Nagelabstandes auf, was ein Zeichen für die vorliegenden Tangentialdruckeigenspannungen im Bereich der Stammoberfläche ist. Um aus der Änderung des Nagelabstandes auf die Höhe der vorhandenen Eigenspannungen schließen zu können, muß die Wirkung der umliegenden Holzmasse kalkuliert werden. Dabei sind zwei wichtige geometrische Größen, der Stammdurchmesser und die Radialschnitttiefe, unbedingt zu berücksichtigen. Es dürfte ja zweifellos ein Unterschied bestehen, ob man nur 2 cm tief oder gar bis ins Mark hinein radial einsägt. Je tiefer der Schnitt, um so mehr Eigenspannungen werden tangential freigesetzt, um so länger werden die Schnittufer, die analog zu den Längen der Rißufer bruchmechanischer Betrachtungen von entscheidender Bedeutung sind. So bietet es sich an, die Verschiebungen der Nägel als eine Rißuferverschiebung zu betrachten. Auf dieser Grundlage sollte es möglich sein, die Eigenspannungen senkrecht zu den Riß- bzw. Schnittufern bestimmen zu können. Dabei bieten sich zwei Möglichkeiten an: Neben einer analytischen Lösung unter Anwendung bruchmechanischer Beziehungen kann man auch die Methode der Finiten Elemente zur Eigenspannungsermittlung heranziehen. Im folgenden wollen wir uns diese zwei Lösungswege anschauen. Grundvoraussetzung für beide Analysen ist die Kenntnis des qualitativen Eigenspannungsverlaufes in der Scheibe. Dazu treffen wir die Annahme, daß eine Verteilung vorliegt, wie sie von Kübler angegeben wurde und von anderen Wissenschaftlern bestätigt wurde [48]. Selbstverständlich ist zu prüfen, inwieweit diese Annahme richtig ist. Dies geschieht durch eine qualitative Verifizierung der Kübler'schen Eigenspannungsverteilung durch einen abschließenden Vergleich mit den von uns gemessenen Verformungen.

### 6.4.2 Anwendung bruchmechanischer Beziehungen

Eigenspannungen werden in der Bruchmechanik allgemein dadurch ermittelt, daß man schrittweise Schichten einer eigenspannungsbehafteten Probe abträgt und die Verschiebungen geeigneter Punkte aufnimmt und unter Anwendung von Gewichtsfunktionen auswertet. Fett entwickelte ein Verfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen, dessen Tauglichkeit er am Beispiel von PMMA-Proben bewies [28]. In eine mit Eigenspannungen versehene Probe führte er schrittweise einen Sägeschnitt, der - ähnlich wie bei unserem Nagelpaar - zwischen zwei Meßpunkten hindurch verlief. Fett nahm die Meßpunktverschiebung in Abhängigkeit von der Sägeschnitttiefe auf und wendete darauf bruchmechanische Beziehungen an, indem er den Sägeschnitt eben als Riß auffaßte. Die Spannungsverteilung  $\sigma(x)$  bei Schnitfführung in radialer x-Richtung kann als allgemeines Polynom höherer Ordnung angegeben werden. Für die Rißuferverschiebung ergibt sich folgende Funktion.

$$u(x, a) = \frac{1 - \nu^2}{E} \int_{x_1}^a h(a', x_1) \int_0^{a'} h(a', x') \sigma(x') dx' da'$$

$x_1$  ... Entfernung der Nägel vom Außenradius

mit der Eigenspannungsfunktion nach Kübler [48]:

$$\sigma(x) = A_0 \left( 1 + \ln \left( 1 - \frac{x}{R} \right) \right)$$

$x$  ... laufende Sägetiefe

$R$  ... Außenradius

Die Gewichtsfunktion  $h(a,x)$  hängt natürlich von der Probengeometrie ab. Für eine Kreisprobe mit radialem Sägeschnitt gab Fett folgende Gewichtsfunktion an [29]:

$$h(a, x) = \sqrt{\frac{2}{\pi a}} \left( \frac{x/a}{\sqrt{1-x/a}} + D_0 \sqrt{1-x/a} + D_1 (1-x/a)^{3/2} + D_2 (1-x/a)^{5/2} \right)$$

$$D_0 \simeq (1.5721 + 2.4109\alpha - 0.8968\alpha^2 - 1.4311\alpha^3)/(1-\alpha)^{3/2}$$

$$D_1 \simeq (0.4612 + 0.5972\alpha + 0.7466\alpha^2 + 2.2131\alpha^3)/(1-\alpha)^{3/2}$$

$$D_2 \simeq (-0.2537 + 0.4353\alpha + 0.2851\alpha^2 - 0.5853\alpha^3)/(1-\alpha)^{3/2}$$

$$\alpha = a/D$$

$D$  ... Scheibendurchmesser

Die so errechnete Funktion der Schnittuferverschiebung in Abhängigkeit von der Schnittlänge ist dann mit der gemessenen Verschiebungskurve direkt vergleichbar. Decken sich die beiden Kurven nicht, so ist eine andere qualitative Eigenspannungsverteilung anzunehmen. Um ein endloses Austesten verschiedener Funktionen zu vermeiden, schlägt Fett die Verwendung eines Polynoms höherer Ordnung vor. Mit einer solchen Funktion lassen sich fast alle beliebigen Verteilungen beschreiben. In unserem Fall nehmen wir aber die von Kübler angegebene Funktion für die Tangentialeigenspannungen an. Es gilt also nur, am Ende den Faktor  $A_0$  zu bestimmen, der während der Lösung des doppelten Integrals als unabhängige Variable vorgezogen werden kann und beim Integrieren nicht weiter stört. Wir wollen nun die Methode nach Fett auf den konkreten Fall einer Baumscheibe anwenden, die wir einseitig mit einem Nagelpaar versehen und schrittweise bis ins Mark hinein eingesägt haben. Als Ergebnis erhält man die in Abbildung 49 dargestellten Kurvenverläufe für die Schnittuferverschiebungen zweier eingesägter Scheiben und die entsprechenden, nach Fett errechneten Funktionen. Für geeignete Wahl des Vorfaktors  $A_0$  (tang. Eigenspannung an der Stammoberfläche) decken sich die zugehörigen Kurven recht gut. Die gute Übereinstimmung der gemessenen und der errechneten Kurve beweist ihrerseits die Richtigkeit des angenommenen qualitativen Tangentialeigenspannungsverlaufes nach Kübler. Mit der Methode der Gewichtsfunktion nach Fett lassen sich nach der qualitativen Verifizierung die Tangentialeigenspannungen quantitativ bestimmen. Nicht zuletzt deswegen erfreut sich diese Methode eines großen Bekanntheitsgrades bei den mit Eigenspannungen beschäftigten Bruchmechanikern.

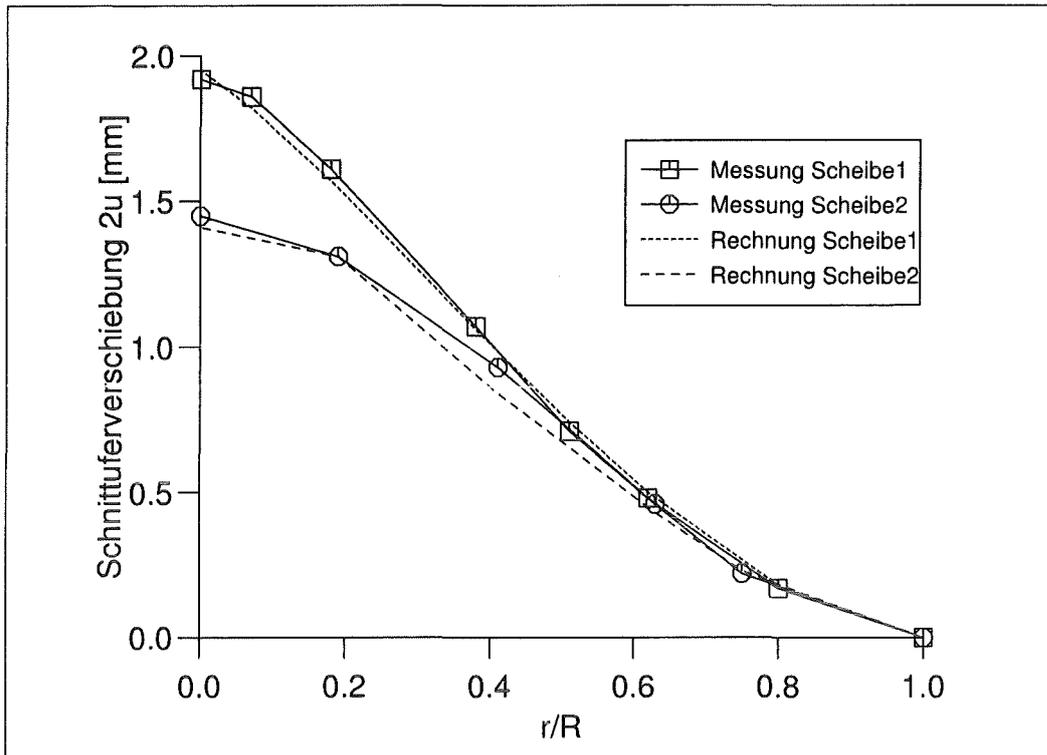


Abbildung 49: Schnittuverschiebungsfunktionen für zwei verschiedene  $A_0$  nach der Fett'schen Methode und zwei entsprechende Kurvenverlauf aus Messungen an frischen Buchenscheiben.

### 6.4.3 Anwendung der Finite Elemente Methode

Neben der eleganten Methode von Fett lassen sich die tangentialen Eigenspannungen natürlich auch mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente ermitteln. Zu diesem Zweck erstellen wir uns das zweidimensionale Modell eines Kreisviertels, das wir zunächst an beiden Flanken gemäß Abbildung 50 einspannen, um den Symmetriebedingungen gerecht zu werden. Anschließend erzeugen wir durch Simulation mit Temperaturbeaufschlagung eine Eigenspannungsverteilung gemäß Kübler [48]. Dies geschieht durch eine zylindrisch anisotrope Verteilung der Temperatureausdehnungskoeffizienten und der Beaufschlagung mit einer vom Radius abhängigen Temperaturverteilung. Daraus ergibt sich in einem ersten FE-Lauf bei Zugrundelegung des ebenen Dehnungszustandes eine tangentialer Eigenspannungsverteilung. Durch geschickte Wahl der richtungsabhängigen Temperatureausdehnungskoeffizienten lassen sich zusätzlich auch die Eigenspannungsverteilungen radial und longitudinal simulieren (Abbildung 51). In den weiteren FE-Läufen läßt man nun ein Randelement nach dem anderen auf einer der beiden Stirnflächen wegfallen und nimmt jedesmal die Verschiebung des Knoten P (siehe Abb. 50) in tangentialer Richtung auf. Der Punkt P entspricht der Position eines der beiden Nägel. Die Verformung des Materials zwischen Sägeschnitt und Meßpunkt kann man vernachlässigen. So erhält man für eine feste tangentialer Eigenspannungsverteilung eine Kurve der Schnittuverschiebung in Abhängigkeit der Schnittlänge (Abb. 52). Unter Ausnutzung der geometrischen Ähnlichkeit lassen sich die Kurven zu einer zusammenfassen. Variiert man nun noch  $\hat{\sigma}_\phi$  in den Kübler'schen Grundgleichungen, so erhält man ein Kennfeld, in das man die gemessenen Größen Stammradius, Schnittlänge und Schnittuverschiebung nur einsetzen muß, um

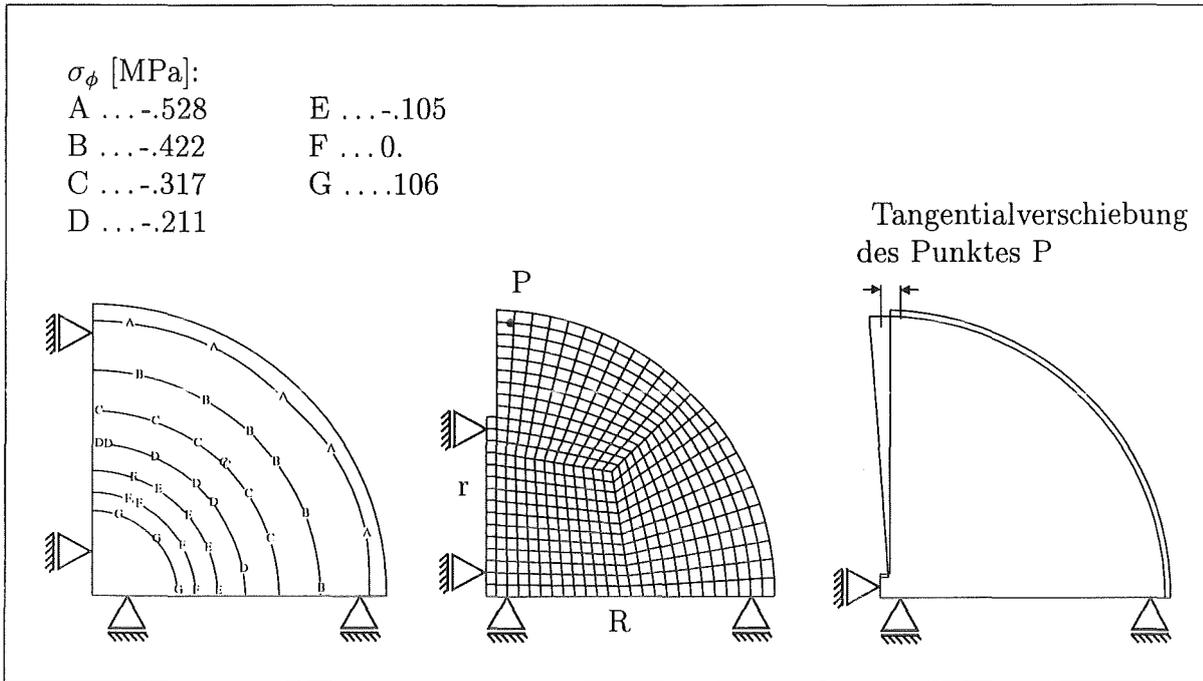


Abbildung 50: Darstellung eines Viertels der Baumscheibe mit FEM.

den tangentialen Eigenspannungswert an der Stammoberfläche direkt ablesen zu können (Abb. 55).

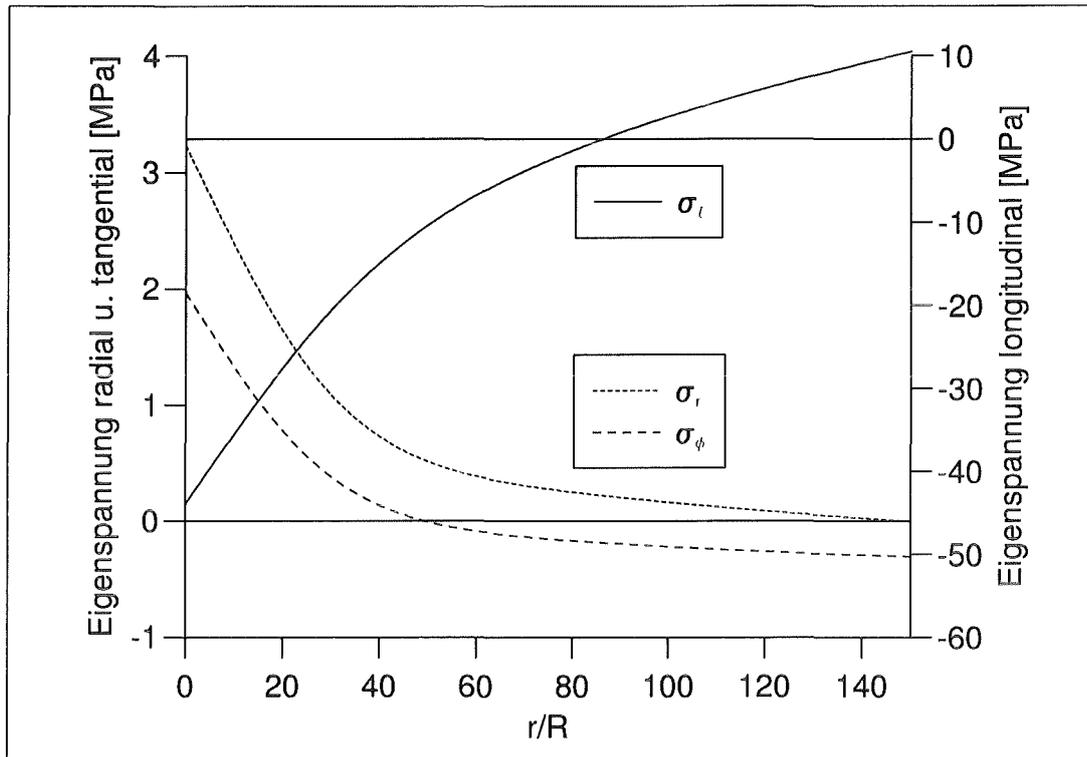


Abbildung 51: Eigenspannungsverteilungen in der erzeugten FE-Struktur.

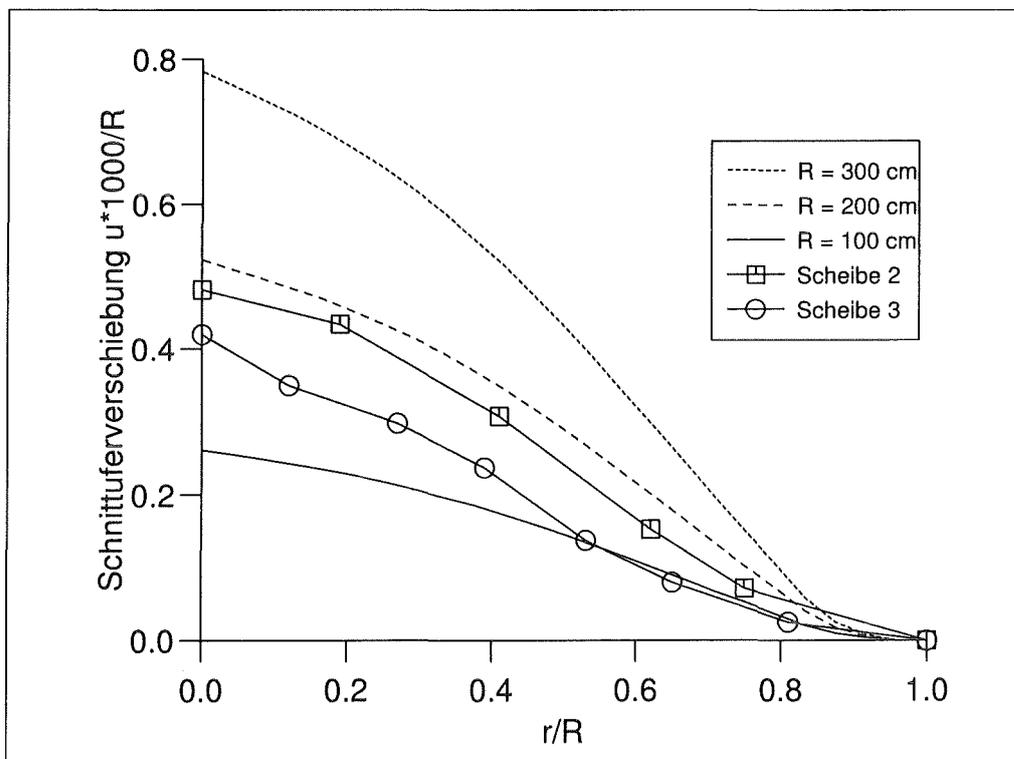


Abbildung 52: Funktionen der Schnittverschiebung für drei Radien aus FE-Analyse. Zum Vergleich zwei Kurven aus der Vermessung eingesägter Baumscheiben (Scheibe2: R=110 cm, Scheibe3: R=120 cm).

#### 6.4.4 Einfluß der Hirnschnitte

Die beiden Hirnschnittflächen unserer Baumscheiben stellen zwei freie Enden dar. Durch die Abtrennung vom Reststamm erfolgt eine Umlagerung der Längseigenstresspannungen, die bei nur 10 cm Scheibendicke natürlich Auswirkungen auf die ganze Probe haben. Die Auswirkungen solcher Hirnschnitte etwa beim Fällen eines Baumes sind bekannt, bewirken doch die umgelegten, starken Längszugspannungen in der Peripherie in Verbindung mit den Längsdruckspannungen im Stamminneren auf der Stammoberfläche hohe Radialspannungen, die vom Mark ausgehende Hirnrisse provozieren. Diese Risse können sich weit in Stammlängsrichtung ausbreiten und den Nutzwert eines guten Buchenstammes auf den von Brennholz reduzieren. Neben dem Einsatz eines Kompressionsringes kann man diesen Hirnrissen durch eine spezielle Fälltechnik begegnen [60]. Wir wollen nun den Einfluß eines freien Endes auf unsere Meßwerte ermitteln. Zu diesem Zweck betrachten wir ein dreidimensionales FE-Modell eines geraden Stammabschnittes mit 8 cm Radius und 110 cm Länge. Aus Symmetriegründen wird auch hier nur eine Viertelstruktur betrachtet. Der Stammabschnitt erhält die von Kübler angegebenen Eigenspannungsverteilungen aller drei Achsen, simuliert mit einer entsprechenden Temperaturverteilung, sowie orthotrope Materialdaten. Das Modell weist darüber hinaus einen radialen Sägeschnitt

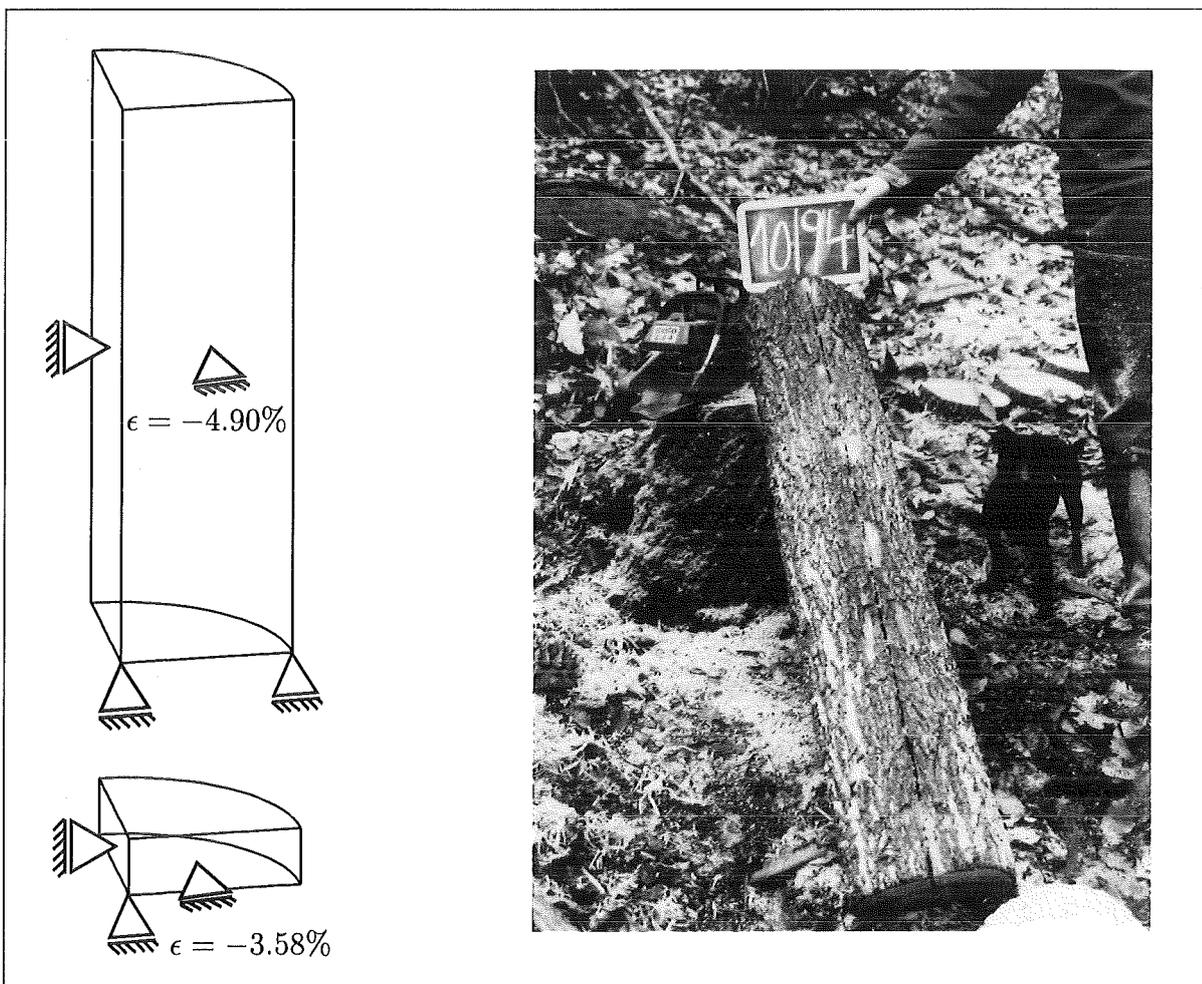


Abbildung 53: FE-Modell zur Untersuchung des Einflusses der Eigenspannungsumlenkung am freien Stammende.

von 6 cm Tiefe konstant über die volle Länge auf. Auf der Unterseite ist das Modell in Längsrichtung über den ganzen Querschnitt eingespannt (Abb. 53). Die unterste Ebene ist aufgrund der dort gewählten Einspannung als im Vollstamm liegend anzusehen. Parallel zu der FE-Rechnung wird der gleiche Versuch in der Praxis an einem realen, geraden Stammstück einer Eiche durchgeführt. Die Geometrie des FE-Modells ist mit der des realen Stammes identisch. Ein Vergleich verschiedener Meßpunktanordnungen kann außerdem vorgenommen werden. Man kann die Nägel ja nicht nur auf die Stirnflächen, sondern auch auf die Stammaußenseiten, also die Mantelflächen setzen. Dabei ergibt sich infolge des Radialschnittes eine Nagelverschiebung mit einem rotatorischen Anteil um den Sägeschnittgrund. Der Abstand der Nägel vom Sägeschnittgrund und das Stück, das die Nägelköpfe von der Stammoberfläche entfernt sind, müssen dann berücksichtigt werden. In Abbildung 54 sind die Ergebnisse des realen Stammes mit den Werten des FE-Modelles verglichen. Der qualitative Verlauf der Eigenspannungen im FE-Modell wurde gemäß den Kübler'schen Formeln gewählt. Die quantitative Festsetzung erfolgte durch einen Abgleich der Verschiebungen im FE-Modell und denen im realen Stamm. Im Falle des Stammstückes stehen natürlich zwei freie Enden zur Verfügung, die beide zur Bewertung herangezogen werden können. Vergleicht man die beiden realen und den theoretischen

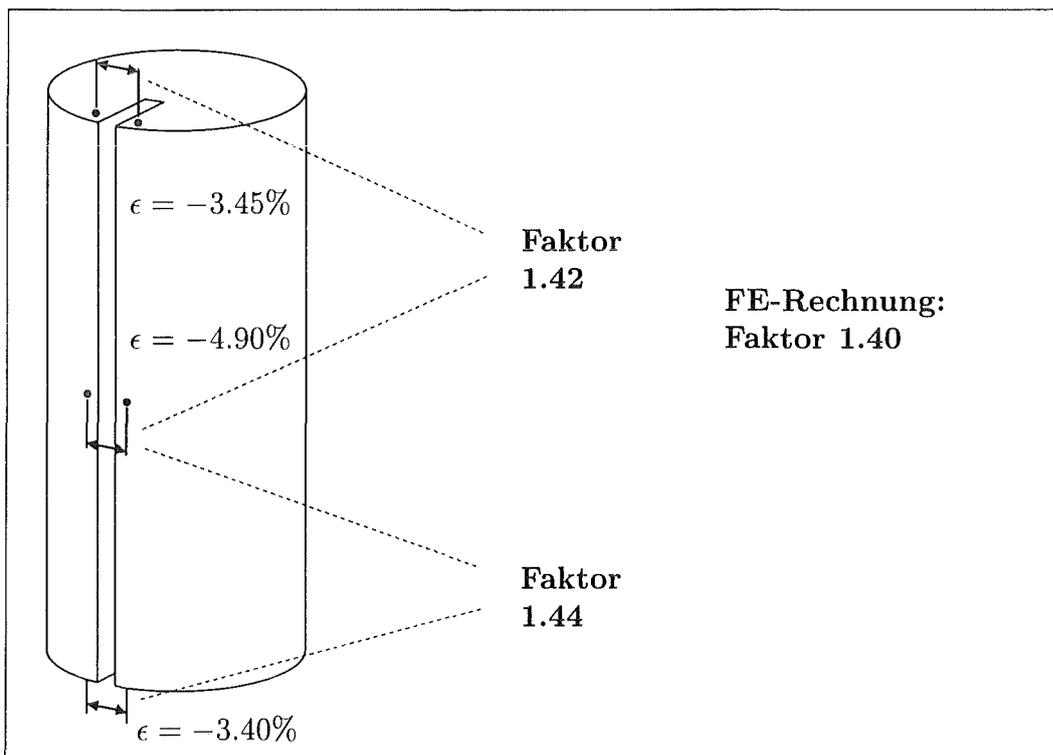


Abbildung 54: Hirnschnitteinfluß auf die Tangentialeigenspannungen im realen Stamm und im FE-Modell.

Fall, so ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung der Relationen. Auf den beiden Stirnflächen des Eichenstammstückes betragen die gemessenen Verschiebungen das 1.42- bzw. 1.44-fache der Messung im Vollstamm im Abstand des zweifachen Stammdurchmessers von der Hirnschnittfläche. Das FE-Modell liefert einen Faktor von 1.40. Geht man davon aus, daß in dem gewählten Abstand das freie Ende keinen Einfluß mehr auf die Eigenspannungsverteilung nimmt, so zeigen Theorie und Praxis, daß man die mit der Methode

der Gewichtsfunktion oder alternativ mit FE ermittelten tangentialen Eigenspannungswerte nur noch mit einem Korrekturfaktor von 1.4 zu multiplizieren hat, um den Einfluß der umgelagerten Längseigenspannungen, die dort zusätzlichen radialen und tangentialen Zug bewirken, zu eliminieren. Die Tatsache, daß die Scheiben aufgrund ihrer Dicke von ca. 10 cm eigentlich gleich zwei freie Enden aufweisen, ändert nicht viel an diesem Wert. Ein Vergleich der Viertelmodelle einer Scheibe und des realen Stammzylinders bei gleicher Aufheizung bzw. Abkühlung, also gleichem Potential zur Eigenspannungserzeugung ergibt einen Faktor von 1.37 zwischen Vollstamm und Scheibenoberfläche. Schneidet man das in der Mitte liegende Nagelpaar des realen Stammzylinders in Form einer 10 cm-Scheibe frei, ergibt sich eine um den Faktor 1.41 höhere Dehnung gegenüber dem geschlitzten Zustand vor dem Freischnitt.

Mit der Radialschnittmethode und den beiden alternativen Möglichkeiten der Auswertung ist man nun unter Berücksichtigung der freien Enden mit dem Faktor 1.4 in der Lage, die tangentialen Wachstumsspannungen im grünen Bäumen schnell und sicher zu bestimmen. Für Buche müssen nur noch die am Baum gemessenen Werte für Radius, Schnittlänge und Schnittuferverschiebung in Abbildung 55 eingesetzt werden, um die entsprechenden Tangentialeigenspannungen an der Stammoberfläche zu erhalten. Die Abbildungen 56 und 57 zeigen die entsprechenden Kennfelder für Eiche und Douglasie, für die ebenfalls Messungen durchgeführt werden. Den drei Diagrammen liegen folgende Werte für die Orthotropiedaten zugrunde [50, 88]:

Baumart	$E_r$ [GPa]	$E_\phi$ [GPa]	$E_l$ [GPa]	$\nu_{r\phi}$	$\nu_{rl}$	$\nu_{\phi l}$	$G_{r\phi}$ [GPa]	$G_{rl}$ [GPa]	$G_{\phi l}$ [GPa]
Buche	0.76	0.49	9.80	0.7	0.04	0.02	0.17	0.73	0.67
Eiche	0.48	0.30	9.63	0.5	0.04	0.02	0.17	0.79	0.63
Douglasie	0.56	0.42	8.30	0.4	0.04	0.03	0.06	0.65	0.53

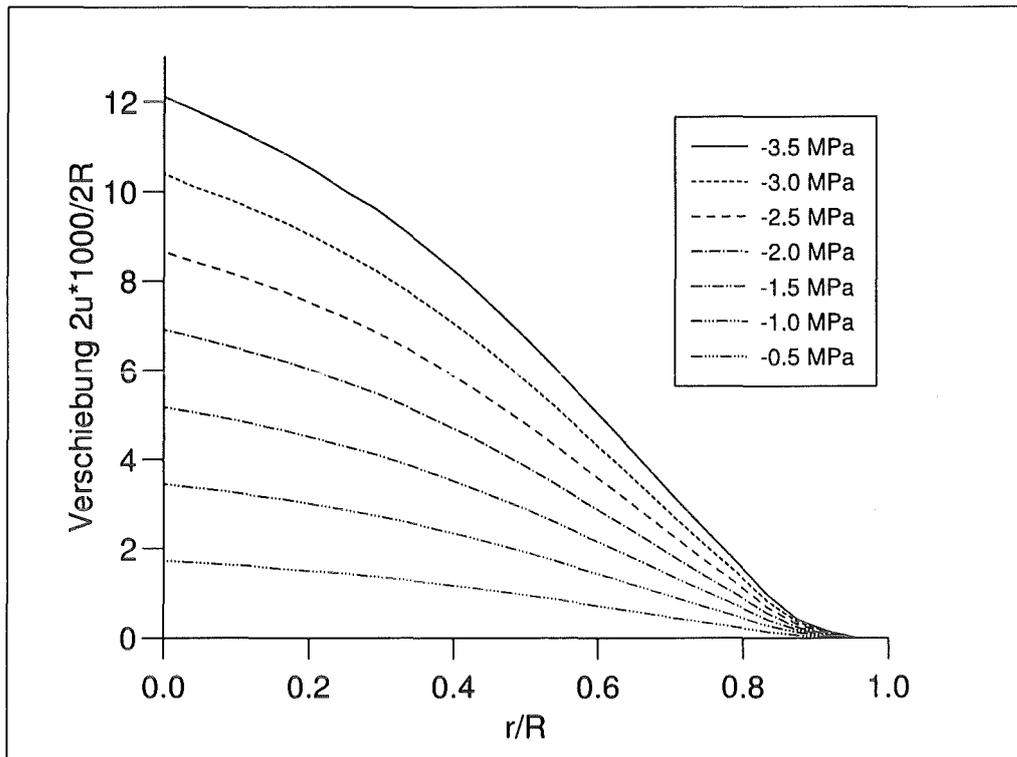


Abbildung 55: Kennfeld zur Bestimmung der tangentialen Wachstumsspannungen an Buche unter Berücksichtigung des Faktors 1.4.

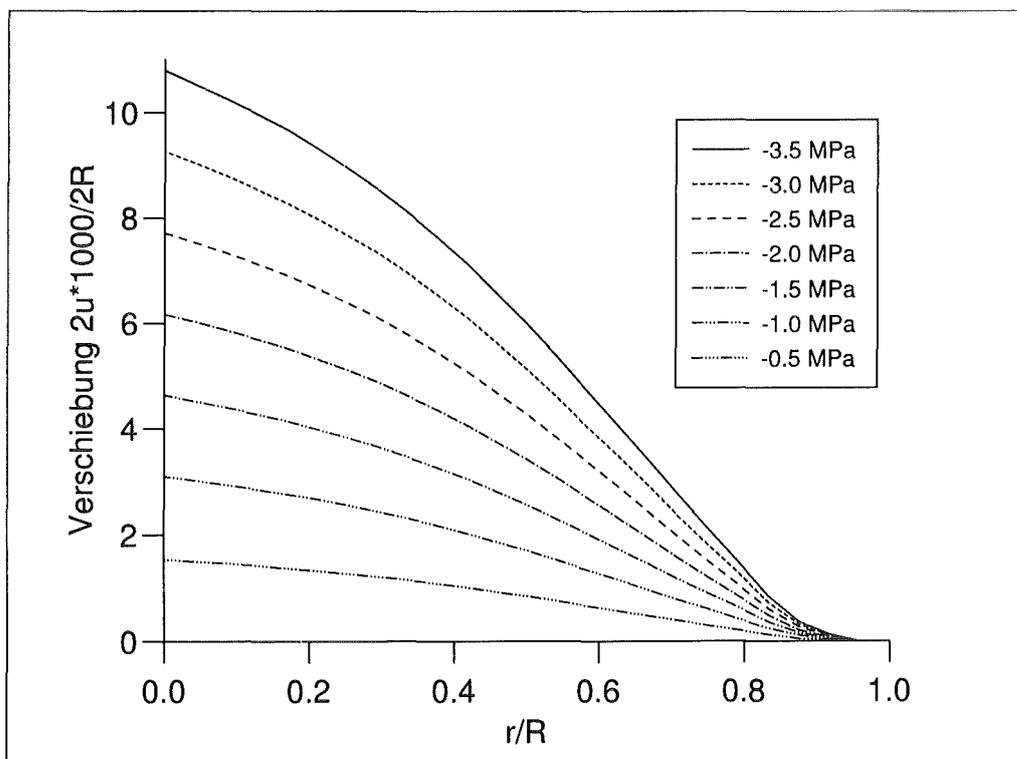


Abbildung 56: Kennfeld zur Bestimmung der tangentialen Wachstumsspannungen an Eiche (Faktor 1.4 berücksichtigt).

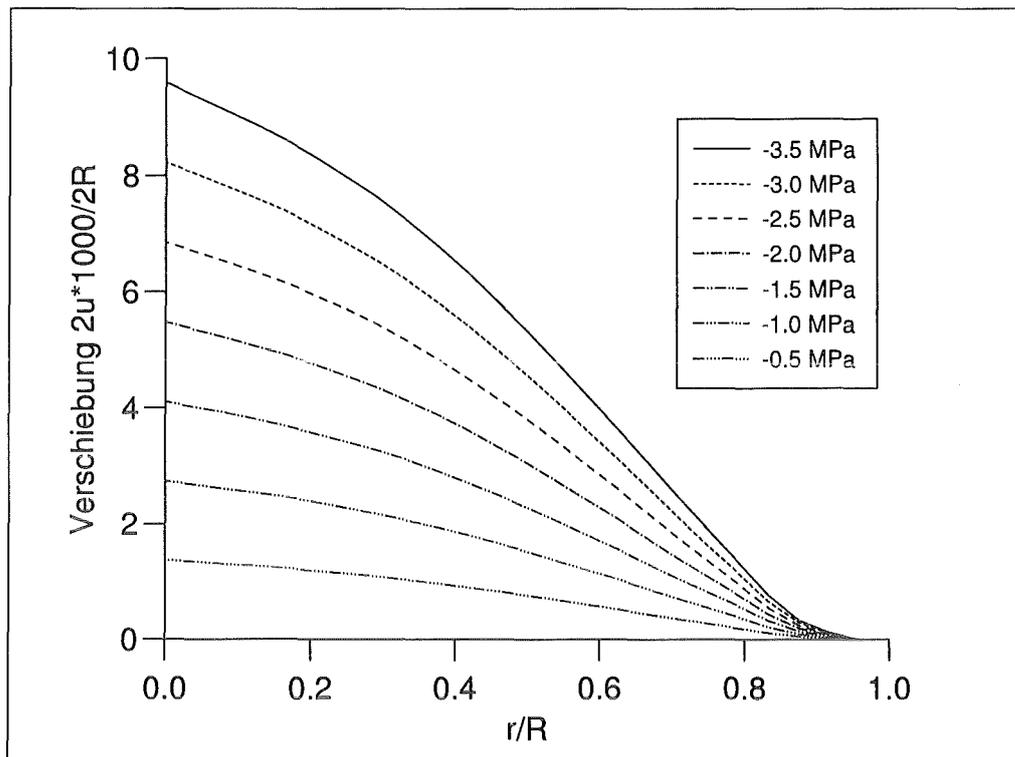


Abbildung 57: Kennfeld zur Bestimmung der tangentialen Wachstumsspannungen an Douglasie (Faktor 1.4 berücksichtigt).

## 6.5 Tangentiale Eigenspannungen an Säbelbäumen

Nachdem wir uns bereits ausführlich mit dem Phänomen der Bananenrisse in Säbelbäumen auseinandergesetzt haben und wir zu dem Schluß gekommen sind, daß mit der Festigkeit des Lignins eine physikalische Grenze für den Bruchwiderstand in tangentialer Richtung gegeben ist, wollen wir nun untersuchen, ob man auf der konvexen Unterseite gekrümmter Stammschäfte Anzeichen für eine präventive tangentialen Vorspannung vorfinden kann. Ein solcher Sachverhalt erschiene in höchstem Maße sinnvoll, nicht zuletzt, um die als schlafende Risse umschriebenen Holzstrahlen ruhig zu stellen.

Die Untersuchungen wurden an Buchen, Eichen und Douglasien in den Forsten um Ramberg im Pfälzer Wald vorgenommen. Die steilen Hanglagen in dieser Region bringen Bodenversetzungen mit sich, in deren Folge Bäume geneigt werden, die durch Anlagerung von Reaktionsholz ihrem Bestreben nach vertikaler Wuchsrichtung gemäß dem negativen Geotropismus nachgeben. Auf diese Art und Weise ergeben sich die für die Holzwirtschaft relativ unbrauchbaren, für uns jedoch äußerst interessanten krummen Stämme. Nach der Bestimmung der tangentialen Festigkeit wurde mit einem Winkelmesser der Krümmungsverlauf im interessierenden Bereich festgestellt. Dazu wurde im Abstand von jeweils 10 cm entlang des Stammes der Winkel der Stammlängsachse zur Horizontalen aufgenommen (Abb. 58). Aus der Differenz aufeinanderfolgend gemessener Winkel läßt sich dann der Neigungsgradient, d.h. die Krümmung errechnen, wie eingangs beschrieben wurde. Anschließend zersägte man den krummen Schaft in 10 cm dicke Scheiben. Nun wurden jeweils zwei Nägelpaare in die obere Stirnseite der Scheiben eingeschlagen. Das eine Paar im Bereich der konvexen Stammunterseite, das andere gegenüberliegend im Bereich der konkaven Oberseite. In der beschriebenen Weise wurden dann auf beiden Seiten mit der Radialschnittmethode die tangentialen Wachstumsspannungen bestimmt. Bereits der erste auf diese Art untersuchte Säbelbaum, eine Buche, zeigte, was alle weiteren Versuche bestätigen sollten. Die tangentialen Vorspannungen sind auf der vom Bananenriß gefährdeten Stammunterseite deutlich höher als auf der Oberseite (Abb. 59). Der lebende Baum scheint also klar die Gefahr erkannt zu haben und kommt dem „Speicheneffekt“ durch eine höhere Tangentialpressung der Holzstrahlen zuvor. Die Abbildungen 60 bis 63 zeigen weitere Buchen- und Eichenstämme, die durchweg die höheren Tangentialeigenspannungen auf der Stammunterseite aufweisen. Abbildung 64 zeigt die Eigenspannungsverläufe an einer Douglasie, also einem Nadelbaum, der anstelle des Zugholzes auf der Stammoberseite Druckholz auf der Unterseite angelagert hat. Auch hier sind die tangentialen Wachstumsspannungen eindeutig höher auf der Unterseite. Man erkennt aber auch, daß die generierten Tangentialeigenspannungen nicht so hoch sind, wie bei den Laubbäumen. Ein möglicher Grund dafür könnte der geringere Anteil der Holzstrahlen am Xylem der Nadelbäume sein. Die größeren, z.T. mehrreihigen Holzstrahlen der Buchen und v.a. der Eichen stellen ein erhöhtes Reißrisiko dar und werden entsprechend durch höhere Tangentialeigenspannungen in Schach gehalten.

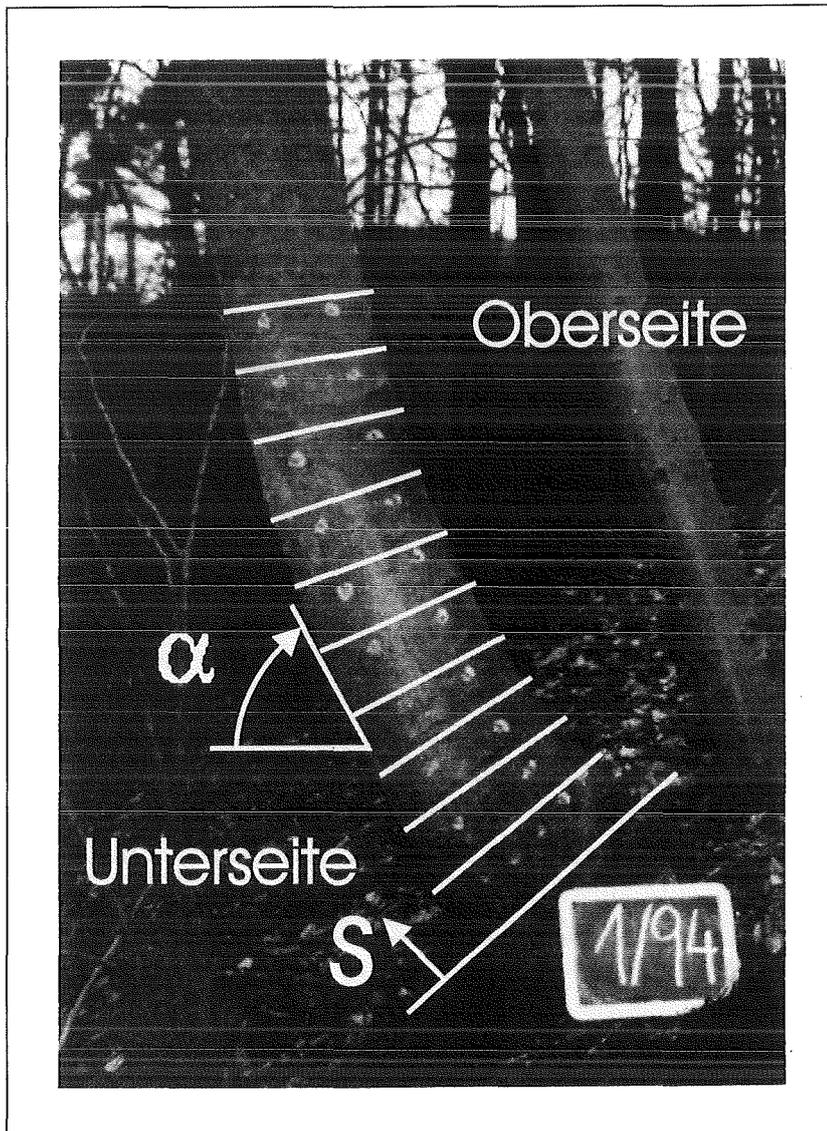


Abbildung 58: Messung des Stammwinkels zur Horizontalen und Lage der Sägeschnitte.

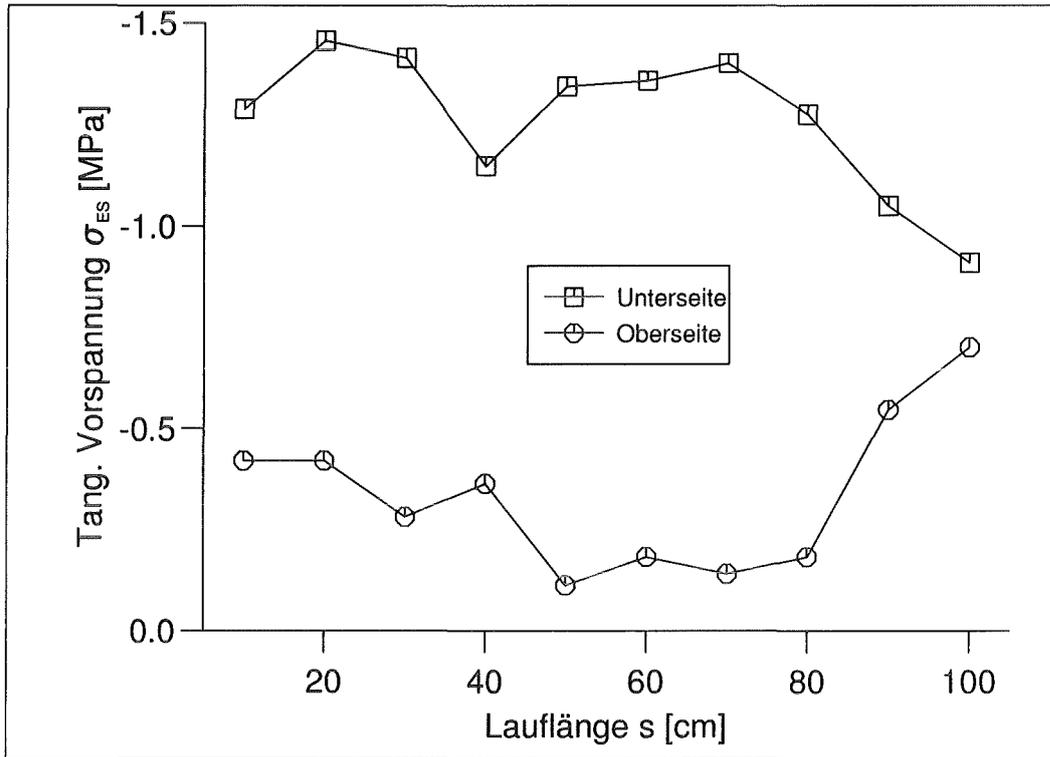


Abbildung 59: Tangentialeigenspannungsverläufe auf Ober- und Unterseite einer gekrümmten Buche. Die bananenrißgefährdete Unterseite weist die höheren Werte auf.

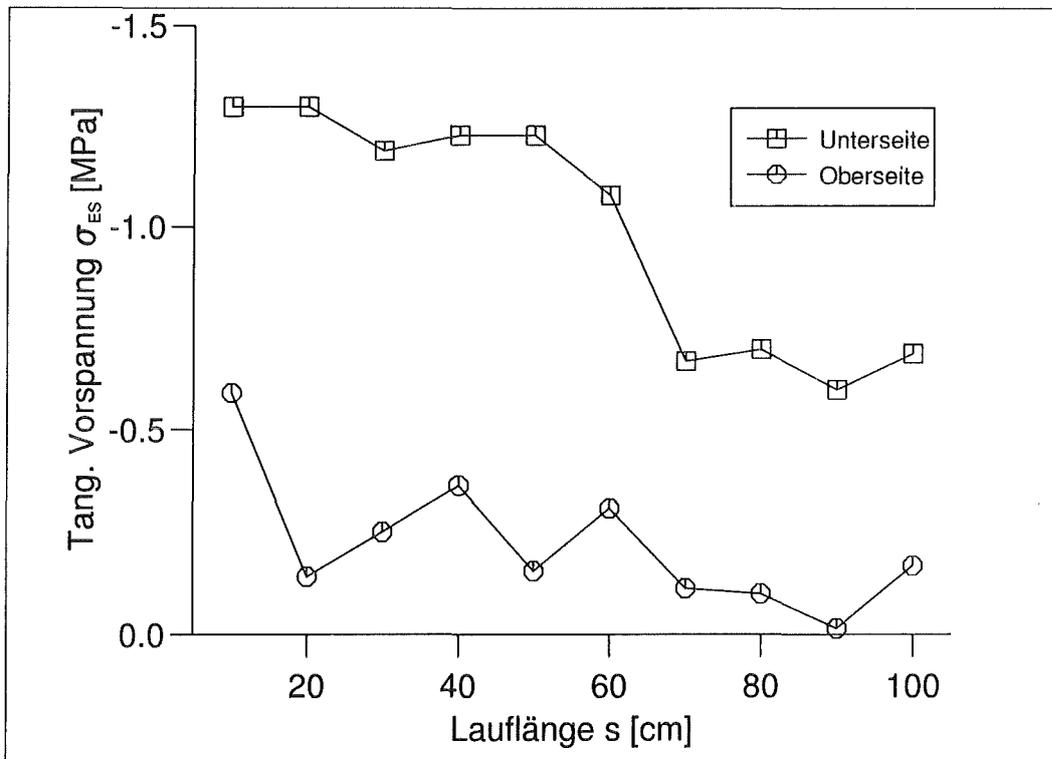


Abbildung 60: Tangentialeigenspannungsverläufe auf Ober- und Unterseite einer gekrümmten Buche.

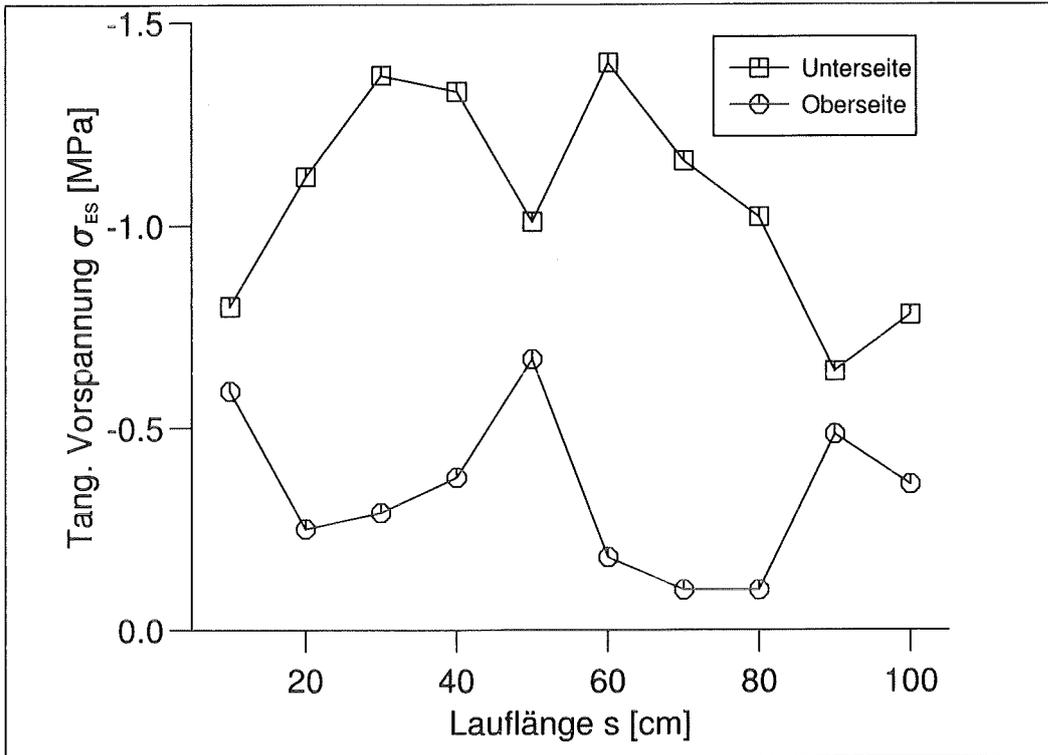


Abbildung 61: Tangentialeigenspannungsverläufe auf Ober- und Unterseite einer gekrümmten Buche.

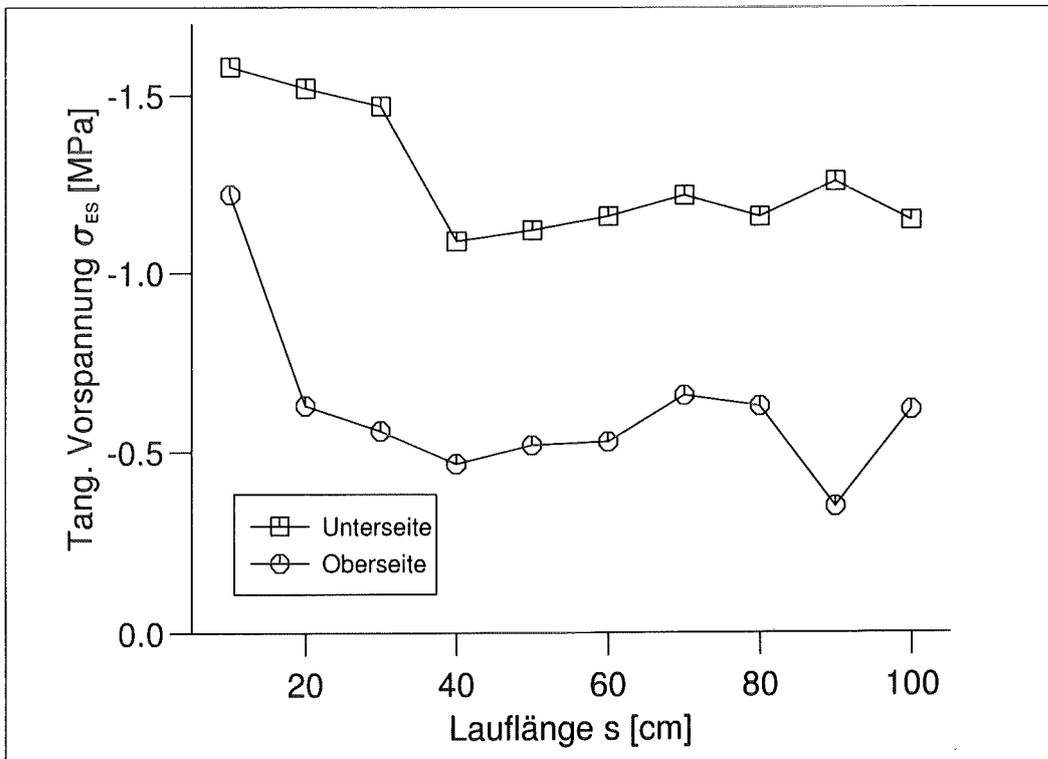


Abbildung 62: Tangentialeigenspannungsverläufe auf Ober- und Unterseite einer gekrümmten Eiche.

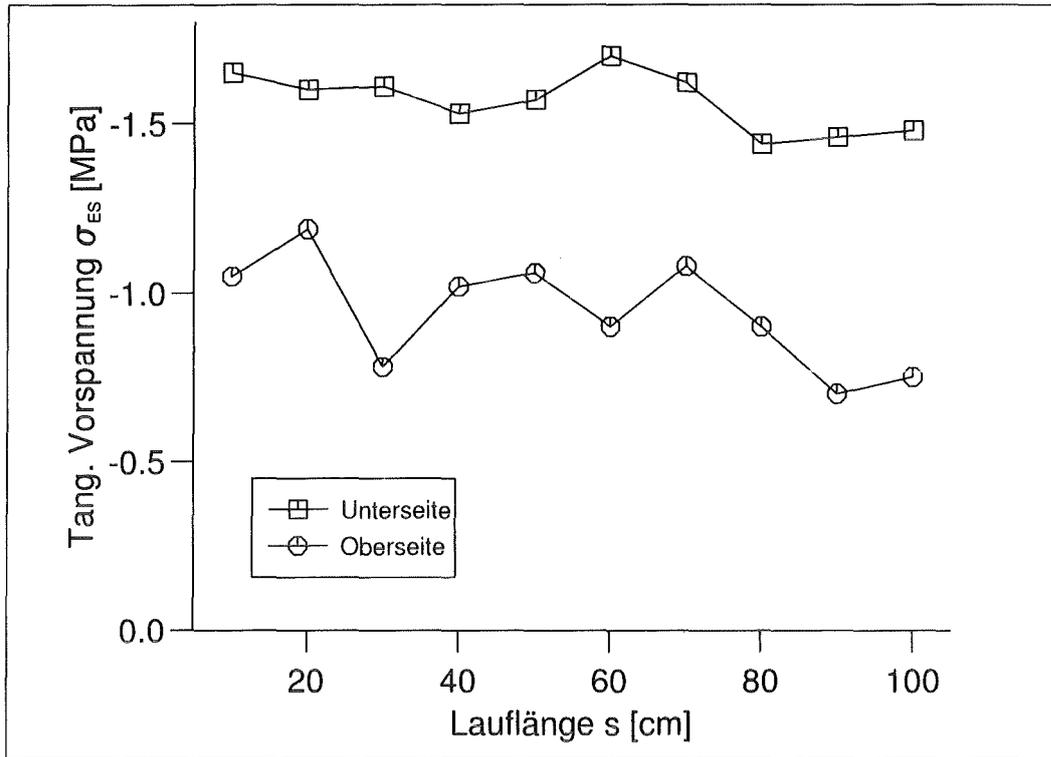


Abbildung 63: Tangentialeigenspannungsverläufe auf Ober- und Unterseite einer gekrümmten Eiche.

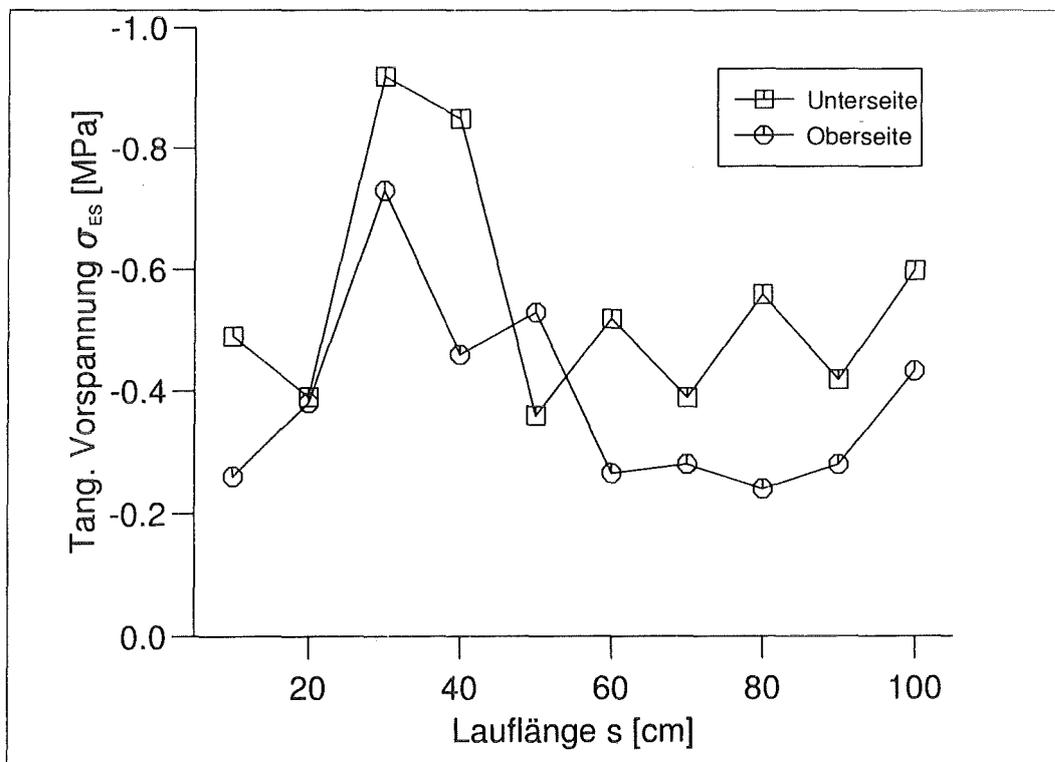


Abbildung 64: Tangentialeigenspannungsverläufe auf Ober- und Unterseite einer gekrümmten Douglasie.

### 6.5.1 Abhängigkeit von der Krümmung

Wir waren bereits zu dem Schluß gekommen, daß in einem gekrümmten, auf Biegung beanspruchten Zylinder die tangentialen Zugspannungen in dem Maße zunehmen, wie auch die Krümmung stärker wird. Ein Säbelbaum, dessen tangentiale Vorspannung entlang der Schaftunterseite überall gleich, dessen Krümmung aber nicht konstant wäre, würde somit an den Stellen starker Krümmung ein höheres Versagensrisiko eingehen, als in den Bereichen schwächerer Krümmung. Dem Axiom der konstanten Spannung kann der Baum nur gerecht werden, indem er durch unterschiedlich hohe Wachstumsspannungen die resultierende Spannungsverteilung korrigiert. Es gilt nun festzustellen, ob die Säbelbäume ihre tangentialen Eigenspannungen auch ihrer Krümmung anpassen können. Die Buchen stellen für solch eine Untersuchung die idealen Kandidaten dar, da sich ihre Stämme unter häufiger Krümmungsänderung, einer Bauchtänzerin gleich, nach oben schlängeln. Abbildung 65 zeigt, daß eine grüne Buche auch hier ihrer Rolle als sich selbst optimierende Struktur gerecht wird. Der Verlauf der tangentialen Vorspannung verläuft in gutem Ein-

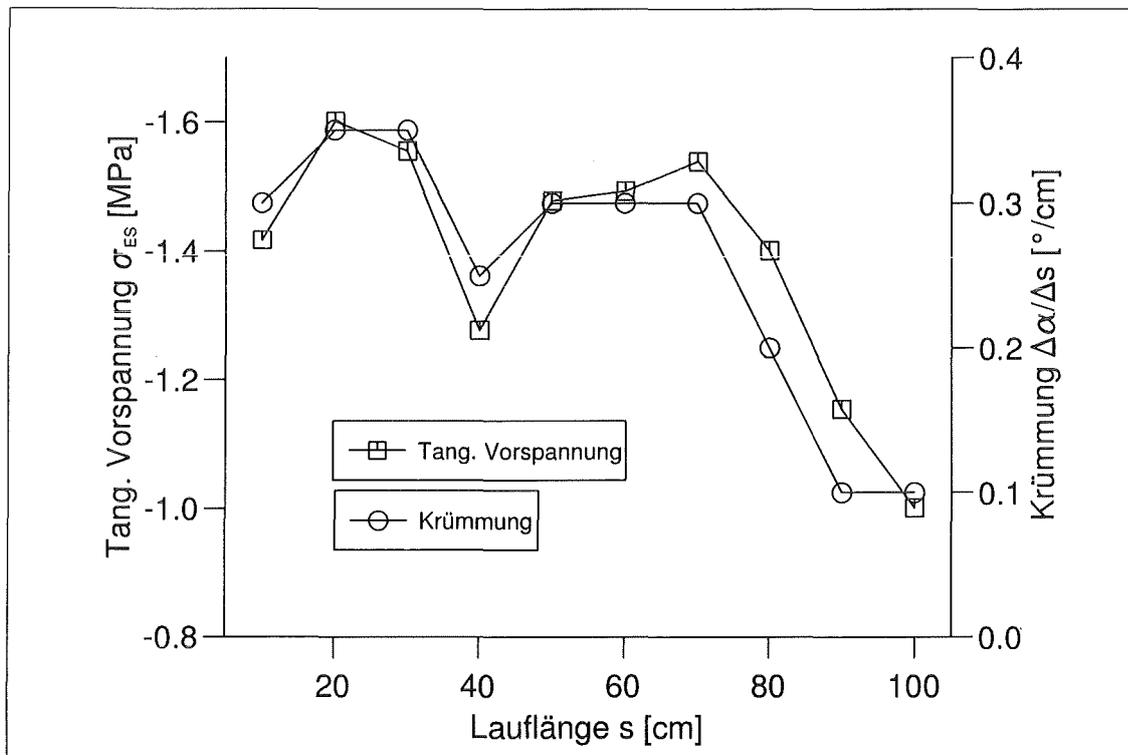


Abbildung 65: Die Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stammunterseite decken sich.

klang mit dem Krümmungsverlauf. An weiteren untersuchten Laubbäumen konnte dieser Sachverhalt bestätigt werden (Abb. 66 bis 73). Auch die Messungen an einer Douglasie zeigten einen an die Krümmung angepaßten Wachstumsspannungsverlauf (Abb. 74). Die höhere Astigkeit der Nadelbäume allgemein mag eine Rolle spielen, wenn es teilweise zu Abweichungen kommt, da man im Bereich eines Astes natürlich andere Faserverläufe und Spannungsverhältnisse erwarten muß als in astfreien Stammabschnitten. Die tangentialen Wachstumsspannungen im Bereich von Ästen wollen wir daher gesondert an einem geraden Stamm untersuchen. Für gekrümmte Schäfte kann man aber bereits folgendes festhalten:

- Die tangentialen Eigenspannungen sind auf der Stammunterseite höher. Dadurch wird dort dem seitlichen Ausknicken der Längsfasern um die Holzstrahlen (Speichen-effekt) entgegengesteuert. Auf der Stammoberseite sind die Wachstumsspannungen entsprechend niedriger, da die auf Zug beanspruchten Längsfasern die Holzstrahlen eher zusammenquetschen und eine Vorspannung unnötig machen.
- Je stärker der Stammschaft gekrümmt ist, umso höher sind auch die auftretenden Querkzugspannungen bei Biegung entgegen der Krümmung. Der Baum wirkt dem durch eine krümmungsgesteuerte Verteilung der Tangentialeigenspannungen entgegen.
- Trotz der unterschiedlichen Beschaffenheit und des gegenläufigen Anlagerungsortes ihrer Reaktionsgewebe zeigen sowohl Laub- als auch Nadelbäume eine Tangential-eigenspannungsoptimierung an gekrümmten Schäften.

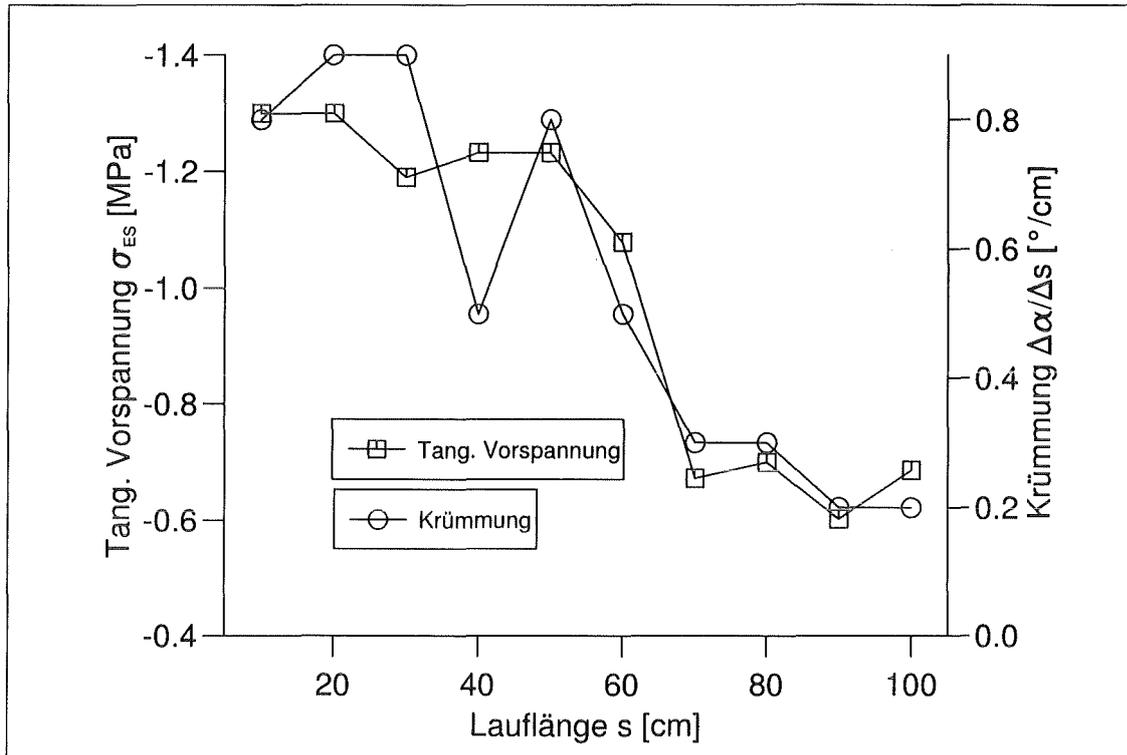


Abbildung 66: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stam-  
munterseite einer Buche.

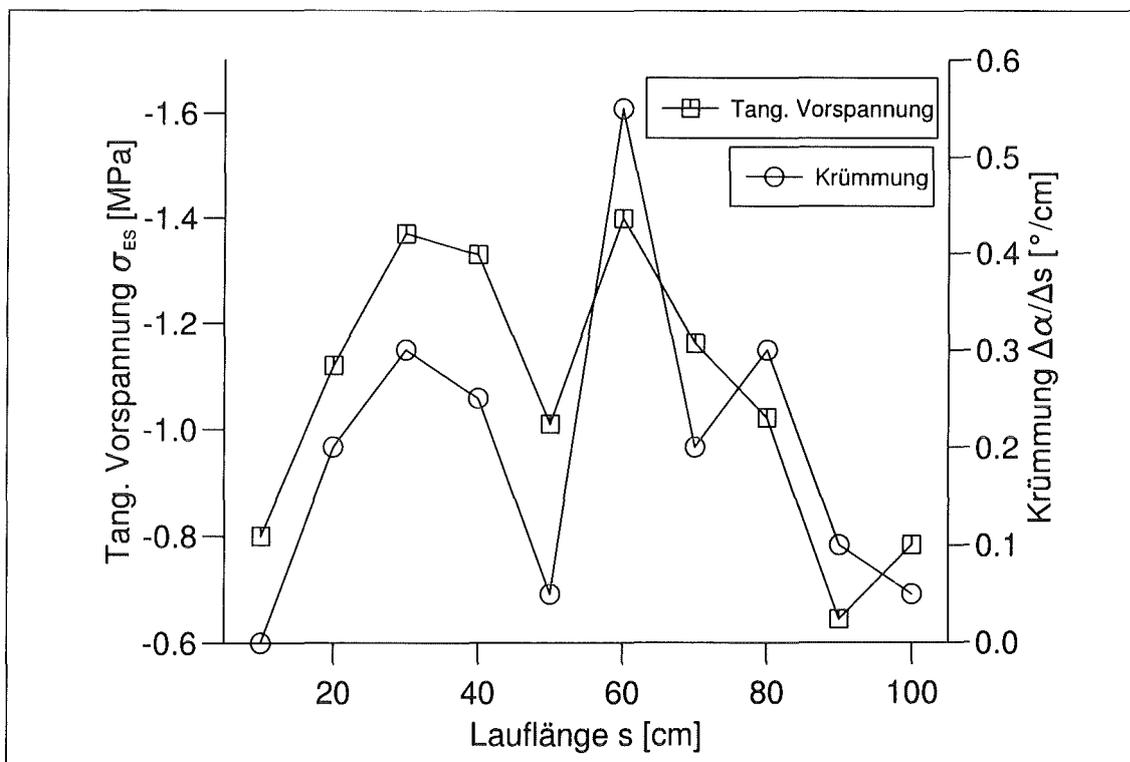


Abbildung 67: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stam-  
munterseite einer Buche.

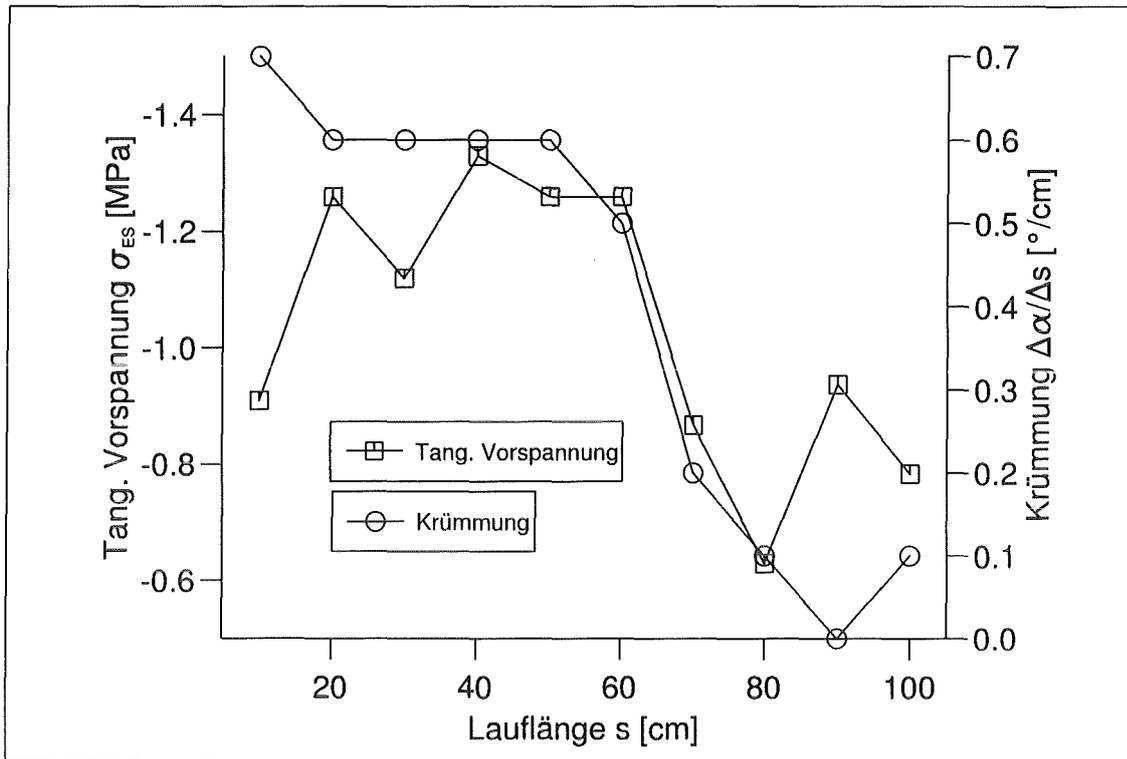


Abbildung 68: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stam-  
munterseite einer Buche.

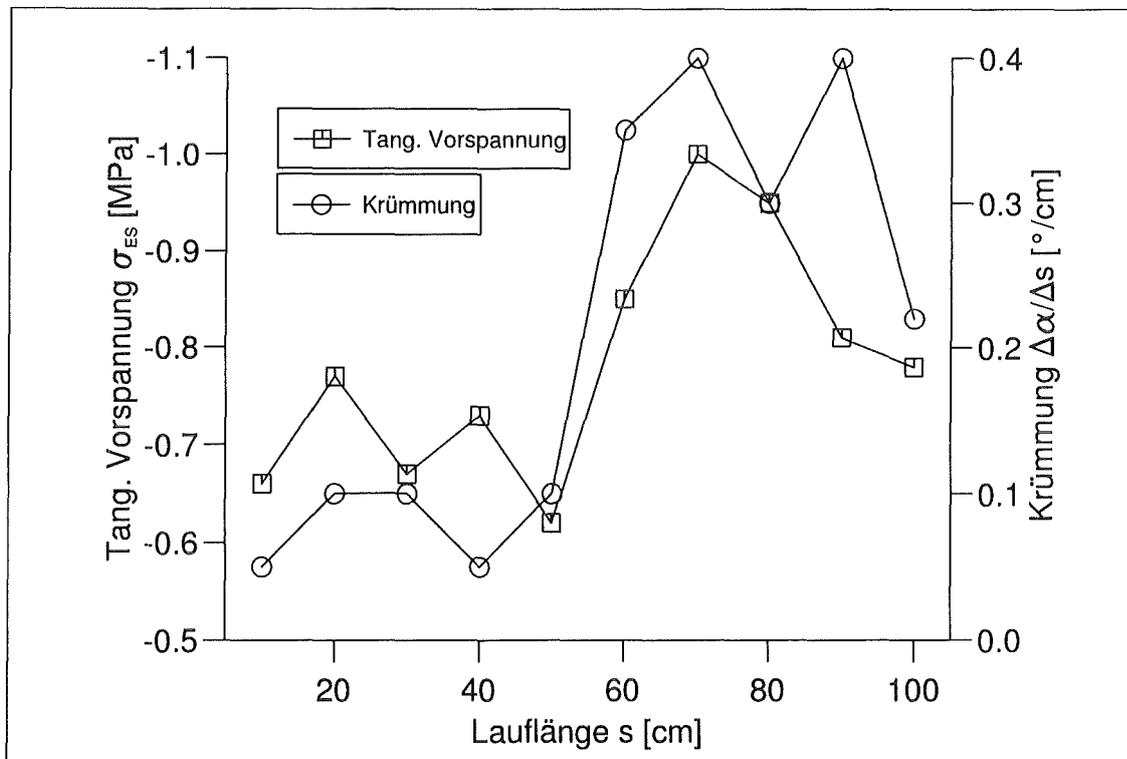


Abbildung 69: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stam-  
munterseite einer Buche.

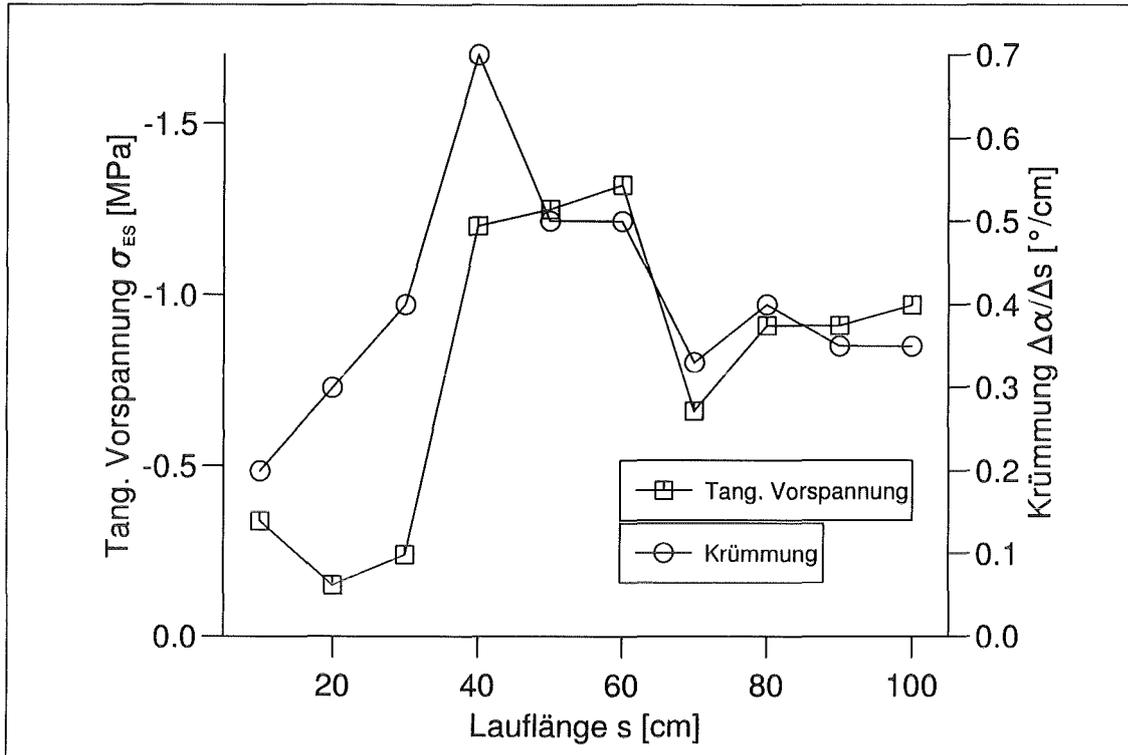


Abbildung 70: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenstressen auf der Stam-munterseite einer Buche.

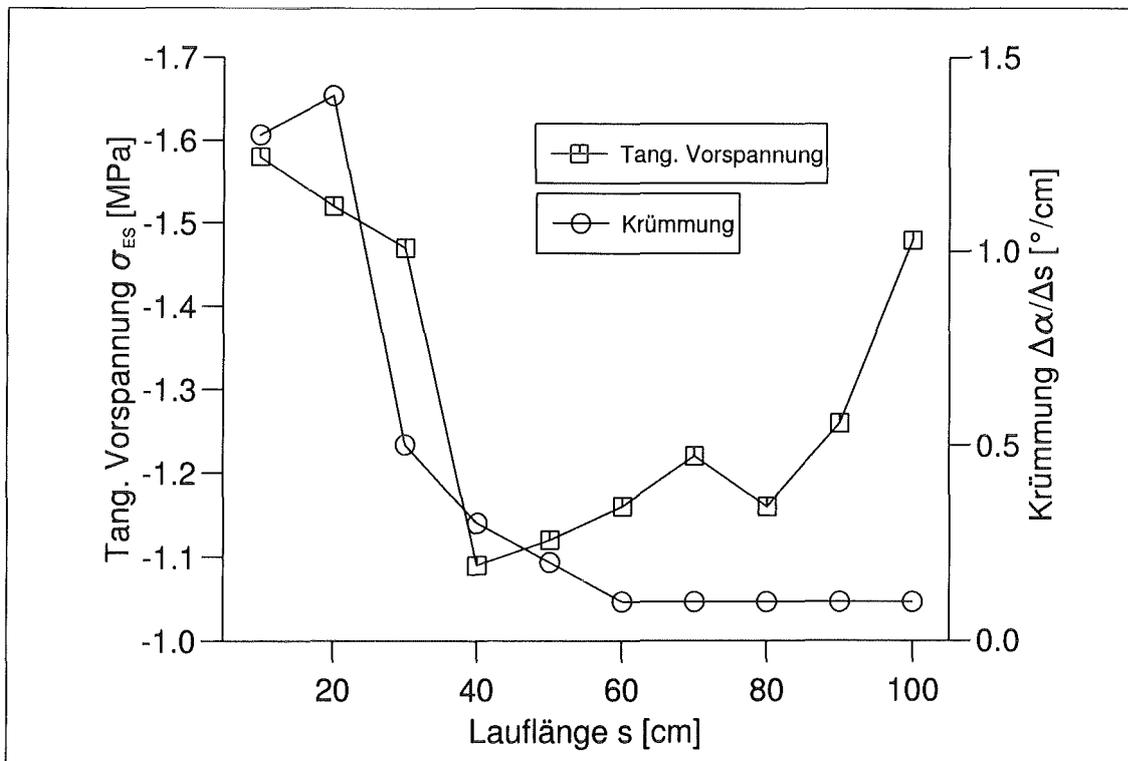


Abbildung 71: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenstressen auf der Stam-munterseite einer Eiche.

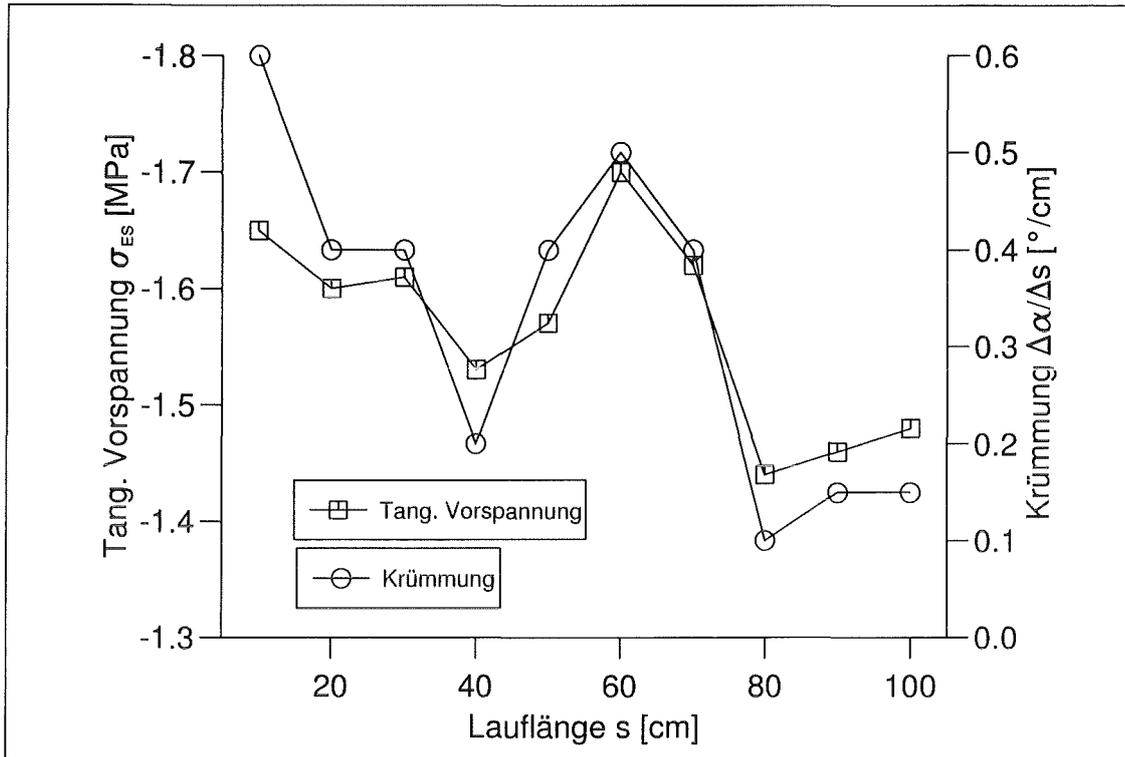


Abbildung 72: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stammunterseite einer Eiche.

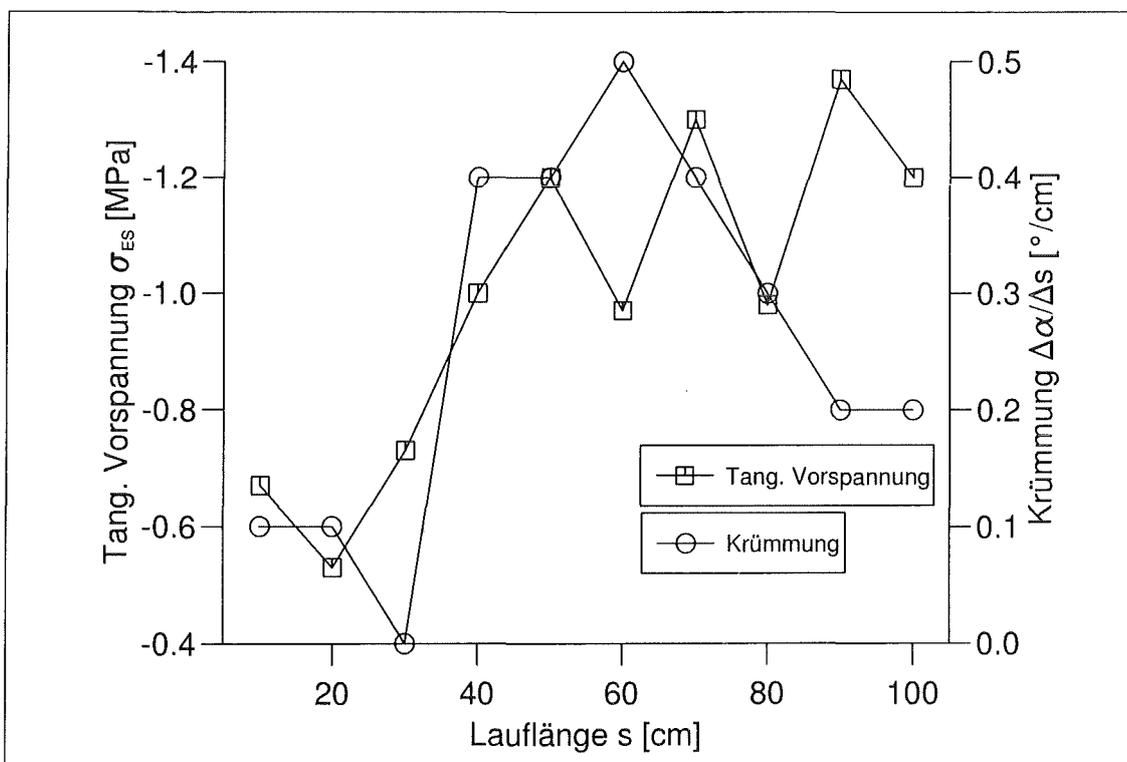


Abbildung 73: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stammunterseite einer Eiche.

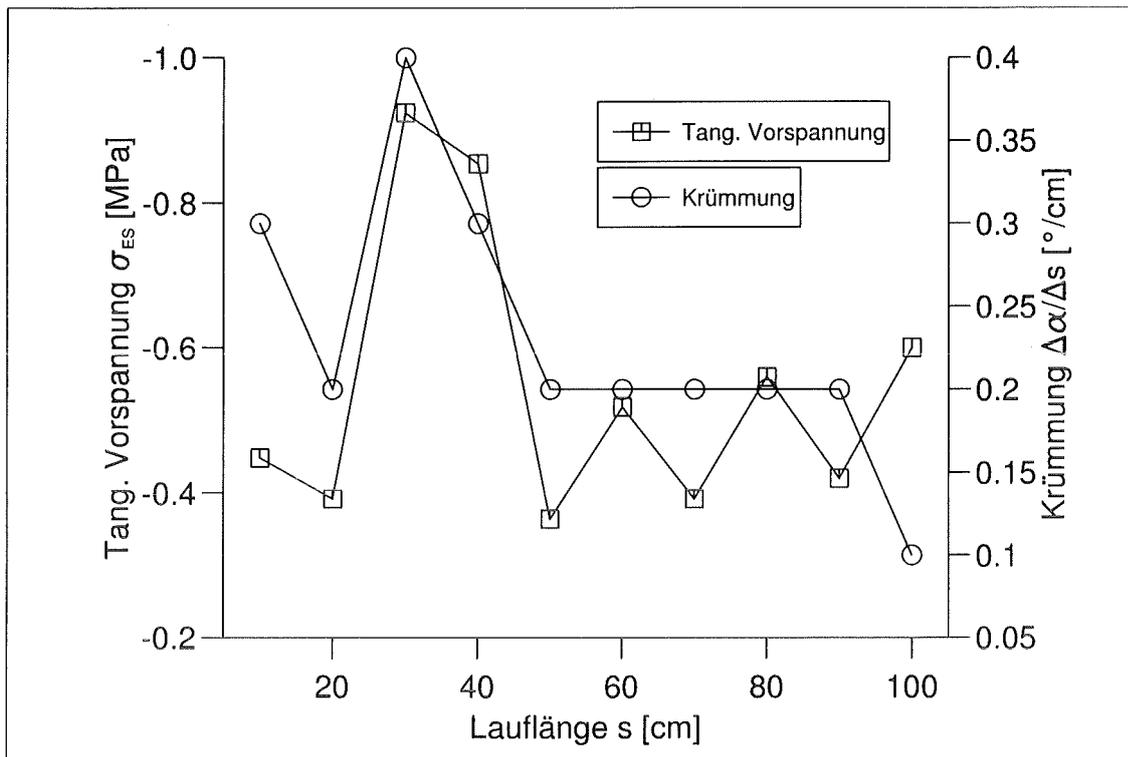


Abbildung 74: Verläufe der Krümmung und der Tangentialeigenspannungen auf der Stammunterseite einer Douglasie.

## 6.6 Weitere Beispiele für die Tangentialvorspannungsoptimierung

Im folgenden werden vier weitere Spezialfälle behandelt, die darauf hindeuten, daß Bäume tangentiale Vorspannungen gezielt dort einsetzen, wo diese von Vorteil sind, sie aber auch zu vermeiden wissen, wenn diese gefährlich werden könnten.

### 6.6.1 Der Einfluß von Ästen

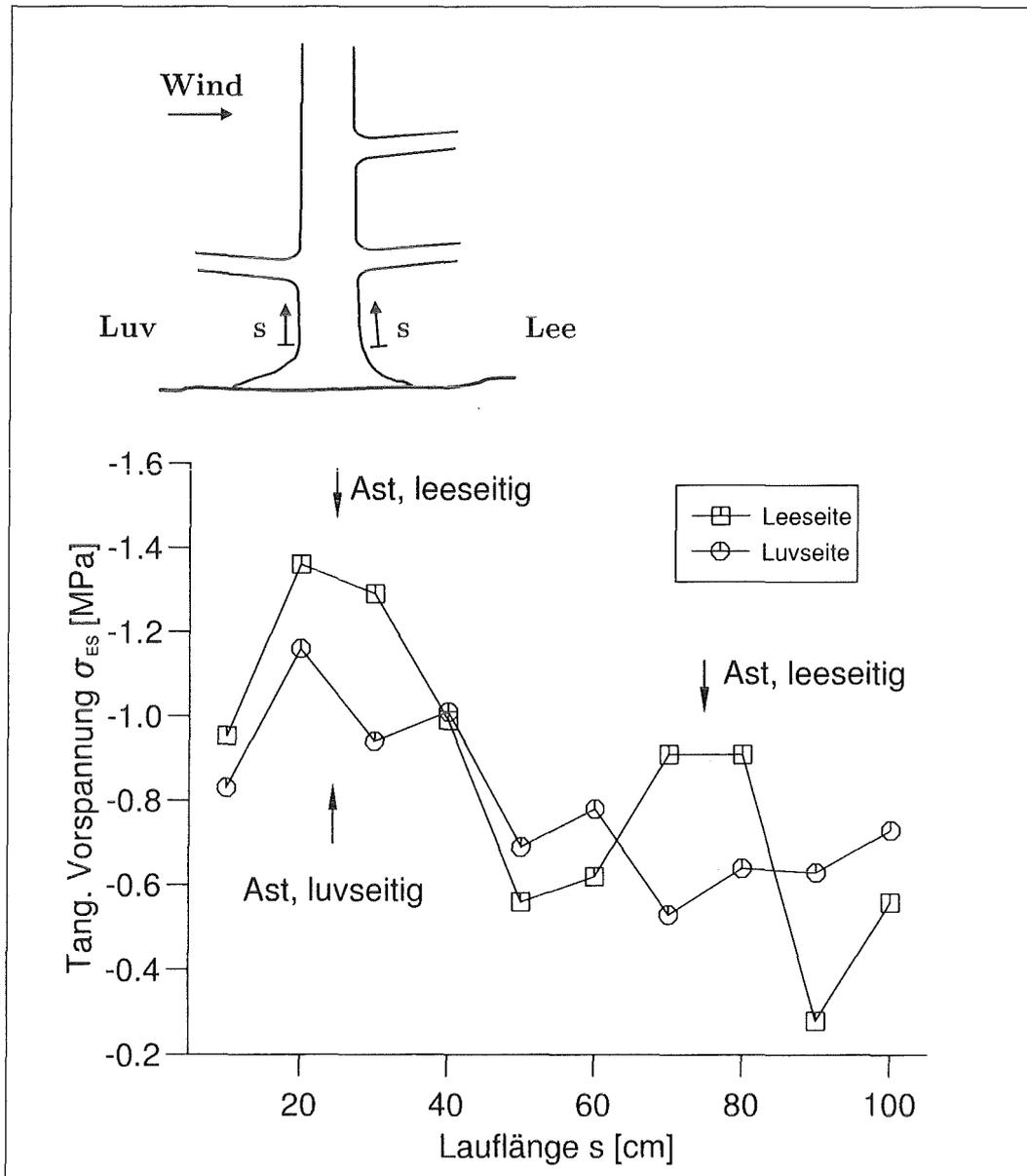


Abbildung 75: Im Bereich von Ästen herrschen in Buchenstämmen höhere Tangentialvorspannungen.

Zunächst einmal kann man jeden Ast als eine Schwachstelle des Hauptstammes ansehen, da hier analog zu den Holzstrahlen eine Führung der Längsfasern um ein radial verlaufendes „Hinderniss“ erfolgen muß. Auch im Falle des Astes werden die Längsfasern in

optimaler, Schubspannungen vermeidender Weise umgelenkt. Aber gleichzeitig tritt auch hier bei Längsdruck die Gefahr des tangentialen Faserausknickens im Sinne des Speichen-effektes auf. Wird der Ast selbst horizontal zur Seite gebogen, übt auch er eine seitliche Kraft auf die ihn umgebenden Längsfasern des Stammes aus. Es wäre also nur vernünftig, den Stamm im Bereich eines Astes tangential besonders stark vorzuspannen. Um zu analysieren, ob dies im grünen Baum auch tatsächlich der Fall ist, wurden astige Buchen- und Douglasienstämme mit der Radialschnittmethode untersucht. Für Buche zeigte sich, daß die Stämme im Astbereich tatsächlich stärker tangential unter Druck stehen, als in den glatten, astfreien Bereichen (Abb. 75). Während die Buche somit ihrer Rolle als

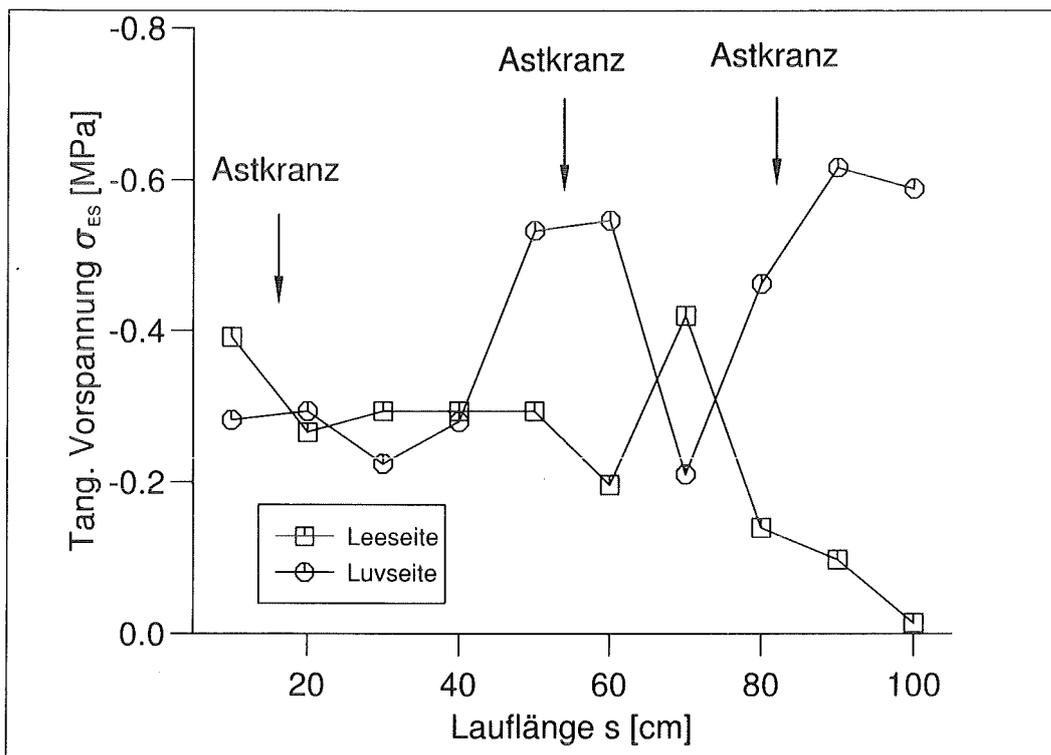


Abbildung 76: Für Douglasien ist kein Zusammenhang zwischen der Lage von Ästen und den Tangentialvorspannungen erkennen.

Hightech-Struktur gerecht wird, scheint die entstehungsgeschichtlich ältere und primitiver aufgebaute Douglasie hier keine oder vielleicht eine andere Strategie zu verfolgen, die bislang noch im Verborgenen liegt. Aus Abbildung 76 läßt sich keinerlei Zusammenhang zwischen der Höhe der Wachstumsspannungen und dem Vorhandensein von Ästen erkennen.

### 6.6.2 Die Schießscharte

Abbildung 77 zeigt eine Schießscharte in einem Buchenstamm. Eine solches Gebilde entsteht, wenn ein starker Ast, der in spitzen Winkel vom Stamm absteht, abstirbt. Er hinterläßt eine längliche Wunde im Stamm, die der Baum durch Reparaturwachstum so schnell wie möglich zu schließen versucht, da eine solche Schwachstelle im Sturm das Ende des Stammes bedeuten kann. Bis zur Schließung des Fensters muß der Baum aber erst einmal mit dieser Gefahr leben. Teilweise kann er das Risiko durch entsprechende



Abbildung 77: Tote Äste hinterlassen nach ihrem Abfallen eine Öffnung im Stammschaft, die an ein langes Fenster oder eine Schießcharte alter Burgen erinnert und natürlich ein Schadensrisiko in sich birgt.

Eigenspannungserzeugung senken, wie in unserem Beispiel. Die in Abbildung 77 gezeigte Schießcharte befand sich auf der Leeseite, also auf der Druckseite des Baumes bei Windbelastung. Abbildung 78 zeigt das unter Ausnutzung der Symmetrien auf ein Viertel beschränkte, dreidimensionale FE-Netz dieses Stammfensters. Beaufschlagt man das Modell mit Biegung, so ergibt sich ein lokales Maximum der tangentialen Zugspannungsverteilung direkt über der Öffnung. Bei ausreichend hoher Windlast könnte diese in ihren beiden Scheitelpunkten tangential derart versagen, daß dort ein Schaftlängsriß auftritt, der Stamm zerbröckelt. Die Schießcharte stellt neben dem Risiko der Querschnittsverflachung also zusätzlich eine Gefahr als „schlafender Riß“ dar, ähnlich den Holzstrahlen. Über der Öffnung tritt eine Spitze der Tangentialzugspannung auf, wie die FE-Analyse zeigt. Im Reststamm treten praktisch keine Tangentialspannungen auf, da es sich ja um einen geraden Stamm handelt. Die Untersuchung der realen Öffnung mit der Radialschnittmethode zeigte, daß der Baum die auftretende Gefahr gleichermaßen erkannt, wie auch gebannt hat. Abbildung 78 zeigt zwei Baumscheiben, eine aus dem Öffnungsrandbereich, die andere aus dem gesunden Vollstammbereich in ausreichender Entfernung des Fensters. Man erkennt deutlich die um den Faktor 1.8 höhere Tangentialvorspannung im gefährdeten Fensterauslauf. Gleichzeitig sieht man, daß auf der Zugseite die tangentialen Eigenspannungen im Fenster- und Vollstammbereich dagegen auf etwa gleichem Niveau liegen. Das Baumfenster stellt also ein weiteres Beispiel für die tangentialen Vorspannungsoptimierung dar.

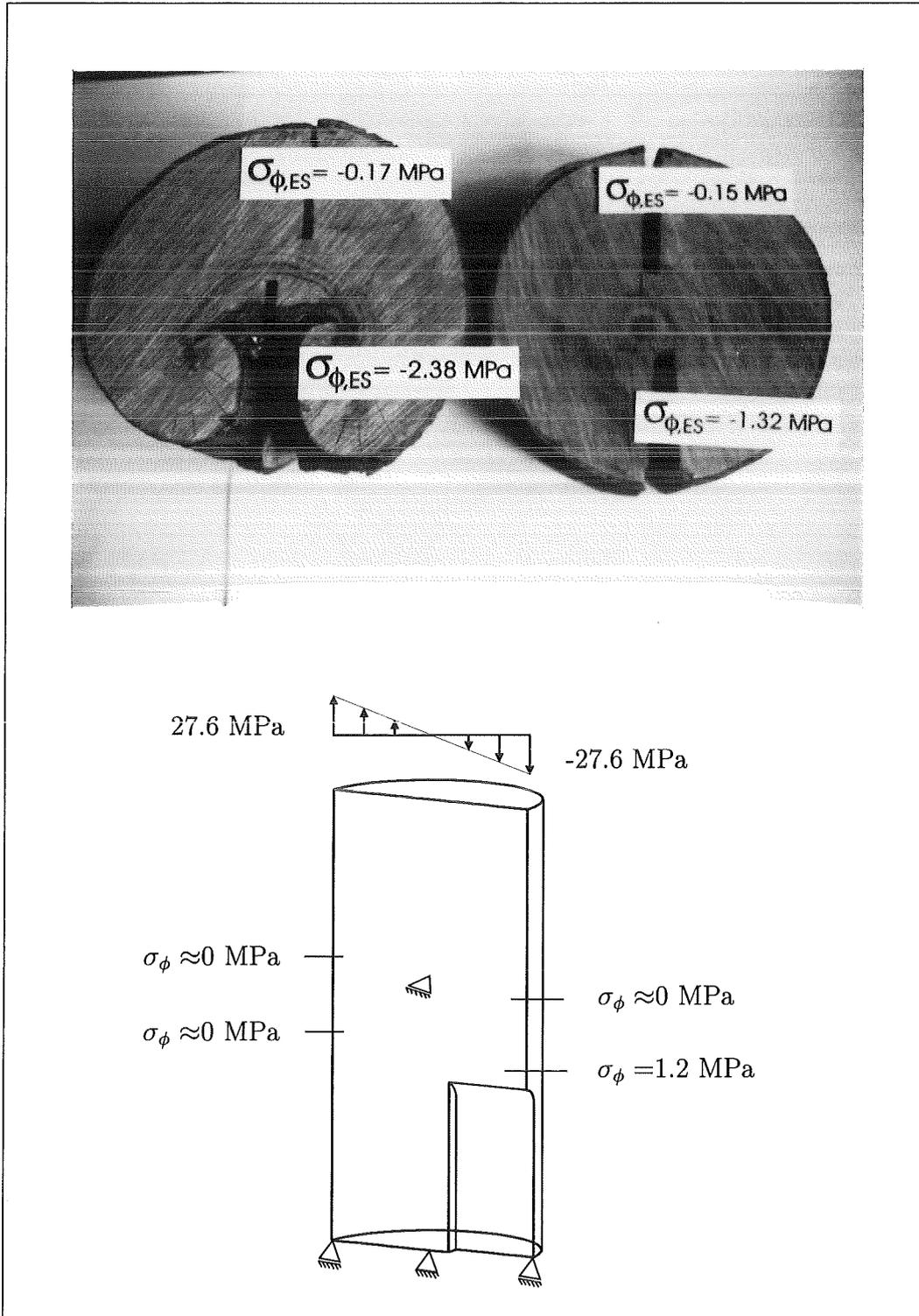


Abbildung 78: Im Bereich des Öffnungsscheitelpunktes weist der Baum fast doppelt so hohe Tangentialeigenstressen auf wie im Vollstammbereich auf der Druckseite der Biegung. Die Zugseite weist annähernd gleiche Eigenstresswerte in beiden Stammbereichen auf. Die FE-Rechnung des Fensters (Viertelstruktur) liefert denn auch einen deutlichen Anstieg der Tangentialeigenstressen um ein Vielfaches im Fensterbereich bei Biegebelastung.

### 6.6.3 Das Druckzwiesel

Druckzwiesel entstehen, wenn sich ein Stamm in seinem Verlauf in zwei etwa gleich dicke Stämme teilt. Die beiden Teilstämme werden nun zu Konkurrenten um das lebensnotwendige Sonnenlicht und unternehmen enorme Anstrengungen, um ihren Nebenbuhler zu überragen. Als Folge wachsen beide Stämme fast parallel in die Höhe. Dabei kommen sie sich im Bereich der Gabelung natürlich gegenseitig in die Quere. Die beiden Schäfte rücken sich aufgrund ihres Dickenwachstums zusehends näher, berühren sich, üben Druck aufeinander aus, den sie durch Vergrößerung der Kontaktflächen zu minimieren versuchen und vereinen sich zuletzt dann doch unter Bildung gemeinsamer Jahresringe. Gefährlich bleibt die dabei eingeschlossene Rinde, die einem Innenriß gleichkommt. Über diesen Einschluß hinweg kann kein Zug aufgenommen werden. Daher müssen die wenigen, gemeinsam gebildeten Jahresringe durch tangentialen Zug den inneren Druck ausgleichen, der im Bereich des Rindeneinschlusses von den beiden Kontrahenten aufgebaut wurde. Diesem gegenseitigen Druck eine zusätzliche innere Druckeigenspannung in tangentialer Richtung zu überlagern, würde geradezu Selbstmord bedeuten. Die Anwendung der Radialschnittmethode am Beispiel eines Buchendruckzwiesels zeigt, daß eine tangentielle Druckgenerierung zwar auch in Kontaktbereichen vorhanden ist, diese aber verglichen mit den Bereichen auf den von der Kontaktfläche abgewandten Stammseiten geringer gehalten wird (Abb. 79). Es wäre überaus interessant gewesen, die tangentialen Eigenspannungen direkt in den frisch gebildeten, gemeinsamen Jahresringen zu messen, da hier eine Druckvorspannung überaus sinnvoll wäre. Dies war jedoch nicht praktikabel, da man bei zwei bis drei Jahresringen einfach nicht tief genug sägen kann, um eine vernünftige Messung vornehmen zu können, ohne daß die beiden Stämme dort sofort auseinanderreißen. Da die qualitative Verteilung der tangentialen Wachstumsspannungen im Druckzwiesel nicht bekannt sind, wurde auf eine Umrechnung der Schnittuferverschiebungen verzichtet und stattdessen auf eine einheitliche Schnittlänge von 5 cm geachtet. Aber auch so wird deutlich, daß der Baum die tangentielle Vorspannung dort niedrig hält, wo sie unzweckmäßig ist oder sogar gefährlich werden könnte.

### 6.6.4 Der Beulenbaum

In einem abschließenden Beispiel soll gezeigt werden, wie ein Baum bei Versagen der einen Optimierungsstrategie auf eine andere zurückgreift, um letztendlich doch mechanisches Versagen zu verhindern. Abbildung 80 zeigt den Stamm einer Eiche, der durch eine beulenartige Verdickung auffällt. Kollmann ging bereits auf solche Überwallungswülste ein [46]. Nach Mattheck läßt eine über das normale Dickenwachstum hinaus gehende Materialanlagerung auf einen inneren Defekt schließen. Von Schwarze in Freiburg wurde eine holzanatomische Untersuchung in dem Bereich der Beule vorgenommen. Tatsächlich stellte sich heraus, daß örtlich geknickte Fasern auf der windabgewandten, druckbelasteten Seite vorlagen, worauf der Baum mit verstärktem Dickenwachstum reagiert hatte. Die Holzstrahlen in diesem Bereich wiesen zudem überaus niedrige Ligningehalte auf. Sie sind damit zugweicher, geben den Längsfasern damit mehr radiales Spiel und lassen eher ein Ausknicken auch in radialer Richtung zu. Abbildung 81 zeigt einen Ausschnitt aus dem geschädigten Bereich. Die geknickten Fasern wurden in dem dunkleren Bereich vorgefunden. Eine Untersuchung der tangentialen Festigkeitsverteilung und der Eigenspannungen mit der Radialschnittmethode auf der Luv- und der Leeseite im Bereich der Beule führte zu einem erstaunlichen Ergebnis. Während die tangentialen Eigenspannungen auf der

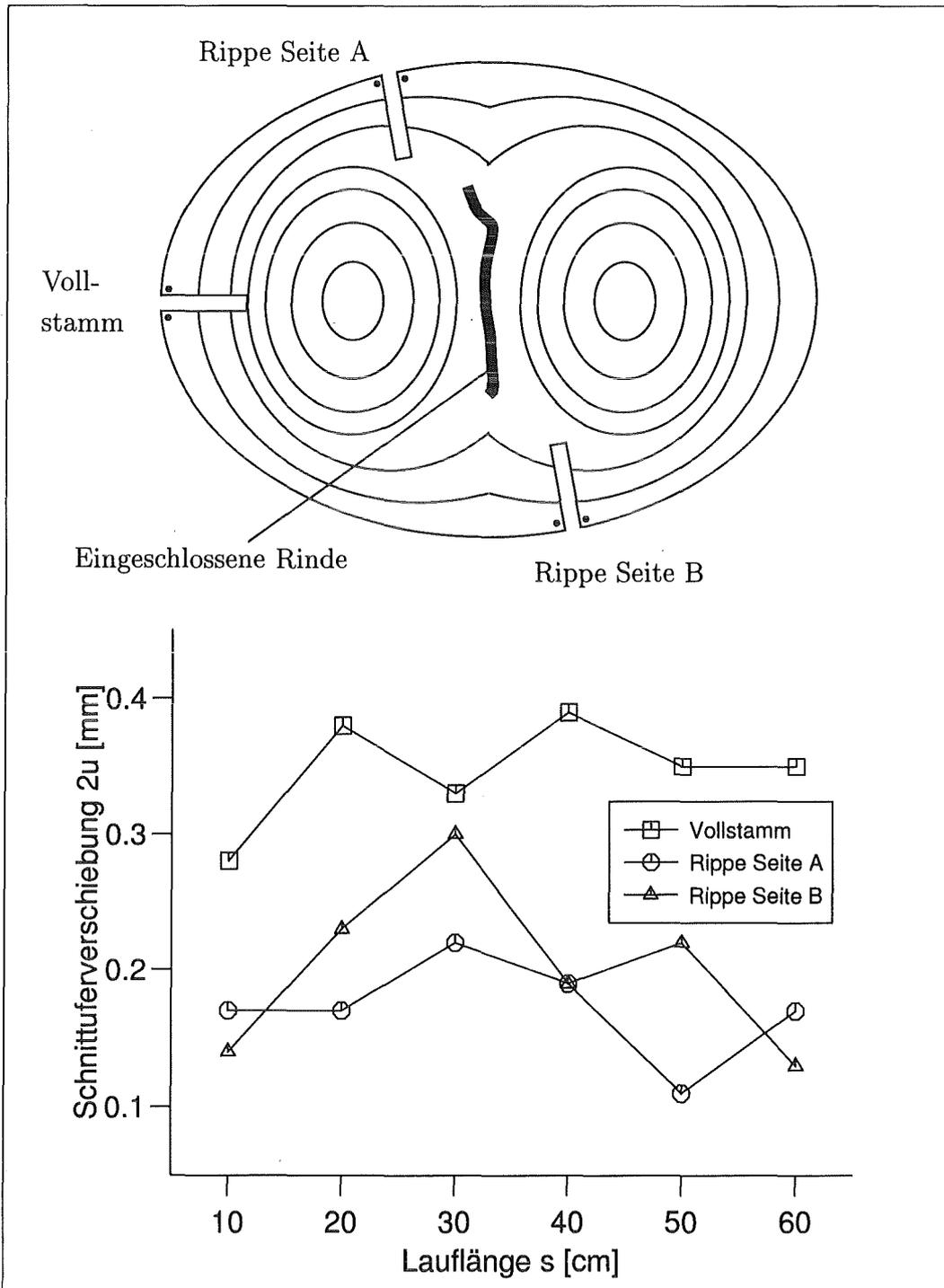


Abbildung 79: Die Tangentialeigenspannungen sind im Bereich der Kontaktfläche niedriger als in unbeteiligten Stammbereichen, wie aus den unterschiedlichen Sägeschnittverschiebungen zu ersehen ist.

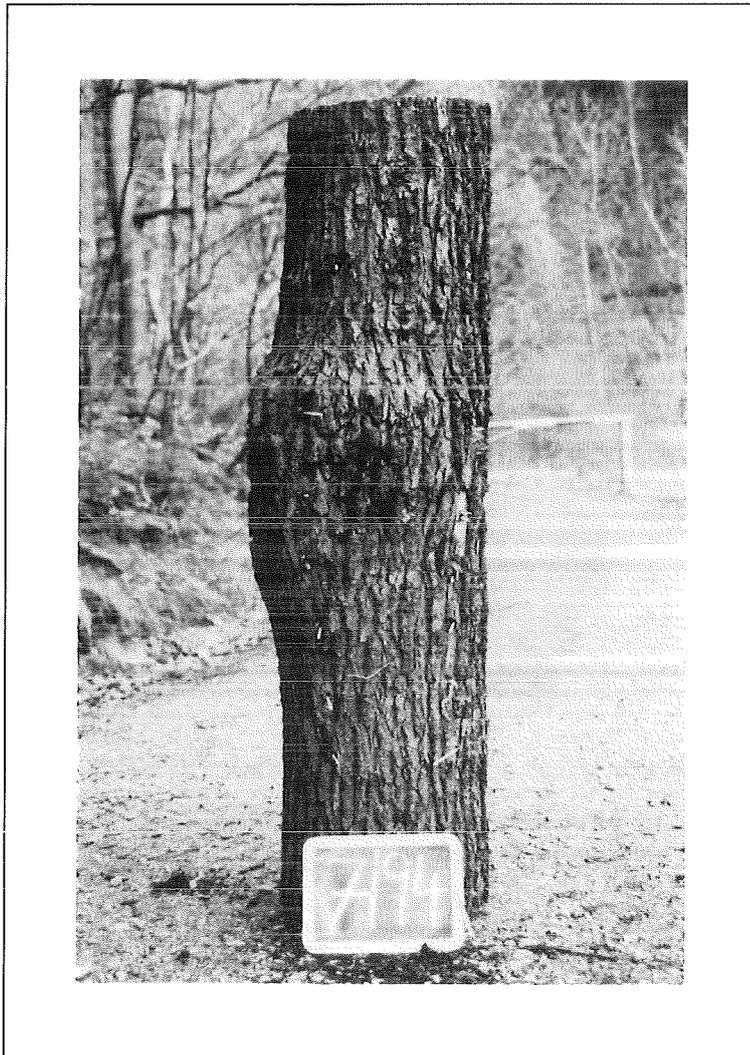


Abbildung 80: Beulenartige Verdickung auf der druckbeaufschlagten Leeseite einer Eiche.

ungeschädigten Luvseite ein lokales Maximum aufweisen, zeigt die mit der Beule behaftete Druckseite einen niedrigeren Vorspannungsverlauf, der offensichtlich mit dem Faserknicken in Verbindung steht und in den darauf folgenden Jahren des Reparaturwuchses nicht korrigiert werden konnte (Abb. 82). Die Strategie der tangentialen Vorspannung versagt offenbar. Da zieht diese Eiche gleichsam ihren letzten Trumpf aus dem Ärmel. Die über dem Knickbereich neu gebildeten Jahresringe weisen ein deutliches Maximum in der tangentialen Festigkeit auf (Abb. 83). Im Gegensatz dazu weist die tangentiale Festigkeit auf der ungeschädigten Zugseite der Biegung einen ausgesprochen gleichmäßigen und niedrigeren Verlauf auf. Es ist oft zum Überleben wichtig, alternative Strategien parat zu haben, wofür diese beulenbehaftete Eiche ein Beispiel ist. Auch Wildschweine verstecken sich, fliehen oder kämpfen, je nach gegebener Situation.



Abbildung 81: Geknickte Längsfasern in dem dunkleren Holzbereich veranlaßten diese Eiche zu verstärktem Dickenwachstum nach dem Axiom der konstanten Spannung.

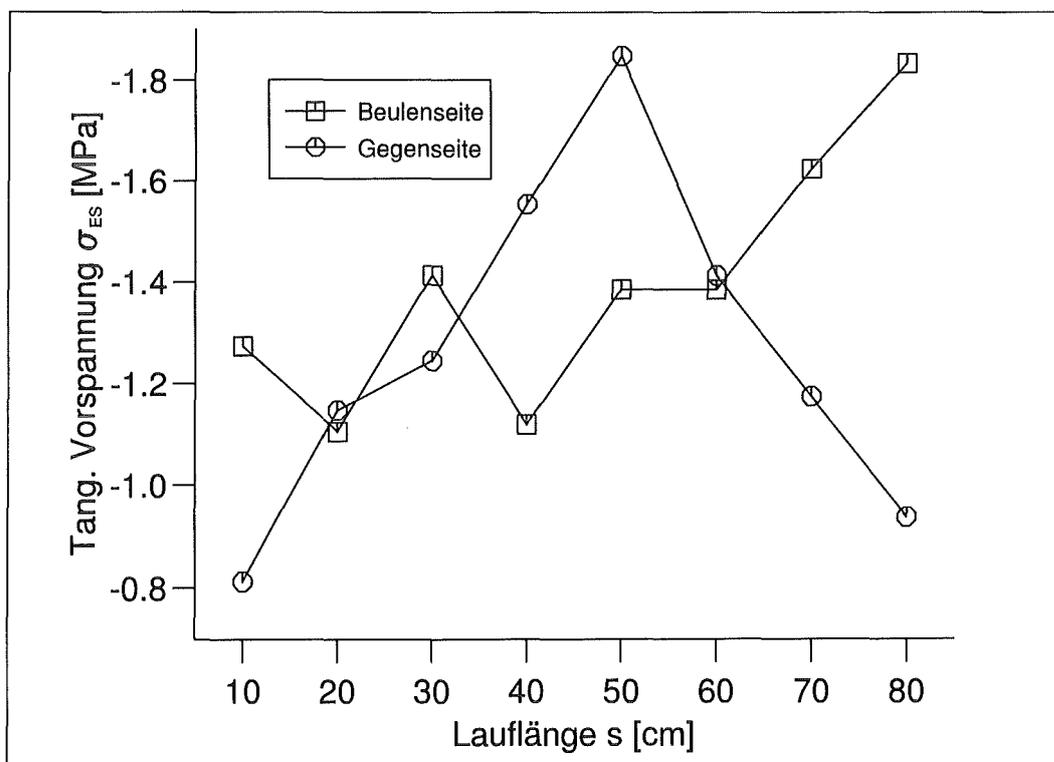


Abbildung 82: Tangentialeigenspannungsverteilung in Abhängigkeit des Stammverlaufes im Bereich des druckbelasteten Beulenbereiches und der zugbelasteten Gegenseite.

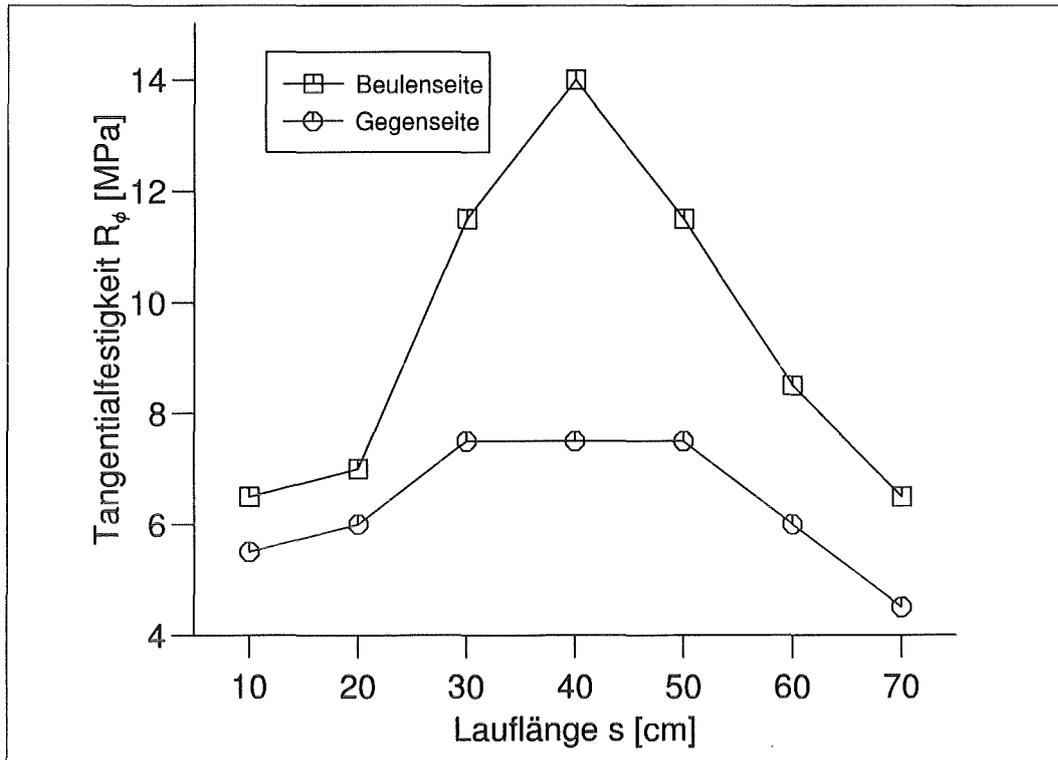


Abbildung 83: Tangentiale Festigkeitsverteilung in Abhängigkeit des Stammverlaufes im Bereich des Reparaturwuchses an der Beule im Vergleich mit der Zugseite.

## 7 Die Erzeugung der Wachstumsspannungen

Nachdem wir gesehen haben, daß die Verteilung der tangentialen Eigenspannungen ganz offensichtlich optimiert ist, stellt sich nun die Frage, wie der Baum dies bewerkstelligt. Die Antwort ist in der Anatomie des Holzes bzw. in der seiner Zellen zu suchen. Wie der Baum Spannungsspitzen detektiert und wie er diese Information auszuwerten weiß, ist eine Frage, die sicherlich von den Biologen beantwortet werden muß. Den Mechanikern obliegt die Aufgabe, das Zusammenspiel der einzelnen Zellkomponenten zu untersuchen, welches zu der günstigen Konstellation der Festigkeits-, Steifigkeits- und Wachstumsspannungsverteilungen führt. Im Falle der tangentialen Eigenspannungen soll an dieser Stelle ein Versuch unternommen werden, mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente die verschiedenen Zelltypen des Holzgewebes zu simulieren [65]. Dies wurde nach Kenntnis des Autors bislang in dieser Form noch nie versucht, sei es aus mangelndem Interesse seitens der Ingenieurwissenschaftler oder aus fehlendem FE-Knowhow seitens der Biologen. Letztere haben jedoch den unterschiedlichen Aufbau der einzelnen Zelltypen in zahlreichen Arbeiten untersucht und beschrieben, was uns die Grundlagen für den Versuch einer FE-Modellierung liefert. Dabei sind zweifellos zahlreiche Annahmen und Einschränkungen zu treffen. Münch, der vor fast 60 Jahren mit seinem Drahtmodell die Eigenschaften des spiraligen Zellaufbaus zu ergründen versuchte, hätte sicherlich ebenfalls die Chance, die die Methode der Finiten Elemente bietet, zu einer Zellsimulation genutzt [66]. Neben der Statik der Zellwände und dem aus ihr resultierenden Festigkeitsgewinn beschäftigte sich Münch auch mit der Dynamik der Holzzellen, also der Art und Weise, wie eine Zelle sich unter bestimmten Voraussetzungen in verschiedene Richtungen auszudehnen oder zusammenzuziehen vermag und dadurch Wachstumsspannungen erzeugt. Münch verwies dabei auf ein paar wichtige Faktoren, die in unserer FE-Simulation Eingang finden müssen. So bemerkte er, daß eine Quellung des Zellwandmaterials nur durch eine Einlagerung von Stoffteilchen zwischen den Micellen erfolgen kann. Bei diesen Stoffteilchen kann es sich um Wassermoleküle oder beispielsweise auch um Lignin handeln. Eine Quellung erfolgt also stets nur senkrecht zu den Micellen bzw. den Fibrillen als deren Zusammenschluß zu größeren Einheiten. Hieraus resultiert, daß eine Zelle mit einem sehr großen Fibrillenwinkel, also einer sehr flachen Wicklungsspirale, bei Stoffeinlagerung bevorzugt in der Zell-Längsachse quillt und somit Längsdruck aufzubauen vermag. Eine Zelle mit sehr kleinem Fibrillenwinkel, also einer sehr steilen Spirale, wird eher in die Breite schwellen und damit Druck quer zur Faserachse erzeugen. Diese Grundüberlegungen wollen wir uns später zunutze machen, um die Tauglichkeit unseres FE-Modells zu testen. In Abbildung 84 ist die erzeugte Modellstruktur mit ihrer Einspannung gezeigt, die ein freies Ausdehnen der Zelle unter Temperaturschwellung, mit der die eigentliche Quellung des Zellmaterials simulieren wird, ermöglicht. Dem Wandmaterial des Hohlzylindermodells wird über ein Fortranprogramm segmentweise die Orientierung der orthotropen Elastizitätseigenschaften und der richtungsabhängigen Ausdehnungskoeffizienten zuerteilt. Werte für Elastizitäts-, Schubmoduli und Querkontraktionszahlen des Zellwandmaterials lieferten Bodig & Jayne [10]. Für die zur Simulation der Zellschwellung benutzte Temperaturendeckung gilt, daß die Einlagerung von Stoffen zwischen den Fibrillen einen verschwindenden Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_l$  in Längsrichtung und gleichgroße Koeffizienten  $\alpha_r = \alpha_\phi$  in den beiden Querrichtungen erfordert. Man definiert bei der Ausrichtung der Materialorthotropie für jedes Wandelement ein lokales Zylinderkoordinatensystem, dessen Längsachse der Orientierung der Fibrillen folgt. Die korrekte Ausrichtung der Orthotropieeigenschaften

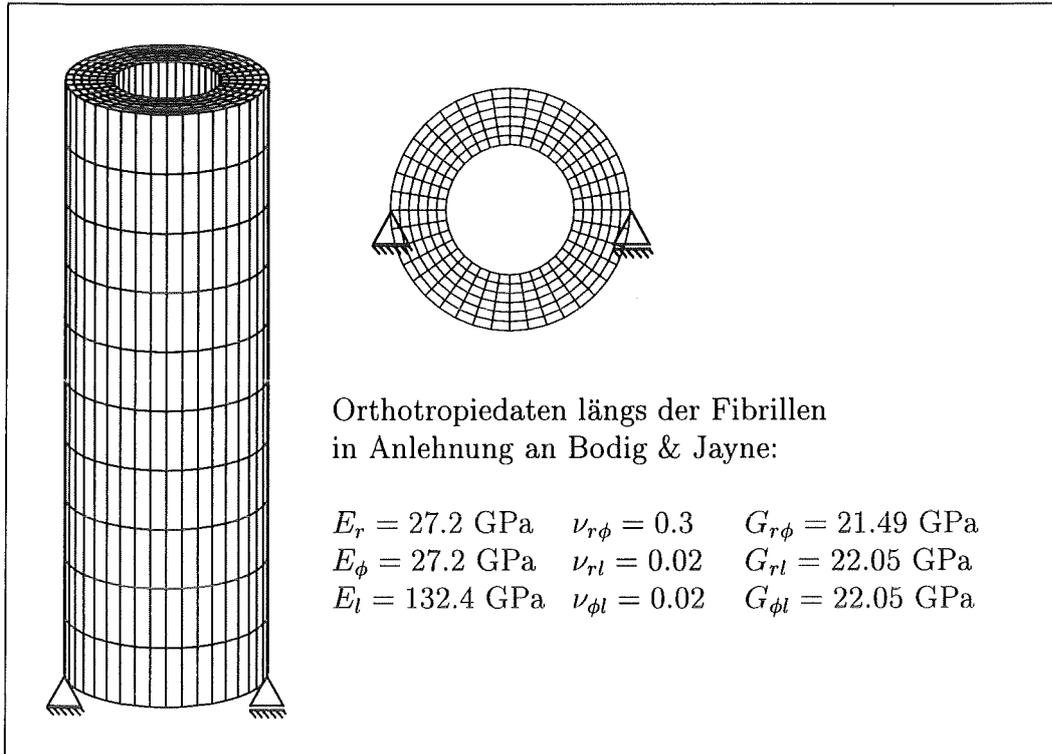


Abbildung 84: Die Einspannung des Zellmodells ist so gewählt, daß ein freies Schwellen der Struktur möglich ist.

wird durch zwei FE-Läufe überprüft. Im ersten Lauf werden die Fibrillen achsenparallel zu dem Hohlzylinder gelegt. Dies entspricht einem Fibrillenwinkel von 0 Grad. Für  $\Delta T\alpha_r = \Delta T\alpha_\phi = 1$  muß die FE-Rechnung eine Verdopplung der Wandstärke  $t$  ergeben. Der neue Außendurchmesser  $\phi_{neu}$  muß  $\phi_{alt} + 2t$  entsprechen. Die Länge des Hohlzylinders darf sich nicht ändern. In einem weiteren FE-Lauf wird eine Ausrichtung der Fibrillen in zirkumferentieller Richtung vorgenommen. Dies entspricht einem Fibrillenwinkel von 90 Grad. Für  $\Delta T\alpha_r = \Delta T\alpha_\phi = 1$  muß der Zylinder dann eine Verdopplung seiner Länge und seiner Wandstärke erfahren. Der Außendurchmesser darf sich nur um  $2t$  erhöhen. Es ist möglich, radial nebeneinander liegenden Elementen - in einem Segment zusammengefaßt - dasselbe lokale Koordinatensystem zu erteilen. Die beiden Testläufe zeigten, daß die Lage der Längsachsen dieser Zylinderkoordinatensysteme eine große Fehlerquelle darstellt. Am Beispiel für einen Fibrillenwinkel von 90 Grad wird dies am deutlichsten. Liegt die Achse des lokalen Zylinderkoordinatensystems zu nah an den zugehörigen Elementen, ergibt sich der in Abbildung 85 dargestellte Fehler. Da sich die Temperaturdehnung stets auf Modellknoten bezieht, liefern die Quellungen senkrecht zu den Fibrillen stets einen Anteil in Längsrichtung. Bei einem Fibrillenwinkel von 90 Grad darf das jedoch nicht der Fall sein. Dieser Fehler kann durch entsprechende Minimierung des Winkels  $\xi$  reduziert werden. Dazu werden die Achsen der lokalen Zylinderkoordinatensysteme weit aus dem Modell herausgelegt. Abbildung 86 zeigt den allgemeinen Fall der Koordinatenachslage für ein Segment. Mit dieser Korrektur führten die beiden angeführten Testläufe zu den erwarteten Ergebnis. Das Modell kann nun auf reale Zellkonstruktionen angesetzt werden. Dazu wird es mehrwandig aufgebaut und für die einzelnen Wände eine Ausrichtung der Fibrillen gemäß den in der Literatur zu findenden Angaben getroffen. Zunächst wollen wir

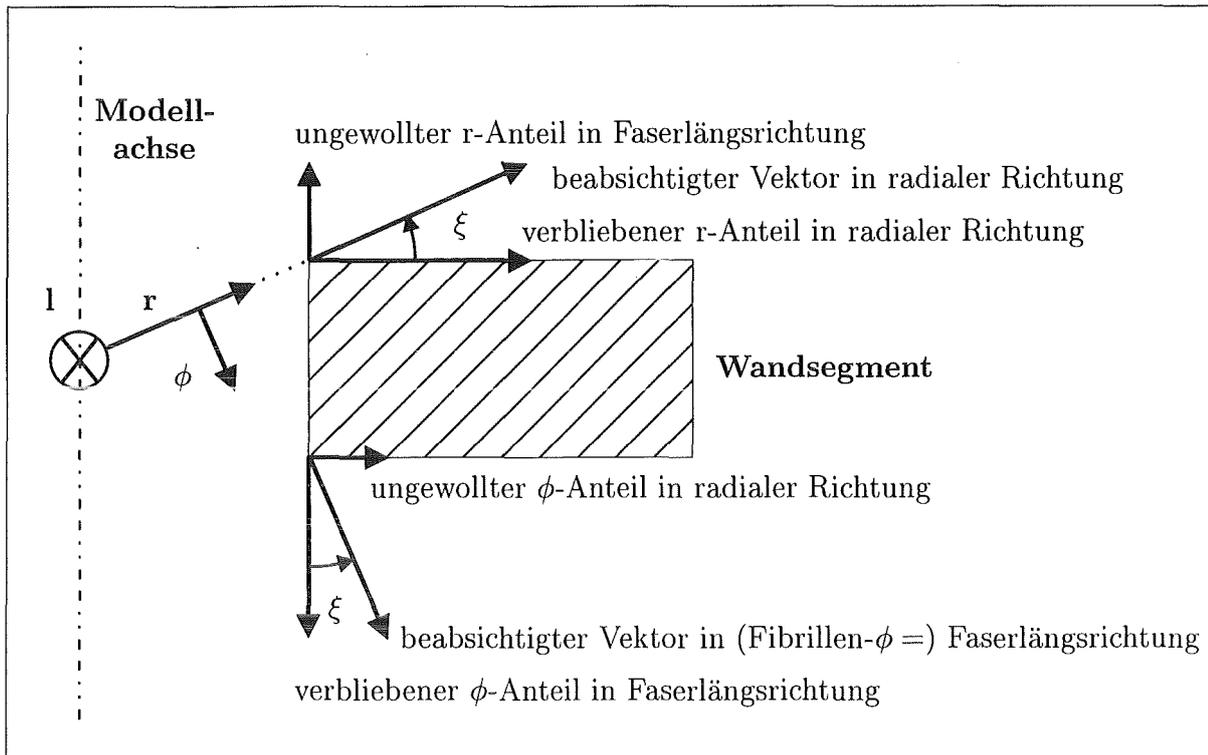


Abbildung 85: Liegt die Zylinderkoordinatenachse zu nah am zugehörigen Wandsegment, so geht die radiale Quellung teilweise in die Längsachse des Modelles ein. Ebenso stellt die tangentielle Komponente einen Anteil in radialer Modellrichtung.

uns den Nadelbäumen zuwenden und eine Simulation von Druck- und Normalholzzellen vornehmen.

Über die Morphologie von Druckholz liegen in der Literatur weit mehr Informationen vor, als über die des Zugholzes. Timell hat 1986 in seinem dreibändigen Werk versucht, alle bis dahin gewonnenen Erkenntnisse zusammenzutragen [85]. Für den Fall der Nadelbäume entnehmen wir die Zellabmessungen daher seinem umfangreichen Werk. Bei unserer Simulation wollen wir uns auf die mächtige Sekundärwand beschränken, die mit 93% den Hauptanteil an der Zellwand ausmacht. Bodig & Jayne verwiesen auf diesen Umstand und erachteten es bei ihren Überlegungen über den Einfluß des Fibrillenwinkels auf Materialeigenschaften des Holzes als sinnvoll, sich auf die Sekundärwand zu konzentrieren [10]. Die Sekundärwand einer Normalholzzelle selbst besteht, wie bereits erwähnt, aus drei Schichten (S1, S2, S3). Die S1-Schicht besteht zu etwa 40% aus Lignin, die S2-Schicht zu ca. 17% und die S3-Schicht zu ca. 12%. Die Abmessungen der einzelnen Wände entnehmen wir Timell, ebenso die dazugehörigen Fibrillenwinkel. In der Druckholzzelle liegt eine Besonderheit vor. Die S2-Schicht ist wesentlich dicker als im Normalholz. Dafür weisen die Druckholzzellen keine S3-Schicht auf. Man bezeichnet die S2-Schicht des Druckholzes wegen ihres besonders hohen Ligningehaltes auch als  $S2_L$ -Schicht [85]. Ihr Ligninanteil beträgt 54%. In Abbildung 36 wurden die Fibrillenwinkel der drei Zelltypen bereits dargestellt. Nun gibt es einen Mechanismus zu finden, der einerseits die höheren tangentialen Eigenspannungen im Druckholz und andererseits die Entwicklung von Längszug in den Normalholzzellen bei gleichzeitiger Längsdruckentwicklung der Druckholzzellen erklärt, wie dies bei grünen Nadelbäumen vorzufinden ist. Unser Hohlzylinder muß also im Falle

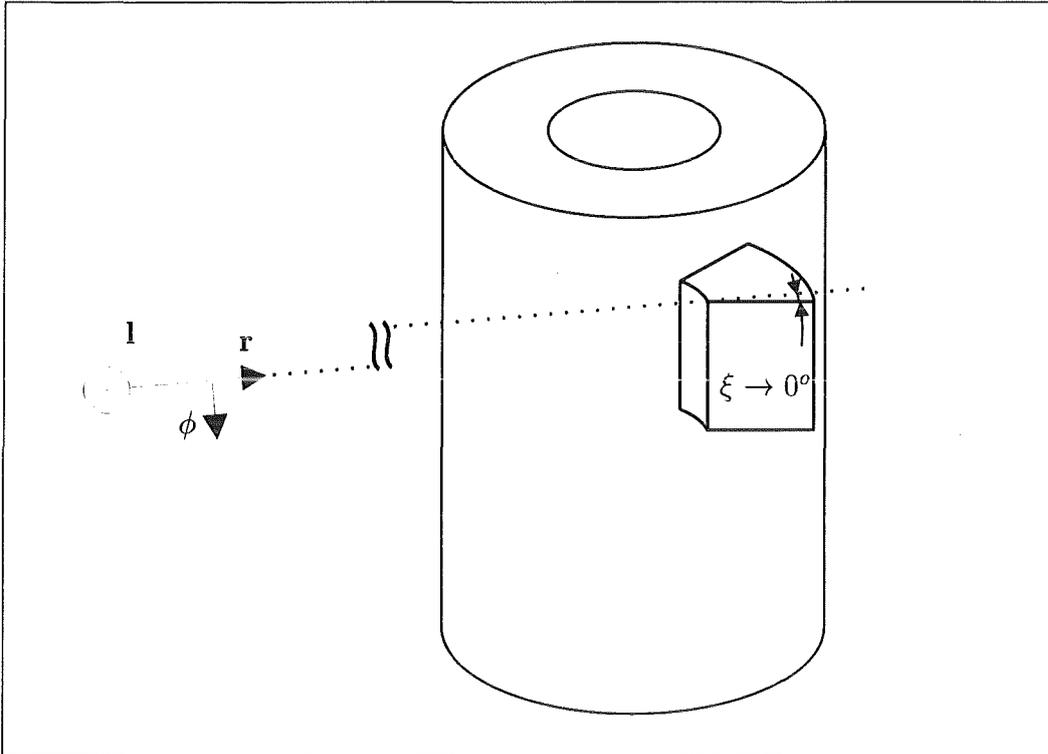


Abbildung 86: Fehlerminimierung durch ausreichende Entfernung der lokalen Zylinderkoordinatenachsen von den zugehörigen Elementen.

des Druckholzes stärker quer zur Zylinderachse schwellen als beim Normalholz. Gleichzeitig muß die Druckholzzelle sich in Längsrichtung ausdehnen, wohingegen die Normalholzzelle sich leicht verkürzen muß. Zu dieser Fragestellung gibt es bereits mehrere Theorien. Die beiden wichtigsten und zugleich auch gegensätzlichsten Theorien stellen die „cellulose tension“-Hypothese von Bamber [7] und die „lignin swelling“-Hypothese von Boyd [12] dar. Die beiden Australier haben in den 80er Jahren zum Teil heftige Auseinandersetzungen ihrer gegenläufigen Annahmen wegen geführt. Im folgenden wollen wir beide Hypothesen mit unserem FE-Modell überprüfen.

## 7.1 Die „cellulose tension“-Hypothese

Bamber geht davon aus, daß die noch lebende Holzzellen durch den hohen inneren Turgordruck eine Längsausdehnung erfahren. Dabei richten sich die wohlgeordneten, kristallin aufgebauten Mikrofibrillen der Cellulose in Längsrichtung aus. Stirbt die Zelle dann ab, so verschwindet der Turgorinnendruck, die Cellulosespirale sackt zusammen und die Zelle verkürzt sich. Erfolgt jedoch vor dem Wegfall des Turgordruckes eine ausreichende Versteifung der Cellulosespirale durch Lignineinlagerung, so behält die Zelle beim Absterben ihre Länge bei. Der beschriebene Vorgang ist in Abbildung 87 zusammengefaßt. Bamber führt als Beweis für seine Hypothese u.a. an, daß die sich besonders stark verkürzende Zugholzzelle extrem arm an Lignin ist, wohingegen die starken Längsdruck ausübende Druckholzfaser den höchsten Ligningehalt aufweist. Um die von Bamber beschriebenen Vorgänge zu simulieren, wurden unsere Hohlzylindermodelle mit Innendruck beaufschlagt. Es wurden jeweils zwei FE-Läufe durchgeführt: Ein erster Lauf mit weichen Elastizitäts-

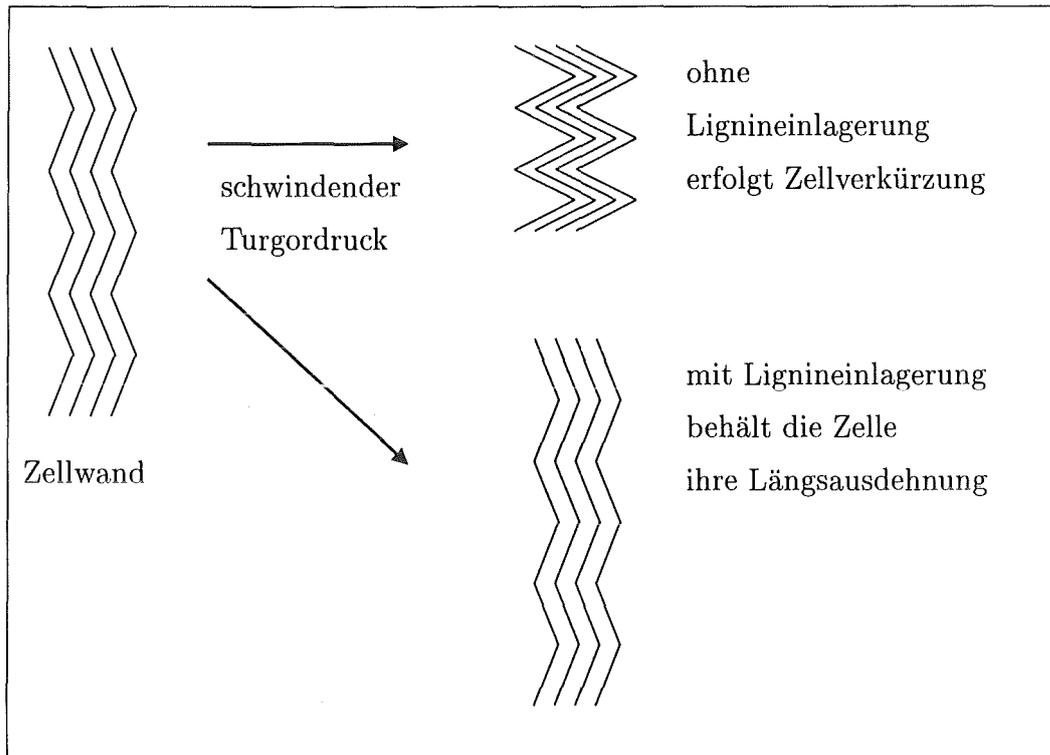


Abbildung 87: Wachstumsspannungsaufbau beim Absterben der Holzzelle (nach Bamber). Je mehr Lignin eingelagert wird, um so größer werden die Längsdruckeigenspannungen.

und Schubmodulen, was dem Zustand vor der versteifend wirkenden Lignifizierung entspricht und ein zweiter Lauf, bei dem den Ligningehalten der einzelnen Zellwandschichten einer ausgereiften Holzzelle durch entsprechende E- bzw. G-Moduli Rechnung getragen wurde. Zieht man die Dehnungen mit Lignin den von den vor der Lignineinlagerung im ersten FE-Lauf ermittelten Dehnungen ab, müsste man genau auf den von Bamber propagierten Endzustand gelangen. Zu beachten ist lediglich der Bezug der Dehnungen auf die richtigen Ausgangslängen. Die Verkürzungen der Zellen bei Wegfall des Turgorinnerdruckes sind die Endlängen des ersten FE-Laufes zu beziehen:

$$\epsilon_{ges} = \frac{\Delta l_{ges}}{l_{a0}} = \frac{\Delta l_a + f \Delta l_b}{l_{a0}} = \frac{u_a + f \epsilon_b l_{a1}}{l_{a0}}$$

mit

$$\epsilon_b = \frac{-\Delta l_b}{l_{b1}} = \frac{-u_b}{l_{b0} + u_b}$$

ergibt sich

$$\epsilon_{ges} = \frac{u_a - f l_{a1} u_b / (l_{b0} + u_b)}{l_{a0}} \approx \frac{u_a - f u_b}{l_{a0}}$$

Die Indizes bedeuten:

- a... Schwellen ohne Lignin
- b... Schwellen mit Lignin
- 0... vor dem jeweiligen FE-Lauf
- 1... nach dem jeweiligen FE-Lauf
- f... Korrekturfaktor

Einer falscher Gewichtung der beiden aufeinander erfolgenden Effekte in der Zellentwicklung wird durch die Einführung des Korrekturfaktors  $f$  entgegengewirkt. Die Längenänderungen  $u_a$  und  $u_b$  werden für die Dickenänderung an einem geeigneten Knoten auf dem Außenradius des Zylinders ermittelt. Die Längsänderung wird an einem Punkt ermittelt, der über der dreiwertigen Lagerung des Modellbodens liegt. Es ergeben sich folgende Verschiebungen:

[%]	radial		longitudinal	
	$\epsilon_a$ (ohne Lignin)	$\epsilon_b$ (mit Lignin)	$\epsilon_a$ (ohne Lignin)	$\epsilon_b$ (mit Lignin)
Normalholz	2.0	0.66	2.5	0.48
Druckholz	0.23	0.08	0.33	0.13

Aus der Bedingung, daß sich im Fall des Normalholzes eine Zellausdehnung in Querrichtung und eine Verkürzung in Längsrichtung ergeben müssen, können die beiden folgenden Bedingungen abgeleitet werden:

$$2.0 - 0.66f > 0 \Rightarrow f < 3 \quad \text{und} \quad 2.5 - 0.48f < 0 \Rightarrow f > 5.2$$

Beiden Bedingungen können nicht gleichzeitig erfüllt werden. Die Bamber'sche „cellulose tension“-Hypothese kann also keine Erklärung für die verschiedenen Wachstumsspannungen liefern. Die FE-Rechnung spricht gegen die Richtigkeit der Annahmen Bammers.

## 7.2 Die „lignin swelling“-Hypothese

Bereits Münch nahm an, daß die Einlagerung des Lignins eine seitliche Ausdehnung in den Zugholzfasern bewirkt, die über den Spiralcharakter der Zellwand in einer Verkürzung der Zellen resultiert [66]. Er verglich diesen Vorgang mit einem Seil, das sich bei Durchtränkung mit Wasser verkürzt; auch ein Seil ist schließlich aus spiralig verlaufenden Einzelfäden, ähnlich den Fibrillen der Zellwand aufgebaut. Boyd erklärt den Effekt unterschiedlicher Längenänderungen mit den Fibrillenwinkeln der einzelnen Sondergewebe [12]. Da in den Druckholzzellen sich die Fibrillen sehr flach um das Zellumen winden, bewirkt eine Einlagerung von Lignin eine besonders starke Längsdehnung der Faser. Die sehr steil ausgerichteten Fibrillen des Zugholzes lassen bei Lignineinlagerung dagegen nur sehr wenig Längenzuwachs, dagegen jedoch mehr Schwellung quer zur Faserlängsachse zu, wie wir ja bereits in den anfänglichen Funktionstest zum orthotropen Ausdehnungsverhalten unseres FE-Modells feststellen konnten. Die Normalholzzellen stellen dabei den Zwischenfall der beiden Reaktionsgewebe dar. Gegen diese Theorie spricht die Tatsache, daß wir im Falle des Zugholzes niedrigere Tangentialeigenspannungen auf der Oberseite von Säbelbäumen vorgefunden haben. Für die Theorie von Boyd sprechen jedoch die Ligningehalte der drei Zelltypen. Wie bereits erwähnt, besitzt das Druckholz die höchsten Ligningehalte, gefolgt

vom Normalholz. Zur FE-Simulation der Boyd'schen Hypothese fließen erneut die Ligningehalte in die Schub- und Elastizitätsmodule ein. Der Schwelleffekt bei der Lignineinlagerung wird durch Temperaturendeckungskoeffizienten bewerkstelligt, die den Ligningehalten der einzelnen Zellwände entsprechen. Tatsächlich kann mit der FE-Simulation für das Druckholz sowohl in Längs-, als auch in Querrichtung ein stärkeres Schwellen im Vergleich zum Nadelholz erzielt werden. Ein Schrumpfen der Nadelholzzelle in Längsrichtung ist jedoch mit keiner der unzähligen Konstellationsmöglichkeiten für die Wahl der Elastizitäts- und Schubmoduli zu erreichen, wie ihn Münch für ein quellendes Seil beobachtet hat. Soweit von der Richtigkeit der Voraussetzungen unserer FE-Rechnung ausgegangen wird, kann die „lignin swelling“-Hypothese allein also nicht die unterschiedlichen Schwellzustände im Nadelholz erklären. Es muß also noch einen weiteren entscheidenden Faktor geben, der eine Zellverkürzung bewirken kann.

### 7.3 Einfluß der Saugspannungen

Bei der Simulation des von Bamber beschriebenen Turgordruckes haben wir bereits eine Zellverlängerung festgestellt. Dementsprechend müßte ein innerer Unterdruck über Querkontraktion in den Zellwänden eine Faserkürzung zur Folge haben. Daß ein solcher Unterdruck für die Holzfaser überhaupt realistisch ist, haben wir schon bei der Behandlung der Trockenrisse gesehen. Er ist sogar notwendig zur Aufrechterhaltung des Wassertransportes im Baum. Jackson & Grace beschreiben das Xylem in diesem Zusammenhang als eine Serie vieler toter Zellen verschiedener Länge, die miteinander zu einem Wasserleitungsrohr verknüpft sind [37]. Um den Einfluß des inneren Soges zu untersuchen, wurden die beiden FE-Läufe, die der Simulation nach der Boyd'schen Hypothese zugrunde lagen, um die zusätzliche Aufgabe eines inneren Unterdruckes erweitert. Bei einer entsprechenden Gewichtung der Zugkräfte auf die Innenwände zu den die Ligninschwellung simulierenden Temperaturendeckungen läßt sich tatsächlich ein Zustand erreichen, der qualitativ den Beobachtungen an realen Bäumen folgt: Das Druckholz längt sich und dehnt sich auch in Querrichtung stärker aus als das Normalholz, welches sich in Längsrichtung verkürzt. Auf diese Art und Weise könnten die in Nadelbäumen vorzufindenden Eigenspannungsverhältnisse über die unterschiedliche Zellmorphologie auf den schwellenden Effekt der Lignineinlagerung und den verkürzenden Effekt der Saugspannungen zurückgeführt werden.

Eine Erklärung der Vorgänge im Zugholz aufgrund der beiden genannten Effekte konnte mit den vorhandenen FE-Modellen, denen eine enge Vernetzung der Zellwandschichten untereinander zugrunde liegt, nicht erzielt werden. Wäre die G-Schicht mit ihrer nahezu faserachsparallelen Fibrillenorientierung fest mit der Sekundärwand verbunden, so würde Letztere an jeglicher Verformung in Längsrichtung gehindert, sodaß keine wesentliche Zellverkürzung bei innerem Unterdruck erzielt werden kann. Das Zugholz ist aufgrund seines speziellen Aufbaus demnach mit einem gesonderten FE-Modell zu betrachten.

### 7.4 Die Verkürzung des Zugholzes

Neben der bereits beschriebenen Primär- und Sekundärwand besitzen die Fasern des Zugholzes in den meisten Fällen noch eine weitere, das Lumen begrenzende Schicht, die gelatinöse G-Schicht. Die Fibrillen sind in dieser Schicht fast parallel zur Faserlängsachse ausgerichtet. Dadswell & Wardrop geben einen Fibrillenwinkel von fünf Grad an [21]. Das

Besondere an dieser gelatinösen Schicht ist aber die Tatsache, daß sie praktisch aus reiner Cellulose besteht; sie ist also ligninfrei [69]. Da Lignin mit seiner hydrophoben Eigenschaft fehlt, ist von der hygroskopischen Cellulose ein starkes Quellen bei Anwesenheit von Wasser zu erwarten. Chow beobachtete, daß der Durchmesser von Zugholzfasern der Buche signifikant kleiner ist als der des Normalholzes [18]. Die von ihm untersuchten Fasern waren jedoch nicht mehr im frischen Zustand! Für diesen fanden Dadswell & Wardrop gleiche Durchmesser beider Zelltypen vor. Dies deutet auf einen großen Einfluß des Quellzustandes auf das Ausdehnungsverhalten des Zugholzes hin. Da Wassermoleküle nur zwischen den Micellen eingelagert werden können, bedeutet ein extrem kleiner Fibrillenwinkel in Verbindung mit einer Quellung, daß die gelatinöse Schicht einen nicht zu unterschätzenden Innendruck auf die umgebende Sekundärwand auszuüben imstande sein muß, ohne selbst eine signifikante Schwellung in Längsrichtung zu erfahren. Es stellt sich die Frage, wie die Sekundärwand auf einen solchen Innendruck reagiert und ob es eine Konstellation gibt, bei der sie sich gar verkürzt. Abbildung 88 zeigt, wie ein dünnwandiges, einschichtiges Rohrmodell mit einem Fibrillenwinkel von 45 Grad und verschiedenen Schubmoduli auf Innendruck reagiert. Man erkennt, daß bei niedrigen Schubmoduli und einer extrem dünnen Wandstärke im Vergleich zum Radius ( $t/R = 1/17.5$ ) zwischen den Fibrillen die Zellverlängerung in eine -verkürzung umschlägt. Eine Verkürzung der Sekundärwand un-

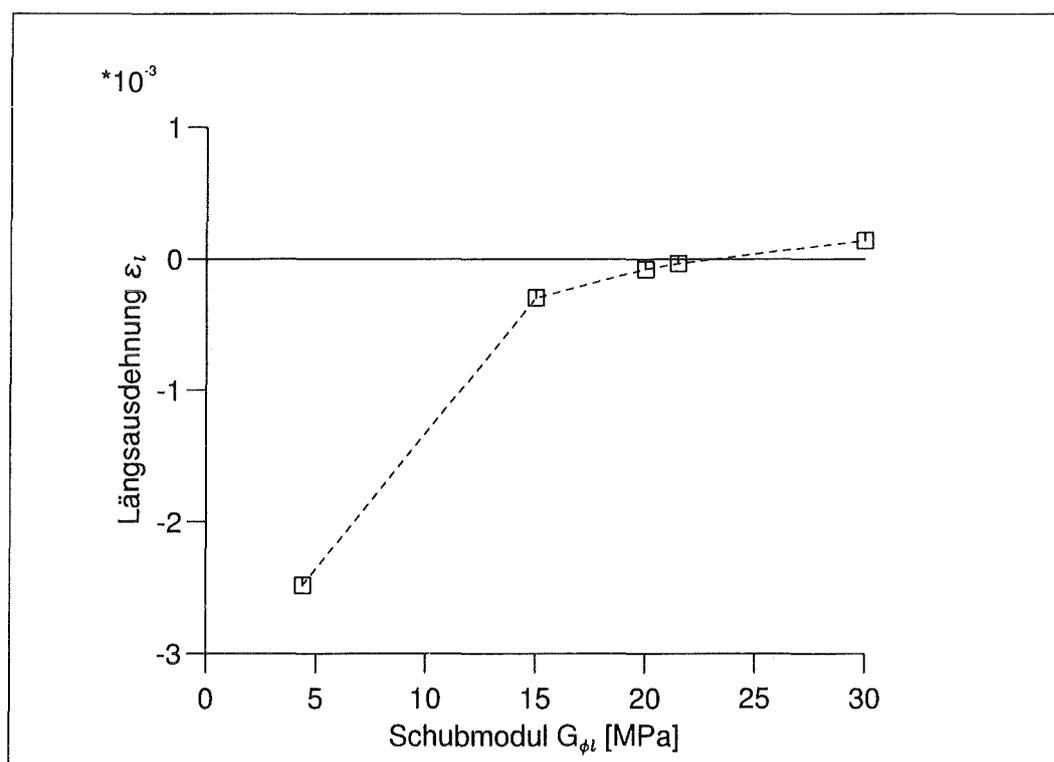


Abbildung 88: Längenänderung eines dünnwandigen Zellmodells mit 45 Grad Fibrillenwinkel und variablem Schubmodul zwischen den Fibrillen bei Beaufschlagung mit Innendruck.

ter Einwirkung einer von innen drückenden G-Schicht ist also durchaus denkbar, wenn die Fibrillen zueinander nur beweglich genug sind. Aber auch der Fibrillenwinkel selbst spielt eine große Rolle bei der Wirkung eines Innendruckes. Die Sekundärwand im Zugholz weist einen Fibrillenwinkel von 40 - 45 Grad auf. FE-Läufe mit verschiedenen Fibrillenwinkeln

für das Rohrmodell zeigen, daß es aber gerade bei 45 Grad zu der stärksten Zellverkürzung bei Wirken eines Innendruckes kommt (Abb. 89). Das Geheimnis des Zugholzes scheint

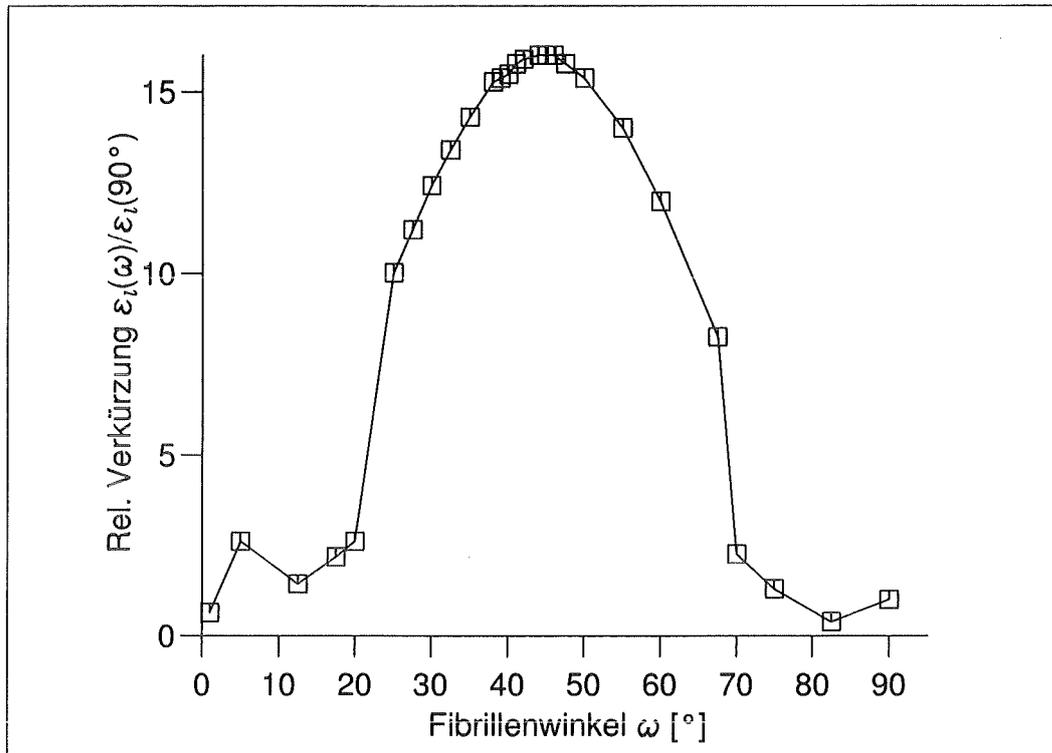


Abbildung 89: Längenänderung eines einwandigen Zellmodells mit variablem Fibrillenwinkel bei Beaufschlagung mit Innendruck.

also fast gelüftet zu sein, wäre da nicht die Frage offen, wieso die gelatinöse Schicht, die ja selbst kaum eine Veränderung ihrer Länge erfährt, nicht die Sekundärwand an einer Längsverkürzung hindert, so wie sich in den Modellen für Druck- und Normalholz die einzelnen Sekundärwandschichten durch ihre gegenseitige Verklebung mit Lignin einander behindern. Die Laubbäume lösen dieses Problem durch die nur sehr schwache Vernetzung der Sekundär- mit der G-Schicht. Mikroskopische Schnitte zeigen häufig eine Separation der beiden Schichten voneinander. Norberg & Meier gelang es gar, die G-Schichtsegmente aus in Stücke geschnittenen, frischen Zugholzfasern herauszuschütteln [69]. Mit diesen Kenntnissen wollen wir den Versuch wagen, die FE-Simulation einer Zugholzfasern vorzunehmen. Dabei beschränken wir uns nun auf ein Segment der Zellwand, das einen inneren, gelatinösen Teil und einen äußeren Teil, die Sekundärwand, enthält. Beide Teile sind rechenstechnisch nur über eine sogenannte „slide line“ miteinander verknüpft, d.h. es kann senkrecht zur gemeinsamen Kontaktfläche zwar eine Druckkraft ausgeübt werden, Schub ist aber nicht übertragbar; die beiden Flächen gleiten aufeinander ab. Dies erhöht natürlich den Rechenaufwand des FE-Laufes. Die Beschränkung auf ein Segment bedeutet, daß nur noch Fibrillenwinkel von 0 oder 90 Grad möglich sind, ohne die Symmetriebedingungen zu verletzen. Die Fibrillen werden daher in der G-Schicht mit einem Winkel von 0 Grad und in der Sekundärwand mit 90 Grad ausgerichtet. Im Fall der G-Schicht kommen wir damit der Wahrheit sehr nahe. Für die Sekundärwand haben wir aber bereits nachgewiesen, daß 45 Grad das Optimum bilden. Sollte mit den im FE-Modell zwangsläufig gewählten 90 Grad eine Verkürzung der Sekundärwand erfolgen, so wäre dies also für 45 Grad erst recht der



zuführen. Über solch große Wunden dringt Luft in den Stammkern ein. Würde hier keine Vertüftung des Kernholzes erfolgen, geriete das gesamte Stamminnere unter atmosphärischen Druck. Weder der Wassertransport in das Blattwerk noch die Aufrechterhaltung der Längszugspannungen im kambiumnahen Holzkörperbereich wären mehr möglich. Die Vertüftung stellt also eine luftdichte Abschottung dar, um die Druckverhältnisse im Stamm aufrecht zu erhalten, die physiologisch **und mechanisch** für den Baum lebensnotwendig sind.

## 8 Zusammenfassung

Nachdem von anderer Seite bereits nachgewiesen werden konnte, daß der lebende Baum seine äußere Gestalt [55, 60], die Ausrichtung seiner Längsfasern [47] und die radiale Querfestigkeit [2] in optimaler Weise zur Vermeidung versagensrelevanter Spannungen einrichtet, liefert die vorgelegte Arbeit mit der Beschreibung von Versagensmechanismen in tangentialer Richtung und den Strategien des Baumes zu deren Vermeidung einen weiteren Beweis dafür, daß der Baum als eine lebende, auf gefährliche Spannungszustände reagierende Struktur zu betrachten ist, die schon Jahrtausende vor der Idee des Menschen entstand, eine ähnliche, künstliche „smart structure“ zu entwickeln. Ein tangentiales Versagen tritt neben den beschriebenen Frost-, Trocken- und Schubrisen, sowie den Unglücksbalken in Form von sogenannten Bananenrisen auf, für deren Entstehung folgende Kriterien entscheidend sind:

- Bananenrisse treten auf der mit Längsdruck belasteten konvexen Unterseite gekrümmter Äste und Stämme auf.
- Das Vorliegen der Krümmung ist Voraussetzung für das Auftreten der Bananenrisse.
- Je schärfer die Krümmung ist, um so höher werden auch die tangentialen Querspannungen in dem betreffenden Schaftbereich und das Risiko der Rißbildung.
- Innere Defekte, wie Faulhöhlen oder Risse im Markbereich erhöhen das Rißrisiko um ein Vielfaches. Bananenrisse treten daher meist als Sekundärdefekte auf, wie etwa im Fall des T-Risses, der sich aus einem verkappten Unglücksbalken ergeben kann.
- Der Baum hat dem tangential auftretenden Zug neben der durch die Mittellamelle bestimmten Festigkeit Druckeigenstressungen entgegenzusetzen.

Messungen an wegen ihrer Krümmung sogenannten Säbelbäumen zeigten, daß die tangentiale Festigkeitsverteilung an das Bananenrißrisiko angepaßt ist. Die gefährdeten Schaftunterseiten wiesen die höheren Tangentialfestigkeiten auf, die in den gekrümmten Bereichen besonders stark ausgeprägt sind. Trotzdem sind die Tangentialfestigkeiten kleiner als die Radialfestigkeiten. Grund ist das Fehlen der Faserarmierung, wie sie in radialer Richtung mit den Holzstrahlen vorliegt. Die Festigkeit des Holzklebers Lignin setzt dem tangentialen Bruchwiderstand damit eine physikalische Grenze. Die Holzstrahlen, die für die Radialfestigkeit von entscheidender Bedeutung sind und aufgrund ihrer schiffchenförmigen Querschnittsform eine optimale Umlenkung der Längsfasern unter Vermeidung gefährlicher Schubspannungen garantieren, stellen in tangentialer Richtung die Achillesferse des Baumes dar. Bei zu großem Längsdruck kann ein Ausknicken der den Holzstrahl umgebenden Längsfasern in tangentialer Richtung erfolgen, sofern keine tangentiale Vorspannung dem entgegenwirkt. Unter zusätzlichem Querszug können die aufgrund ihrer Form von Mattheck auch als schlafende Risse bezeichneten Holzstrahlen aufgeweckt werden und so Ausgangspunkt größerer Risse werden [56]. Dem steuert ein gesunder Baum jedoch mit Hilfe tangentialer Druckvorspannung entgegen. In diesem Zusammenhang spricht man auch von Wachstumsspannungen. Es wurden mehrere Verfahren zur Bestimmung der Wachstumsspannungen aus der Literatur und die Verteilung dieser Eigenstressungen der Bäume vorgestellt. Zwei Meßverfahren wurden ausgiebig getestet: Das Vermessen von

Bohrkerndurchmessern nach Polge [73], sowie die Freisetzung der Eigenspannungen durch eine Bohrung im Stamm zwischen zwei Meßpunkten nach Archer [3] führten zu keiner befriedigenden Aussage über die Höhe der tangentialen Vorspannungen. Daher wurde eine eigene Methode entwickelt, bei der auf frisch gesägte Holzscheiben zwei Meßpunkte aufgebracht werden und dazwischen ein Radialschnitt vorgenommen wird, der die tangential wirkenden Eigenspannungen freisetzt. Die so gewonnenen Verschiebungen können nach der Methode der Gewichtsfunktion von Fett [28] oder mit Hilfe der Finite Elemente Methode in Spannungen umgerechnet werden. Die Anwendung der Radialschnittmethode brachte folgende Ergebnisse:

- Die bananenrißgefährdeten Schaftunterseiten krummer Laub- und Nadelbäume besitzen höhere Tangentialdruckeigenspannungen. Dem Ausknicken der Längsfasern im Bereich von Holzstrahlen (Speicheneffekt) wird somit erfolgreich begegnet.
- Schärfere Krümmung bedeutet höhere Querzugspannungen; gerade dort erzeugt ein gesunder Baum aber auch höhere Tangentialdruckeigenspannungen.
- Lediglich Laubbäume sind in der Lage, im Bereich von Ästen ihren tangentialen Eigenspannungszustand den auftretenden Belastungen anzupassen.
- Bei gestörtem Eigenspannungsfeld greift der Laubbaum auf die Optimierung der tangentialen Querfestigkeitsverteilung zurück.

Die neu gewonnenen Erkenntnisse kann man mit dem folgenden Fazit auf einen Nenner bringen:

**Die tangentialen Festigkeiten und Eigenspannungen im grünen Baum sind lastgesteuert an auftretende tangentiale Querzugspannungen angepaßt.**

Nach diesen praktischen Versuchen erfolgte eine FE-Simulation von Druck-, Normal- und Zugholzfasern, um ansatzweise eine Erklärung für die Eigenspannungen in den unterschiedlichen Geweben zu liefern. Die beiden bekanntesten Hypothesen von Bamber und Boyd zu diesem Thema führen zu keinem befriedigenden Ergebnis. Die unterschiedliche Eigenspannungszustände in Druck- und Normalholz können aber durch eine Verknüpfung der Boyd'schen „lignin swelling“-Hypothese, die auf einer Faserquellung durch Einlagerung von Lignin beruht, mit der Wirkung von Saugspannungen auf die Zellinnenwände erklärt werden [12]. Die Zugholzfasern stellen mit ihrer inneren, gelatinösen Schicht, die aus reiner Cellulose besteht, einen Sonderfall dar. Die Zellverkürzung erfolgt offenbar durch den Innendruck, den die stark hygroskopische G-Schicht aufgrund ihrer Quellung auf die Sekundärwand ausübt. In dieser wird aufgrund ihres Fibrillenwinkels von 45 Grad der Innendruck geschickt in Längszug umgelagert. So ist die Wirkung des Zugholzes zu erklären. Zudem kann der Absenkungsriß von Ästen nach langer Trockenperiode mit der nachlassenden Zugwirkung bei abnehmendem Druck der gelatinösen Schicht erklärt werden.

## 9 Ausblick

Die derzeit seitens der Ingenieurwissenschaften angestrebte Schaffung einer „smart structure“, die sich in intelligenter Weise an äußere Einwirkungen anpaßt, könnte durch die Analyse der Mechanismen, mit denen es der Baum als natürliche Struktur schafft, auf Belastungen zu reagieren, enormen Vorschub gewinnen. Wie auch die bereits erwähnten Arbeiten zu Gestalt-, Faserorientierungs- und Radialfestigkeitsoptimierung zeigt die vorliegende Arbeit, daß der Baum an mechanischen Gefahrenpunkten reagieren kann und dies auch in optimaler Weise tut. Will man für eigene, „intelligente“ Strukturen von den Bäumen lernen, wird es unverzichtbar sein, in die Mikrostruktur und die Chemie des Holzes einzutauchen, um zu lernen, wie der Baum Informationen über Spannungszustände gewinnt, wie er diese Informationen verarbeitet und in veränderte Zellcharakteristiken umsetzt. Diesen Weg werden Ingenieure und Biologen nur gemeinsam gehen können, wie auch in Zukunft die weitere Entwicklung unseres Kenntnisstandes immer mehr von Teamarbeit und interdisziplinärem Denken abhängig sein wird.

## Literatur

- [1] Albrecht, W., Bethge, K., Mattheck, C. (1995). *Is lateral strength in trees controlled by lateral stress?* Journal of Arboriculture 21, S. 83–87.
- [2] Albrecht, W. (1995) *Untersuchung der Spannungssteuerung radialer Festigkeitsverteilung in Bäumen*. Dissertation am Lehrstuhl für Maschinenbau der Universität Karlsruhe.
- [3] Archer, R.R. (1987) *Growth stresses and strains in trees*. Springer Verlag, New York.
- [4] Ashbee, K. (1989) *Fundamental principles of fiber reinforced composites*. Technomic Public. Co., Lancaster.
- [5] Atack, D., May, W.D., Morris, E.L., Sproule, R.N. (1961) *The energy of tensile and cleavage fracture of black spruce*. Tappi Journal 44, S. 555–567.
- [6] Bailleres, H., Chanson, B., Fournier, M. (1994) *Two field measurement techniques for appraising the longitudinal growth strains at the stem surface*. Plant biomechanics: Biomécanique des végétaux, Montpellier.
- [7] Bamber, R.K. (1987) *The origin of growth stresses: a rebuttal*. IAWA Bulletin 8, S. 80–84.
- [8] Bethge, K., Mattheck, C., Zipse, A. (1994) *Die Festigkeiten im Baum und ihre Bestimmung mit dem Fractometer II*. Neue Landschaft 12, S. 920–926.
- [9] Boatright, S.W.J., Garrett, G.G. (1983). *The effect of microstructure and stress state on the fracture behaviour of wood*. Journal of Materials Science 18, S. 2181–2199.
- [10] Bodig, J., Jayne, B.A. (1982) *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company.
- [11] Booker, R.E. (1993) *The importance of the S3 cell wall layer in collapse and wood hardness*. Proceedings of the 24th Forest Products Research Conf., 15-18 November 1993, CSIRO Division of For. Prods, Clayton, Victoria, Australia 3, S. 1–13.
- [12] Boyd, J.D. (1985) *The key factor in growth stress generation in trees: lignification or crystallisation?* IAWA Bulletin 6, S. 139–150.
- [13] Bosshard, H. (1956) *Über die Anisotropie der Holzschwindung*. Holz als Roh- und Werkstoff 14, S. 285–295.
- [14] Bronstein, I.N., Semendjajew, K.A. (1983) *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt a. Main.
- [15] Butin, H., Shigo, A. (1981) *Radial shakes and „frost cracks“ in living oak trees*. United States Department of Agriculture, Research Paper NE-478.
- [16] Carlquist, S. (1975) *Ecological strategies of xylem evolution*. University of California press, Berkely. S. 203.

- [17] Caspari, C.O. (1990) *Untersuchungen über Auftreten, Ursache und Genese von Rißschäden im Schaft lebender Fichten (Picea abies (L.) Karst.)*. Dissertation am Lehrstuhl für Forstwissenschaften der Georg-August Universität Göttingen.
- [18] Chow, K.Y. (1946) *A comparative study of the structure and chemical composition of tension wood and normal wood in beech*. Forestry 20, S. 62–77.
- [19] Clarke, S.H. (1939) *Stresses and strains in growing timber*. Forestry 13, S. 68–79.
- [20] Combes, J.G. (1994) *Relationships between tree morphology and longitudinal growth stress measured at stem level*. Plant biomechanics: Biomécanique des végétaux, Montpellier.
- [21] Dadswell, H.E., Wardrop, A.B. (1955) *The structure and properties of tension wood*. Holzforschung 9, S. 97–104.
- [22] Delorme, A., Verhoff, S. (1975) *Zellwanddeformationen in sturmgeschädigtem Fichtenholz unter dem Rasterelektronenmikroskop*. Holz als Roh- und Werkstoff 33, S. 456–460.
- [23] Dietrich, F., Mattheck, C. (1995) *Cracks in sabre-shaped trees and branches*. Journal of theoretical biology 173, S. 321–327.
- [24] Dietrich, F., Mattheck, C. (1995) *Wachstumsspannungen und ihre Bedeutung bei der Vermeidung von Rissen in grünen Bäumen*. Berichtsband zur 27. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge in Köln, DVM e.V., Berlin, S. 431–440.
- [25] Dinwoodie, J.M. (1975) *Timber - a review of the structure-mechanical property relationship*. Journal of Microscopy 104, S. 3–32.
- [26] Easterling, K.E., Harryson, R., Gibson, L.J., Ashby, M.F. (1982). *On the mechanics of balsa and other woods*. Proceedings of the Royal Society of London, S. 31–41.
- [27] Ferrand, J.C. (1982) *Etudes des contraintes de croissance. Première partie: méthode de mesure sur carottes de sondage*. Annales des Sciences forestières 39, S. 109–142.
- [28] Fett, T. (1987) *Bestimmung von Eigenspannungen mittels bruchmechanischer Beziehungen*. Materialprüfung 29, S. 92–94.
- [29] Fett, T., Thun, G. (1995). *Residual stresses in PVC-cylinders determined with the weight function method*. Demnächst in Engineering Fracture Mechanics.
- [30] Fournier, M. (1989). *Mécanique de l'arbre sur pied*. Doctorat de l'I.N.P.L. en sciences du bois. Lorraine, C.N.R.S. URA 875.
- [31] Gerhardt, H. (1994) *Computersimulationen zum Wachstumsverhalten und zur Bruchmechanik von Bäumen*. Dissertation am Lehrstuhl für Maschinenbau der Universität Karlsruhe.
- [32] Gibson, L., Ashby, F. (1988) *Cellular solids - structure and properties*. Pergamon press, GB.

- [33] Gutmann, G. (1995) *Messung tangentialer Holzfestigkeiten mit Fractometer II und III*. Diplomarbeit, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe (unveröffentlicht).
- [34] Hartig, R. (1894) *Sonnenrisse und Frostrisse an der Eiche*. Forstlich-naturwissenschaftliche Zeitschrift 3, S. 255ff.
- [35] Hewes, J. (1981) *Redwoods - the world's largest trees*. Brompton Books Corporation, Greenwich, USA.
- [36] Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. (1993) *ABAQUS - User Manual*. Providence, USA.
- [37] Jackson, G., Grace, J. (1994) *Cavitation and water transport in trees*. Endeavour, New Series 18, S. 50–54.
- [38] Jacobs, M.R. (1938) *The fibre tension of woody stems with special reference to the genus Eucalyptus*. Commonwealth Forestry Bureau, Bulletin No. 22, Canberra.
- [39] Jacobs, M.R. (1939) *Further studies in fibre tension*. Commonwealth Forestry Bureau, Bulletin No. 24, Canberra.
- [40] Jacobs, M.R. (1945) *The grow stresses of woody stems*. Commonwealth Forestry Bureau, Bulletin No. 28, Canberra.
- [41] Kappel, R. (1994) *Untersuchungen zur tangentialen Querfestigkeit grüner Bäume*. Diplomarbeit, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe (unveröffentlicht).
- [42] Keller, R., Thiercelin, F. (1975) *Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois du hêtre*. Annales des Sciences forestières 32, S. 113–129.
- [43] Knuchel, H. (1947) *Holzfehler*. Werner Classen Verlag, Zürich, (3. Auflage), S. 59–60.
- [44] Kollmann, F. (1942) *Über das Gefrieren und den Einfluß tiefer Temperaturen auf die Festigkeit der Hölzer*. Mitteilungen der Akademie der deutschen Forstwissenschaft. Band 1, S. 317–336.
- [45] Kollmann, F. (1956) *Untersuchungen über die Querszugfestigkeit der Hölzer*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 75, S. 304–318.
- [46] Kollmann, F. (1982) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- [47] Kriechbaum, R. (1994). *Ein Verfahren zur Optimierung der Faserverläufe in Verbundwerkstoffen durch Minimierung der Schubspannungen nach Vorbildern der Natur*. Dissertation am Lehrstuhl für Maschinenbau der Universität Karlsruhe.
- [48] Kübler, H. (1959) *Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannung quer zur Faserrichtung, 1. Teil*. Holz als Roh- und Werkstoff 17, S. 1–9.
- [49] Kübler, H. (1959) *Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannung quer zur Faserrichtung, 2. Teil*. Holz als Roh- und Werkstoff 17, S. 44–54.

- [50] Lavers, G.M. (1983). *The strength properties of timber*. Building research establishment report, Grosvernor press, Portsmouth.
- [51] Lekhnitskii, S.G. (1981) *Theory of elasticity of an anisotropic body*. Mir Publishers, Moskau.
- [52] Lutz, H.J. (1952) *Occurrence of clefts in the wood of living white spruce in Alaska*. Journal of Forestry 50, S. 99–102.
- [53] Mattheck, C. (1990) *Engineering components grow like trees*. Materialwissenschaften und Werkstofftechnik 21, S. 143–168.
- [54] Mattheck, C. (1992) *Design in der Natur - Der Baum als Lehrmeister*. Rombach Verlag, Freiburg.
- [55] Mattheck, C. (1991) *Trees - the mechanical design*. Springer Verlag, Berlin.
- [56] Mattheck, C., Albrecht, W., Dietrich, F., Kriechbaum, R. (1994). *Die Biomechanik der Holzstrahlen*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 16, S. 143–147.
- [57] Mattheck, C., Breloer, H. (1994) *Handbuch der Schadenskunde von Bäumen - der Baumbruch in Mechanik und Rechtsprechung*. Rombach Verlag, Freiburg (2. Auflage).
- [58] Mattheck, C., Breloer, H. (1993) *Bruch grüner Äste*. Deutscher Gartenbau 42, S. 2664–2668.
- [59] Mattheck, C., Bethge, K. (1993) *Das Fractometer*. Allgemeine Forstzeitschrift 3, S. 114–115.
- [60] Mattheck, C. (1994) *Die Baumgestalt als Autobiographie - Einführung in die Mechanik der Bäume und ihre Körpersprache*. Thalacker Verlag, Braunschweig (2. Auflage).
- [61] Mattheck, C., Kübler, H. (1995) *Wood - the internal optimization of trees*. Springer Verlag, Heidelberg.
- [62] Mayer-Wegelin, H. (1955). *Spannungen und Spannungsrisse im Holz des stehenden und gefällten Stammes*. Mitteilungen der Österreichischen Gesellschaft für Holzfor- schung 7, S. 11–17.
- [63] Milburn, J.A., Johnson, A.P.C. (1966) *The conduction of sap*. Planta 69, S. 34–62.
- [64] Monchaux, P., Nepveu, G. (1986). *Fentes d'arbres sur pied dans deux plantations d'épicéa commun - influence de la densité du bois*. Annales de recherches sylvicoles, Paris, S. 305–321.
- [65] Müller, R. (1994) *Wie der Baum Wachstumsspannungen erzeugt - eine FE-Simulation verschiedener Holzzelltypen*. Diplomarbeit, Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe (unveröffentlicht).
- [66] Münch, E. (1938) *Statik und Dynamik des schraubigen Baus der Zellwand*. Flora 32, S. 357–424, Jena.

- [67] Myer, J.E. (1922) *Ray volumes of the commercial woods at the United States and their significance*. Journal of Forestry 20, S. 337–351.
- [68] Nicholson, J.E. (1971) *A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs*. Wood Science and Technology 5, S. 40–48.
- [69] Norberg, P.H., Meier, H. (1966) *Physical and chemical properties of the gelatinous layer in tension wood fibres of aspen*. Holzforschung 20, S. 174–178.
- [70] Nördlinger, H. (1878). *Trockenrisse (falsche Frostrisse) an der Fichte*. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 6, S. 281–284.
- [71] Perem, E. (1964) *Tension wood in canadian hardwoods*. Department of Forestry, Canada. Publication No. 1057.
- [72] Pluinage, G. (1992) *La rupture du bois et de ses composites*. Cépaduès-Éditions, Toulouse.
- [73] Polge, H., Thiercelin, F. (1979) *Growth stress appraisal through increment core measurements*. Wood science 12, S. 86–92.
- [74] Polge, H. (1981) *Influence des éclaircies sur les contraintes de croissance du hêtre*. Annales des Sciences forestières 38, S. 407–423.
- [75] Polge, H. (1982) *Quelques observations sur des fissures radiales dans le bois de douglas*. Annales des Sciences forestières 39, S. 399–406.
- [76] Polge, H. (1984) *Nouvelles observations sur les fissures radiales du douglas*. I.N.R.A., Station de Recherches sur la Qualité des Bois, Centre de Recherches forestière de Nancy. Champenoux, Seichamps, S. 453–458.
- [77] Pryor, L.D. (1947) *Damage to pinus radiata by climatic agents*. Australian Forestry 11, S. 57–64.
- [78] Sasaki, Y., Okuyama, T., Kikata, Y. (1981) *Determination of the residual stress in a cylinder of inhomogeneous anisotropic material*. Mokuzai Gakkaishi 27, S. 270–282.
- [79] Schirp, M., Kübler, H. (1968) *Untersuchungen über die kältebedingten Längenänderungen kleiner Holzproben*. Holz als Roh- und Werkstoff 26, S. 335–341.
- [80] Schirp, M. (1968) *Frostrisse an Baumstämmen*. Forstarchiv 39, S. 149–154.
- [81] Schniewind, A.P. (1959) *Transverse anisotropy of wood: a function of gross anatomic structure*. Forest products journal 10, S. 350–359.
- [82] Schwarze, F. (1994) *Entwicklung und biomechanische Auswirkungen von holzzeretzenden Pilzen in lebenden Bäumen und in vitro*. Dissertation an der Universität Freiburg, Institut für Forstbotanik und Baumphysiologie.
- [83] Stanzl-Tschegg, E., Tan, D.-M., Tschegg, E. (1995). *New splitting method for wood fracture characterization*. Demnächst in Wood Science and Technology.

- [84] Taylor, F.W. (1969) *The effect of ray tissue on the specific gravity of wood*. Wood and Fibre 1, S. 142–145.
- [85] Timell, T.E. (1986). *Compression wood in Gymnosperms*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokio.
- [86] Timoshenko, S., Goodier, J.N. (1951) *Theory of elasticity*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [87] Troll, W. (1959). *Allgemeine Botanik*. Enke Verlag, Stuttgart.
- [88] U.S. Forest Products Laboratory (1987). *Wood Handbook: wood as an engineering material*. Agricultural Handbook 72, U.S. Department of Agriculture.
- [89] Volkert, E. (1940) *Das Schilfern der Kiefer*. Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft 11, S. 173ff.
- [90] Wagenführ, R., Scheiber, C. (1989) *Holzatlas*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- [91] Wainwright, S.A., Biggs, W.D., Currey, I.D., Goseline, I.M. (1976) *Mechanical design in organisms*. Princeton University press, New Jersey.
- [92] Wardrop, A.B., Dadswell, H.E. (1957) *Variations in the cell wall organization of tracheids and fibres*. Holzforschung 11, S. 33–41.
- [93] Wartenberg, H. (1933) *Kälte und Hitze als Todes- und Krankheitsursache der Pflanze*. In: Sorauer, P. (1933): *Handbuch der Pflanzenkrankheiten*, Band 1.
- [94] Wilson, B., Archer, R. (1979). *Tree design: some biological solutions to mechanical problems*. Bioscience 29, S. 293–297.