

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6405

**Untersuchungen
zu lastgesteuerten
Festigkeitsverteilungen
und Wachstumsspannungen
in Bäumen**

I. Tesari

Institut für Materialforschung

Januar 2000



Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6405

Untersuchungen zu lastgesteuerten Festigkeitsverteilungen und
Wachstumsspannungen in Bäumen*

Iwiza Tesari

Institut für Materialforschung

*Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2000

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)
ISSN 0947-8620

Untersuchungen zu lastgesteuerten Festigkeitsverteilungen und Wachstumsspannungen in Bäumen

Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Festigkeiten und Wachstumsspannungen im Holz der Äste, Astanbindungen und Gabelungen von Bäumen zeigten Mechanismen auf, mit denen diese vermeintlichen Schwachstellen einem Materialversagen entgegenwirken. Messungen mit dem Fractometer III belegten, daß das Holz der Astunterseite an die vorherrschende Druckbelastung angepaßt ist. Seine axiale Druckfestigkeit ist gegenüber der Druckfestigkeit des astoberseitigen Holzes und des Stammholzes signifikant erhöht. Holz in Astanbindungen und Zwieseln, das durch Zugspannungen quer zu den Fasern hoch beansprucht wird, weist deutlich höhere tangentielle Biegefestigkeiten auf als Holz in umliegenden, minder belasteten Bereichen.

Holzanatomische Untersuchungen zeigten Zusammenhänge zwischen der Druckfestigkeit des Astholzes und der Dicke der lignifizierten Zellwandschichten auf. Die hohen Festigkeiten in Astanbindungen und Zwieseln konnten auf eine besondere Faserstruktur in diesen Bereichen zurückgeführt werden.

An Zwieseln wurden Wachstumsspannungen ermittelt, welche das Holz am Umfang und im mittleren Bereich der eingeschlossenen Rinde unter Druckvorspannung setzen. In den Bereichen dazwischen treten Zugeigenspannungen auf. Wundholz setzt das überwallte Holz unter Druckspannungen. In Astgabeln erhöhen Druckeigenspannungen die Sicherheit gegen Versagen durch quer zur Faserrichtung wirkende Lastzugspannungen.

Studies of Load-controlled Strength Distributions and Growth Stresses in Trees

Abstract

Studies of strength and growth stresses in the wood of branches, branch connections, and furcations of trees revealed mechanisms which these alleged weak spots employ to counteract materials failure. Fractometer III measurements documented that the wood on the lower side of a branch is adapted to the prevailing compressive load. Its axial compression strength is significantly higher than the compression strength of the wood on the upper side of a branch and also of trunk wood. Wood in branch connections and forks subjected to high loads and stresses in a direction transverse to the grain as a result of tensile stresses has a clearly higher tangential bending strength than wood in surrounding areas less subjected to stresses.

Studies of wood anatomy indicated connections between the compression strength of branch wood and the thickness of the lignified cell wall layers. The high strength in branch connections and forks was attributed to a special grain structure in those areas.

Growth stresses were determined in forks which expose the wood on the circumference and in the middle region of the enclosed bark to a compressive pre-stress. Residual tensile stresses were recorded in the regions in between. Callus imposes compressive stresses on the occluded wood. In forked branches, residual compressive stresses enhance the safety against failure by introducing load-induced tensile stresses in a direction transverse to the direction of the grain.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Grundlagen	5
2.1 Aufbau und Mechanik von Bäumen	5
2.1.1 Der Aufbau des Holzes	8
2.1.2 Die mechanischen Eigenschaften des Holzes	16
2.1.3 Astanbindungen	19
2.1.4 Zwiesel	21
2.1.5 Wachstumsspannungen in Bäumen	23
2.2 Methoden	27
2.2.1 Das Fractometer III	27
2.2.2 Die Ermittlung des Elastizitätsmodul	31
2.2.3 Die Ermittlung von Wachstumsspannungen	38
2.2.3.1 Verschiedene Methoden zur Bestimmung von Eigenspannungen	38
2.2.3.2 Die Bohrlochmethode zur Bestimmung von Wachstumsspannungen in Holz	40
2.2.4 Die CAO-Methode	44
3 Ergebnisse und Diskussion	46
3.1 Druckfestigkeitsverteilung in Ästen	46
3.2 Die Verteilung der Elastizitätsmoduln in Ästen	53
3.3 Die CAO-Simulation des sekundären Dickenwachstums von Ästen	58
3.4 Holzanatomische Untersuchungen an Ästen	60
3.5 Der Sommerbruch grüner Äste	65
3.6 Tangentiale Biegefestigkeitsverteilungen in Astanbindungen	68
3.7 Tangentiale Biegefestigkeitsverteilungen am Umfang von Zwiesel	73
3.8 Wachstumsspannungen in den Achseln der Astanbindungen	76
3.9 Wachstumsspannungen in Zwiesel	79
3.10 Wachstumsspannungen in Wundholz	87
4 Zusammenfassung	91
5 Literatur	95

1 Einleitung

Die belebte Natur war lange Zeit die große Lehrmeisterin der Menschheit. Mit zunehmend technischem Verständnis erfolgte die Loslösung vom Naturvorbild, wobei das Rad wohl den Anbruch der Emanzipation kennzeichnet. Einige Zeit schien es, als hätte die Technik die Natur weit überflügelt. Fahrzeuge können schneller fahren als Lebewesen laufen, Flugzeuge vermögen höher und weiter zu fliegen als Vögel und künstliche Werkzeuge sind imstande, jeden natürlichen Panzer zu brechen. Doch unter wachsendem Konkurrenzdruck und begrenzten Ressourcen wird die Effizienz der eingesetzten Materialien und Energien immer wichtiger. Die belebte Natur hat sich unter den genannten Restriktionen entwickelt und in langen Zeiträumen im Zuge einer gnadenlosen Selektion optimal an die vielfältigsten Erfordernisse angepaßt. Ihre Strukturen, Funktionen, Baumaterialien und Strategien können Vorbilder und neue Denkansätze auf der Suche nach optimalen Lösungen liefern. So ist es nicht weiter verwunderlich, daß sich in Bereichen der unterschiedlichsten Technologien das Interesse wieder zunehmend auf natürliche Vorbilder richtet. Die neuronalen Netze einfacher Insekten sind zur Zeit noch leistungsfähiger als die der elektronischen Datenverarbeitung und Nanotechnologen hoffen, den Mechanismus der Selbstorganisation von Proteinen zu ergründen und nutzen zu können.

Am Institut für Materialforschung II des Forschungszentrums Karlsruhe werden die mechanischen Eigenschaften von Bäumen systematisch erforscht. Als ein grundlegendes Bauprinzip wurde von MATTHECK (1990a) das *Axiom der konstanten Spannung* gefunden. Es besagt, daß biologische Kraftträger bei bestimmungsgemäßer Belastung weder lokal hohe Spannungen (z. B. Kerbspannungen) noch unterbelastete Bereiche (Materialverschwendung) aufweisen. Dieses natürliche Wachstums- und Gestaltungsprinzip wurde, basierend auf der Methode der finiten Elemente (FEM), in Form von Computeralgorithmen in die Technik übertragen. Die Programme dienen zur Designfindung und Gestaltoptimierung von Maschinenbauteilen. SKO (Soft Kill Option) ist ein Programm zur kraftflußgesteuerten und damit gewichtsoptimierten Designfindung (BAUMGARTNER, HARZHEIM und MATTHECK 1992). Die CAO-Methode (Computer Aided Optimization) entfernt durch Kerben bedingte Spannungsüberhöhungen und homogenisiert die Spannungen auf der Bauteiloberfläche. Dadurch wird die Lebensdauer des optimierten Bauteils oftmals um ein vielfaches gegenüber der des ursprünglichen gesteigert (MATTHECK 1990b, 1997; MATTHECK und BURKHARDT 1990).

Studien belegen, daß neben der äußeren Gestalt auch die innere Struktur von Bäumen optimal an die Belastungen angepaßt ist. Holz ist, wie alle überwiegend unidirektional ausgerichteten Faserwerkstoffe, empfindlich gegen Schubspannungen zwischen den Fasern. Dieser Schwäche begegnen Bäume, indem sie neugebildete Fasern in Richtung der Hauptspannungstrajektorien ausrichten, womit der gefährliche Schub zwischen den Fasern minimiert wird. Auch dieses Gestaltungsprinzip wurde in Form von Computeralgorithmen in die Technik

übertragen: CAIO (Computer Aided Internal Optimization) optimiert die Faserverläufe künstlicher Faserverbundstrukturen und steigert damit die Festigkeit, bzw. reduziert das Gewicht des Bauteils (KRIECHBAUM 1994, REUSCHEL 1999). Der Nachweis, daß neben der äußeren Form und inneren Struktur der Bäume auch diverse Holzfestigkeiten lastgesteuert optimiert sind, wurde von ALBRECHT (1995), DIETRICH (1995) und ZIPSE (1997) erbracht.

Es ist davon auszugehen, daß mit den bisher gefundenen Ansätzen der Vorrat der Bäume an genialen Problemlösungen bei weitem noch nicht erschöpft ist. Große Bereiche sind noch nicht hinreichend untersucht, so daß weitere Studien an Bäumen erfolversprechend erscheinen. Darüber hinaus gewinnt der Werkstoff Holz als nachwachsender Rohstoff zunehmend an Bedeutung. Dies betrifft sowohl den klassischen Holzrahmenbau als auch neuere Einsatzgebiete, in denen das Holz z. B. in Fasern (Zellulose) und Matrix (Lignin) aufgeschlossen wird und die Einzelkomponenten in konventionellen Kunststoffverarbeitungs-maschinen geformt werden (FRAUNHOFER 1999). Zum optimalen Einsatz eines Werkstoffes ist die Kenntnis seiner Eigenschaften und Besonderheiten notwendig. Als Beispiel sei hier die Erfahrungsregel von Schiffsbauern genannt, die für Masten vorzugsweise natürlich belassene Stämme verarbeiteten, wobei sie nur die Rinde entfernten und die darunterliegenden Schichten möglichst unbeschädigt erhielten (GORDON 1989). Damit schwächten sie den Stamm nicht durch unterbrochene Faserverläufe. Zuletzt dient das Verständnis der Bäume nicht ausschließlich der Grundlagenforschung, es sichert auch deren Überleben in nachhaltig von Menschen beeinflussten Gebieten, zumal die naturbelassenen Zonen dieser Welt ständig dezimiert werden.

Diese Arbeit befaßt sich im wesentlichen mit den mechanischen Aspekten von Astanbindungen und Gabelungen der Bäume. Biologisch war der Entwicklungsschritt von einem Sproß-Vegetationspunkt (Palmen) zu mehreren Vegetationspunkten (verzweigter Sproß bei Nadel- und Laubbäumen) sehr vorteilhaft. Der Verlust eines Vegetationspunktes kann bei mehreren vorhandenen leicht verschmerzt werden. Dadurch wurde die Ausbreitung in kältere Klimazonen und widrigere Umgebungsbedingungen ermöglicht. Mechanisch gesehen erscheint diese Entwicklung als Wagnis. Die Aufteilung des Baumkörpers in viele abstehende Organe führt zu wesentlich komplexeren und zum Teil schwieriger zu bewältigenden Lastsituationen, als sie einem Stamm ohne Äste widerfahren können.

Daß die verschiedenen Gabelungen ihren mechanischen Aufgaben im Baum gerecht werden, ist offensichtlich. Wie das Holz in diesen Bereichen dem Versagen durch hohe Belastungen trotzt, wurde mittels unterschiedlichen Methoden untersucht. In Feldversuchen wurden verschiedene versagensrelevante Holzfestigkeiten und deren Verläufe in diversen Organen bestimmt, um sie bezüglich einer inneren Optimierung beurteilen zu können. Holzanatomische Untersuchungen bringen die gemessenen Festigkeiten mit dem Aufbau des Holzes in Verbindung.

Weiterhin wurden die bislang wenig beachteten Wachstumsspannungen¹ der Bäume untersucht. Bei krautigen Pflanzen ist die Wirkung der hier im wesentlichen durch den Turgordruck² erzeugten Eigenspannungen augenscheinlich. Mit dessen Schwinden verlieren die Organe der Pflanzen an Stabilität und sind oft nicht mehr in der Lage, ihr Eigengewicht zu tragen. Bei Bäumen ist die Wirkung der Eigenspannungen weniger augenscheinlich, aber bereits das bisher Bekannte läßt auf deren mechanische Zweckmäßigkeit schließen.

Aufbau der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen erläutert. Es werden der Aufbau von Bäumen aus biologischer und mechanischer Sicht vorgestellt, bereits bekannte Optimierungsmechanismen bezüglich der äußeren Baumgestalt und inneren Struktur erläutert und das Gefüge des natürlichen Faserverbundwerkstoffes Holz und dessen Zellen beschrieben. Nachfolgend wird auf die wegen ihrer Komplexität sehr interessantesten, bisher aber nur unzureichend erforschten Astgabeln und Zwiesel eingegangen. Eine Übersicht der in der Literatur gefundenen Angaben zu Wachstumsspannungen schließt die Ausführungen zu den Bäumen ab. Weiterhin werden die angewandten Untersuchungsmethoden und die dazugehörigen Meßapparaturen beschrieben. Neben dem für die Festigkeitsmessungen genutzten Fractometer III werden verschiedene Verfahren zur Bestimmung von Elastizitätsmoduln und Wachstumsspannungen erläutert. Zuletzt wird auf die CAO-Methode näher eingegangen, die hauptsächlich zur Gestaltoptimierung mechanisch belasteter Bauteile eingesetzt wird, mit der sich aber auch biologisches Wachstum computergestützt simulieren läßt.

Im dritten Kapitel werden die Ergebnisse von Messungen und Berechnungen mit den entsprechenden Ergebnissen von holzanatomischen Untersuchungen verglichen. Es wird der Einfluß permanenter und gleichgerichteter Belastung auf das Holz anhand der ermittelten Druckfestigkeitsverteilungen und Elastizitätsmoduln in Faserrichtung an nahezu horizontal angelegten Ästen aufgezeigt. Daneben wird der Einfluß dieser Materialanpassungen auf das Astwachstum untersucht.

Der Sommerbruch grüner Äste stellt einen erstaunlichen, weil nicht durch äußere Spitzenlasten ausgelösten Schadensfall dar. Eine mögliche Ursache für diesen besonderen Versagensfall sind Schubspannungen, die durch eine nachlassende Zugholzwirkung im Horizontalast induziert werden. Dies wird anhand von FEM-Rechnungen und aus der Literatur bekannten Festigkeitswerten diskutiert.

Die Wirkung der quer zur Faserrichtung wirkenden Belastungen im Bereich von Astanbindungen und Zwieseln auf die tangential Biegefestigkeit, die Holzanatomie und die

¹ Wachstumsspannungen sind im lebenden Holz generierte Eigenspannungen, sie werden später noch ausführlich beschrieben.

² Turgor: Druck, der von der in den Zellen einer Pflanze enthaltenen Flüssigkeit auf die Zellwände ausgeübt wird.

Wachstumsspannungen sind ein weiterer Bestandteil dieses Kapitels.

Das im Bereich von Wunden gebildete Kallusgewebe ist nicht mit dem überwallten Holz verbunden, so daß sich an diesen Stellen ein Riß befindet, dessen Einfluß auf die Ausbildung von Wachstumsspannungen untersucht wird.

Die Zusammenfassung aller Ergebnisse mit Schlußfolgerungen bezüglich der lastgesteuerten Anpassung kritischer Materialfestigkeiten und der Einflüsse von Wachstumsspannungen auf das Versagensrisiko erfolgt in Kapitel 4.

2 Grundlagen

2.1 Aufbau und Mechanik von Bäumen

Die Entwicklung der Bäume begann vor 400 Millionen Jahren aus Pflanzen, welche von den Meeren heraus das Festland eroberten. Im Lauf der folgenden 100 Millionen Jahre entwickelten sich daraus die ersten Bäume. Dies waren Baumfarne, welche in den Tropen bis in die heutige Zeit, inzwischen jedoch anders gebaut, überleben konnten sowie Bärlapp- und Schachtelhalmbäume, die heute nur noch als krautige Formen existieren. Die Urbäume waren bis zu 30 m hoch und ihre Stämme, die zu 99% aus Rinde bestanden, erreichten Durchmesser von bis zu 5 m. Während sie sich, wie heute noch ihre Nachfahren, mit Sporen fortpflanzten, trugen die Bäume der nächsten Entwicklungsstufe (vor ca. 280 Millionen Jahren) bereits Samen. Aufgrund der freien und unbedeckten Samenanlagen wurden diese Bäume Nacktsamer (*Gymnospermen*) benannt. Zu den Gymnospermen zählen heute vor allem die zapfentragenden Nadelbäume (*Koniferen*). Vor 100-75 Millionen Jahren entwickelten sich Bäume, die ihre Samen in eine Frucht einhüllten. Sie werden als Bedecktsamer (*Angiospermen*) bezeichnet und sind die Vorfahren der heutigen Laubbäume (BRAUN 1992).

Bäume bestehen, wie alle höheren Pflanzen, aus drei vegetativen Grundorganen: den Sproßachsen (Stamm und Äste), den Blättern und den Wurzeln. Im Gegensatz zu Tieren weisen Pflanzen eine „offene Gestalt“ (TROLL 1973) auf, d.h. sie sind während ihres ganzen Lebens in der Lage zu wachsen und neue Organe auszubilden. Das Wachstum der Bäume wird in zwei Abschnitte untergliedert (STRASBURGER 1998): das primäre Längen- und Dickenwachstum, welches sich auf die ersten Millimeter der Sproßachsen und Wurzelenden beschränkt, und das den gesamten Rest des Baumes betreffende sekundäre Dickenwachstum. Bestimmend für die äußere Gestalt sind neben den für jeden Baum unterschiedlichen Umgebungsbedingungen erblich festgelegte Wachstumsregulatoren. Nach STRASBURGER (1998) und MATTHECK (1992) sind die wichtigsten, das Wachstum regulierenden Mechanismen:

- Apicaldominanz
- positiver und negativer Geotropismus
- Phototropismus
- adaptives Wachstum

Die *Apicaldominanz* unterdrückt den Austrieb von Seitenknospen und einen zu steilen Anstieg der Seitenäste zugunsten des Wipfeltriebes. Damit wird der Behinderung des Apikaltriebes durch die Seitenäste und der gegenseitigen Behinderung einzelner Äste entgegengewirkt. Während der *positive Geotropismus* das Wachstum der Hauptwurzel in Schwerkraftrichtung bestimmt, läßt der *negative Geotropismus* den Hauptsproß entgegen der Schwerkraftrichtung wachsen. Damit versuchen Bäume ihren Kronenschwerpunkt über dem

Wurzelstock zu plazieren, was kürzere Hebelarme bedingt und die Biegebelastung am Stammfuß minimiert (MATTHECK 1997). Als *Phototropismus* wird das durch einseitig einfallendes Licht stimulierte Orientierungswachstum bezeichnet. Die Unabdingbarkeit des Lichts für die autotrophe³ Ernährung der Bäume mittels Photosynthese⁴ räumt dem Phototropismus eine beherrschende Stellung unter den Wachstumsregulatoren ein. Dieser „Hunger“ nach Licht läßt Bäume gelegentlich auch mechanisch unvorteilhaft wachsen. So bewirken schief zum Licht hin gewachsene Stämme oder weit ausladende Starkäste an der Basis große Biegemomente. Daß diese Belastungen in der Regel nicht zum Bruch führen, verdanken Bäume einem mechanisch stimulierten Wachstumsregulator, dem *adaptiven Wachstum*. Bereits vor der Jahrhundertwende wurde von METZGER (1893) und später von YLIEN (1952) ein Zusammenhang zwischen der mechanischen Belastung und der äußeren Gestalt eines Baumes festgestellt. METZGER wies bei Fichtenstämmen, die im wesentlichen durch Wind in ihrer hoch gelegenen Krone belastet werden, eine Proportionalität der Baumhöhe zur dritten Potenz des Stammdurchmessers ($h \sim d^3$) nach. Die gleiche Form ergibt sich analog für einseitig fest eingespannte Kragträger bei Belastung durch eine Querkraft am freien Ende und mit der Forderung nach einer konstanten Randfaserspannung. Diese Spannungskonstanz bei typischer Belastung konnte von MATTHECK (1990a, 1991) und Mitarbeitern für eine Fülle von weiteren Baumteilen wie Astanbindungen, Zwiesel, Wurzelanläufe und daneben auch für andere natürliche Lastträger wie Krallen, Knochen mittels der Methode der Finiten Elemente nachgewiesen werden. Er formulierte daraus das *Axiom konstanter Spannung* als allgemeines Designprinzip für biologische Lastträger und interpretierte den Baum als Kette lastgerechter Glieder, bei der jedes Glied entsprechend der

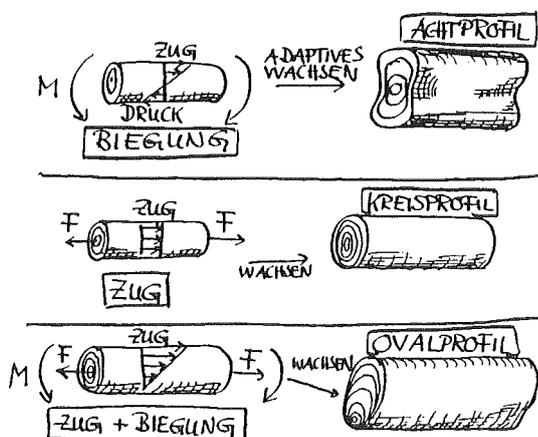


Abbildung 2.1: Lastgesteuertes Wachstum von Wurzeln.

zu tragenden Last dimensioniert ist. Jede im zeitlichen Mittel größere Belastungsänderung spiegelt sich in den lokalen Zuwachsraten und damit in den Jahrringbreiten wider. Abbildung 2.1 zeigt einige lastgesteuert gewachsene Wurzelquerschnitte.

BRUDER (1998) erweiterte die Gültigkeit des Axioms konstanter Spannung auf die Bodenverankerungen der Bäume. Vergleiche von Simulationsrechnungen mit Verteilungen der Wurzelmasse von Bäumen zeigten, daß die Scherbeanspruchung zwischen dem Wurzelballen und der umgebenden Erde konstant ist.

³ Autotroph: sich nur von anorganischen Stoffen ernährend.

⁴ Photosynthese: Aufbau organischer Substanzen aus anorganischen Stoffen in Pflanzen unter Mitwirkung von Sonnenlicht.

Neben der äußeren Gestalt ist auch die innere Struktur der Bäume weitgehend an die mechanischen Lasten angepaßt (MATTHECK und KUBLER, 1995), wie der Verlauf der Holzfasern und -strahlen zeigt (Aufbau und Funktion der Holzbestandteile werden im folgenden noch ausführlich behandelt). Die Orientierung der neugebildeten Holzfasern im aktuellen Jahrring erfolgt in der Regel parallel zu den Hauptspannungstrajektorien der Belastung und vermeidet somit Schubspannungen zwischen den Fasern (REUSCHEL 1999). Der annähernd axiale Faserverlauf im üblicherweise auf Biegung belasteten, geraden Stamm oder Ast erfüllt diese Aufgabe ebenso, wie der Drehwuchs in auf Torsion beanspruchten Baumteilen oder das komplexe Faserarrangement um eingewachsene Totäste und Fremdkörper. Charakteristisch ist die Spindelform, welche man sowohl makro- wie auch mikroskopisch besonders in Bereichen vorfindet, in denen eine Kraftflußumlenkung um ein Hindernis erforderlich ist (vgl. Abbildung 2.2). Die Spitzen der Spindel zeigen dabei immer in Richtung des vorherrschenden Kraftflusses. Ändert sich der Belastungszustand im Laufe eines Baumlebens nicht wesentlich, so gilt der schubspannungsfreie Zustand der Faserorientierung näherungsweise auch im Bauminneren (KRIECHBAUM 1994). Indizien dafür, daß der Verlauf der Holzstrahlen um die Leitgefäße ebenfalls auf eine Reduktion der Schubspannungen hin optimiert ist, wurden von ZIPSE (1997) an dem Querschnitt einer Edelkastanie aufgezeigt.

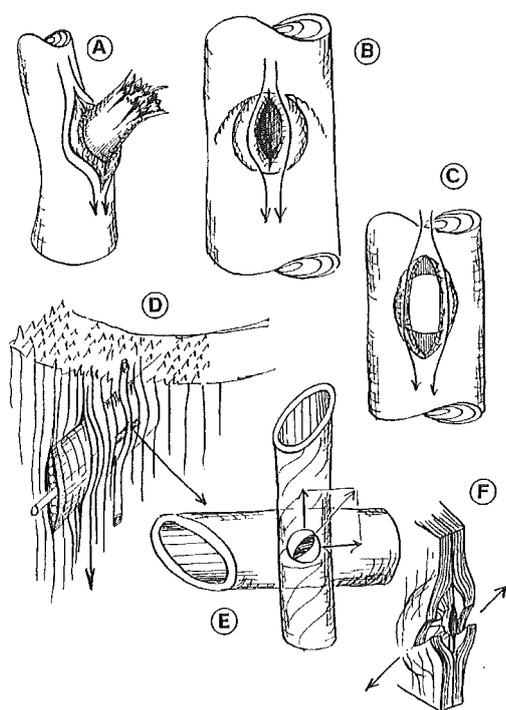


Abbildung 2.2: Die Spindelform als typische Gestalt zur Kraftflußumlenkung bei Astkragen (A), Wundöffnungen (B, C), Holzstrahlen (D) und Tüpfeln (E, F).

Eine weitere innere Optimierung der Bäume besteht in der Anpassung der lokalen Holzfestigkeiten an vorherrschende Belastungen. ALBRECHT (1995) und ZIPSE (1997) zeigten, daß an lokal hoch belasteten Stellen im Stammholz verschiedene versagensrelevante Festigkeiten signifikant erhöht sind. Insbesondere ALBRECHT wies nach, daß Bäume ihr Holz in radialer Richtung sowohl verfestigen als auch wieder entfestigen können. Dies ist sehr bemerkenswert, zumal das Holz im Bauminneren als biologisch weitgehend abgestorben gilt. Bäume können jedoch noch mehr: Sie sind in der Lage Wachstumsspannungen zu erzeugen, die äußeren Lasten entgegenwirken und strukturbedingt geringe Festigkeiten kompensieren (DIETRICH 1995).

Diese Arbeit stellt die mechanischen Aspekte der Bäume in den Vordergrund, was nicht bedeutet, daß die biologischen Aufgaben von Bäumen weniger effizient bewältigt werden. Eine umfassende Darstellung des kleinen Wunderwerks Zelle ist bei ALBERTS und JAENICKE (1990) zu finden, wo auch der Chemismus dieser winzigen,

perfekt geregelten Reaktoren erläutert wird. Die Effizienz des wichtigen Hydrosystems wird von ZIMMERMANN (1974) aufgezeigt. Wo mechanische mit biologischen Erfordernissen konkurrieren, werden Kompromisse auf höchstem Niveau getroffen, die eine Erfüllung aller Funktionen gewährleisten.

2.1.1 Der Aufbau des Holzes

Die Größe und Langlebigkeit⁵ der Bäume erfordert ein ganz besonderes Baumaterial, welches sowohl die biologischen als auch die mechanischen Aufgaben dauerhaft und zuverlässig bewältigt. Daß der Werkstoff Holz dem gerecht wird, beweist er im Dauerversuch auf dem Prüfstand des Lebens. Trotz der großen Vielfalt des Holzes (nach WAGENFÜHR (1996) existieren weltweit über 30000 verschiedene Holzarten) ist der grundsätzliche Aufbau bei allen gleich.

Der makroskopische Aufbau von Holz wird an dem Ausschnitt einer Eiche (Abbildung 2.3) erklärt. Von innen nach außen sind verschiedene Schichten angeordnet, die aus unterschiedlichen Zellen bestehen:

- Mark
- Jahrringe, bestehend aus Früh- und Spätholz
- Kambium
- Bast
- Borke

In radialer Richtung verlaufen vom Mark nach außen:

- Holzstrahlen
- Baststrahlen

⁵ Australische Rieseneukalypten und nordamerikanische Sequoias erreichen Wuchshöhen von über 100 m. Letztere können dabei bis zu 3000 Jahre alt werden, was im Vergleich zu einer 7200 Jahre alten japanischen Zeder noch geradezu jugendlich wirkt (MENNINGER 1995, WAGENFÜHR 1989).

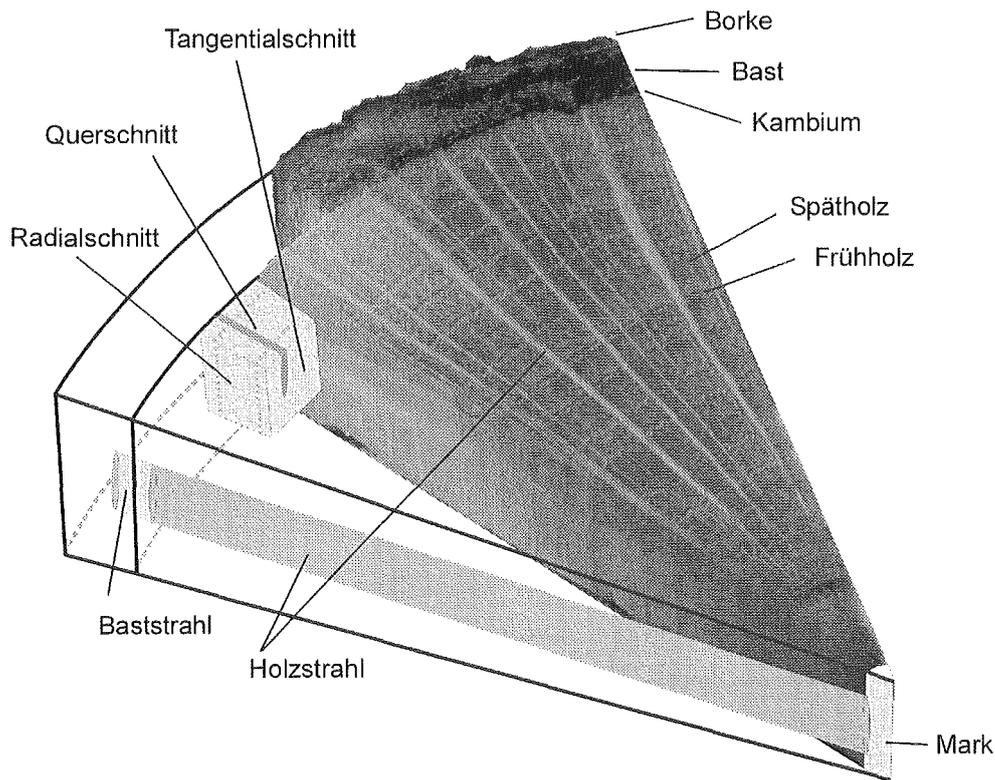


Abbildung 2.3: Schematisch ergänzter Ausschnitt aus einer Eiche.

Das in der Mitte befindliche *Mark* ist ein Grundgewebe und dient dem jungen Sproß im ersten Lebensjahr als Wasserleitung, zur Stoffspeicherung und Festigung. Danach stirbt das Mark im Laufe der Zeit ab und ist für den Stamm ohne wichtige Funktion. Radial vom Mark weg verlaufen die primären *Holzstrahlen*. Durch das Dickenwachstum vergrößert sich der tangentielle Abstand zwischen zwei benachbarten Strahlen mit jedem Jahr. Wird dabei ein artspezifischer Abstand überschritten, werden neue, sekundäre Holzstrahlen gebildet. Ein funktionaler Unterschied zwischen primären und sekundären Holzstrahlen besteht im Stamm nicht. Beide dienen neben der radialen Stoffleitung und -speicherung auch der radialen Festigung (MATTHECK und SCHWARZE 1994). Form und Größe der Holzstrahlen variieren sehr in den unterschiedlichen Baumarten, sind aber auch innerhalb eines Baumes von der Position im Holzkörper abhängig (MATTHECK et al. 1998). Je nach Anzahl der nebeneinander liegenden Zellreihen werden die Holzstrahlen als ein- oder mehrreihig bezeichnet. Nadelhölzer weisen nur einreihige Holzstrahlen auf, die aufgrund ihrer geringen Ausmaße mit bloßem Auge kaum zu erkennen sind.

Als *Jahrringe* werden die jährlichen, ringförmigen Zuwachsschichten der Bäume bezeichnet. Zu Beginn der Wachstumsperiode wird das *Frühholz* gebildet. Die Zellen des Frühholzes sind meist dünnwandiger und weitlumiger als die des nachfolgenden *Spätholzes*. Entsprechend hat das Spätholz eine höhere Rohdichte und Festigkeit, während der Beitrag des Frühholzes an der Wasserleitung größer ist. Der abrupte Übergang zwischen eng- und weitlumigen Zellen vom Spätholz eines Jahres zum Frühholz des nächsten kennzeichnet die *Jahrringgrenze*.

Weiterhin wird zwischen dem lebenden *Splintholz*, das sich auf die äußeren Jahrringe beschränkt, und dem inneren, toten, oftmals dunkel gefärbten *Kernholz* unterschieden.

Das Bildungsgewebe, *Kambium* genannt, umgibt den Holzkörper in der Art eines Zylindermantels. Es bleibt bis zum Absterben des Baumes im teilungsfähigen, embryonalen Zustand und bildet nach innen sekundäres *Xylem* (Holz) und nach außen sekundäres *Phloem* (Bast) aus. Die Bildung der unterschiedlichen Zellen erfolgt nicht willkürlich, sondern nach ganz bestimmten, artabhängigen Mustern und bedingt einen artspezifischen Holzaufbau. Außerhalb des Kambiums ist der *Bast* angeordnet und wird in radialer Richtung von den *Baststrahlen* durchdrungen. Die vordringliche Aufgabe des Bastes besteht darin, die in den Blättern gebildeten Assimilate stammabwärts zu leiten. Das Abschlußgewebe nach außen wird als *Borke* bezeichnet. Sie schützt die darunterliegenden Schichten vor Infektion, Verdunstung und mechanischer Beschädigung.

Die Struktur der Bäume kann neben der zuvor beschriebenen makroskopischen in drei weitere Organisationsebenen unterteilt werden: mikroskopisch, fibrillär und molekular. Die differente Entwicklungsgeschichte resultiert in teilweise unterschiedlichen Zelltypen bei Laub- und Nadelbäumen und erfordert eine gesonderte Betrachtung. Am strukturell einfacher aufgebauten Nadelholz werden die Grundlagen dargestellt, auf die bei der Betrachtung des Laubholzes nur noch verwiesen und um Spezifisches ergänzt wird.

Aufbau des Nadelholzes:

Das Holz der entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelbäume ist einfacher aufgebaut als das der Laubbäume. Es besteht hauptsächlich aus zwei Zelltypen, den Parenchymzellen und den Tracheiden. Die Parenchymzellen dienen der Stoffspeicherung und machen 4-12% der Holzmasse aus. Die Tracheiden, welche den Rest der Holzmasse stellen, erfüllen die Funktionen Festigung und Wasserleitung.

Die axial ausgerichtete Längstracheide wird als Urform der Holzzelle angesehen. Sie entsteht durch Teilung des Zellkerns einer Kambiumzelle (Fusiformitalie) und anschließende Trennung mit Bildung einer dünnen, gemeinsamen Zellwand, der *Mittellamelle*. Diese besteht aus einer Protopektin-Matrix, in die unstrukturiert Hemizellulosen eingelagert werden. Noch vor der vollständigen Fertigstellung der Mittellamelle beginnt das Protoplasma der Zelle mit der Anlagerung einer weiteren Zellwandschicht, der *Primärwand*. In ihrer Matrix befinden sich mit einem Anteil von ca. 10% regellos angeordnete Zellulose-Mikrofibrillen in einer Streutextur, deren Dichte zum Zellinneren hin zunimmt. Eine weitere Verdickung der Zellwand erfolgt von außen nach innen mit der Bildung der *Sekundärwand*, die sich wiederum in drei Schichten (S_1 -, S_2 - und S_3 -Schicht) unterteilt.

Die S_1 -Schicht ist mit 5-10% der Zellwanddicke relativ dünn, wobei die enthaltenen Fibrillen parallel in einer Schraubentextur mit 60° bis 80° Neigung zur Zellachse verlaufen. Der Hauptanteil wird von der S_2 -Schicht mit ca. 85% der Zellwanddicke gestellt. Ihre Fibrillen sind parallel ausgerichtet und im allgemeinen 5° bis 30° zur Zellachse geneigt. Die Gruppierung der Fibrillen wird gegenwärtig noch diskutiert. Nach STRASBURGER (1998) sind

diese in Mikrolamellen geschichtet, was auf die unterschiedliche Tag-Nacht-Produktion von Zellulose zurückgeführt und anhand elektronenmikroskopischer Aufnahmen von Schnittflächen belegt wird. SELL und ZIMMERMANN (1993, 1997) bzw. ENGELS und SCHWARZE (1997) schließen anhand elektronenmikroskopischer Aufnahmen von Bruchflächen bzw. Zersetzungsmustern selektiv holzabbauender Pilze auf überwiegend radiale Strukturen. Sofern die S3-Schicht vorhanden ist, bei manchen Hölzern kann sie unter bestimmten Umständen fehlen, bilden die in ihr enthaltenen Mikrofibrillen abwechselnd Schichten mit links- und rechtsdrehenden Spiralen, deren Neigungswinkel zur Zellachse 60° bis 90° betragen. Der Abschluß der Tracheidenwand nach innen wird häufig von einer dünnen, unstrukturierten *Warzenschicht* gebildet.

Nach Fertigstellung der Tracheidenwände beginnt die Inkrustierung der Zellwandschichten mit Lignin. Das Protoplasma stirbt in der Regel ab, da es keine Funktion mehr erfüllt und den Saftfluß durch die Zelle behindern würde. Durch das eingelagerte Lignin wird die Zellwand weitgehend undurchlässig, so daß der Stoffaustausch zwischen benachbarten Zellen hauptsächlich durch Zellwandöffnungen (Tüpfel) erfolgt. Diese entstehen, indem bei der Zellwandverdickung einzelne Stellen der Mittellamelle und Primärwand unverdickt bleiben und zu annähernd röhrenförmigen Kanälen geformt werden. Die Grenze zwischen benachbarten Tüpfeln bildet die aus der Mittellamelle und den beiden Primärwänden bestehende semipermeable Tüpfelmembran. Eine Besonderheit einiger Nadelhölzer sind Hoftüpfel mit einem verdickten Scheibchen in der Membranmitte (Torus), das abhängig vom osmotischen Druck in den Tüpfelhof gezogen wird und wie ein Ventil den Stoffaustausch regelt.

Die Wände der Parenchymzellen sind prinzipiell ähnlich aufgebaut wie die der Tracheiden. Ein funktioneller Unterschied besteht darin, daß die Speicherspeicherung aktive, d.h. belebte Zellen erfordert. Zu den Parenchymzellen werden auch parenchymatische Sekretzellen (Epithelzellen) gezählt, welche Harz produzieren und speichern. Das Harz dient bei Beschädigung des Holzes als Wundverschluß und hemmt Insekten, Pilze und Bakterien.

Die Kernholzbildung ist eine Folgeerscheinung des Verschlusses der Wasserleitung in den inneren Jahrringen und der Nekrobiose im parenchymatischen Gewebe. Vor dem Absterben wandeln die Parenchymzellen ihre Reservestoffe (Stärke) in Kernstoffe (häufig Gerbstoffderivate) um und lagern diese in den Zellwänden des Kerns ein, wodurch dieser resistenter gegen Zersetzung wird.

Aufbau des Laubholzes:

Die fortgeschrittene stammesgeschichtliche Entwicklung der Laubbäume führte zu einer Spezialisierung und besseren Funktionsanpassung im anatomischen Bau des Laubholzes. Aus den ursprünglichen Tracheiden, die in Laubhölzern nur zu geringen Anteilen bzw. gar nicht vorhanden sind, leiten sich die für die Stoffleitung zuständigen Gefäßtracheiden bzw. Gefäße (Tracheen) und die für die Festigung zuständigen Fasertracheiden und Librifasern ab.

Die Entwicklung der Laubholzzellen verläuft ähnlich wie die der Nadelholztracheiden, wobei die ausdifferenzierten Zellen besser an ihre Funktion angepaßt sind. Offensichtlich wird dies anhand der Gefäße, welche bei großem Durchmesser und geringer Zellwanddicke ein besonders großes Lumen aufweisen. Die Zellwände zu axial anschließenden Gefäßen sind weitgehend durchbrochen, um den Stoffstrom möglichst wenig zu behindern. Auch hier stirbt der Zellkern (Nukleus) vor Aufnahme der Funktion ab. Durch diesen Aufbau erzielen Laubbäume gegenüber Nadelbäumen wesentlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Hydrosystem.

Nehmen Anzahl und Durchmesser der Gefäße vom Früh- zum Spätholz ab, so spricht man von *ringporigem* Holz (z. B. Eiche, Esche). Bei regelmäßigen, statistischen Anordnungen und nur geringen Durchmesserunterschieden gilt das Holz als *zerstreutporig* (z. B. Pappel, Rotbuche). Übergangsformen werden als *halbringporig* (z. B. Walnußbaum, Kirsche) bezeichnet.

Im Gegensatz zu Gefäßen sind Fasern durch besonders dicke Zellwände und nur wenig Lumen an ihre Stütz- und Festigungsfunktionen angepaßt. Bis zu ihrem Tod können diese Zellen daneben auch Stoffe speichern, eine Funktion, die ansonsten von den langlebigeren Parenchymzellen erfüllt wird.

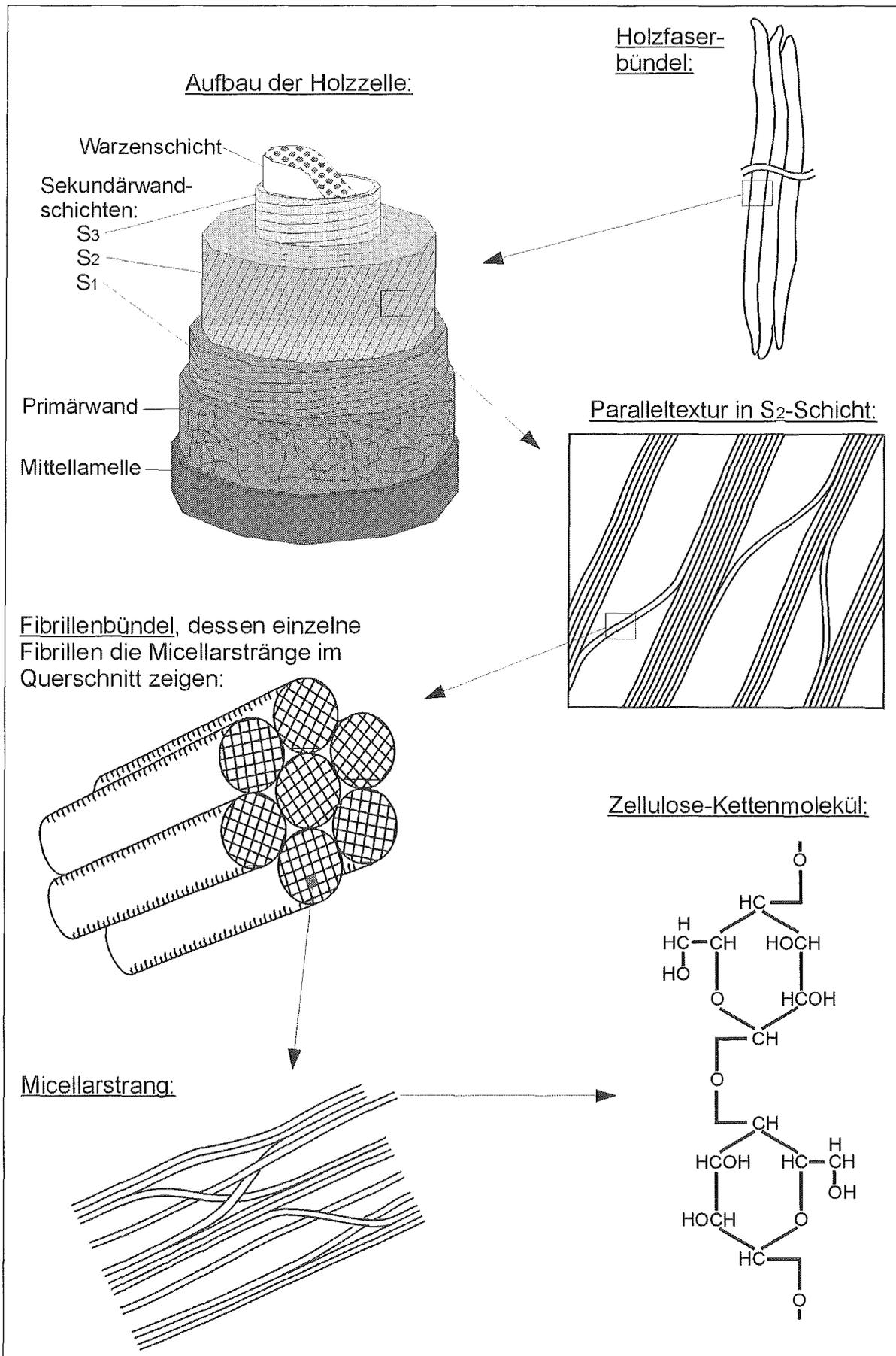


Abbildung 2.4: Aufbau der Holzfasern.

Die *Baumaterialien der Zellwände* werden in Grundsubstanzen, Gerüstsubstanzen und Inkrusten unterschieden. Hemizellulosen und in geringeren Mengen Pektine bilden die Matrix, als Gerüstsubstanz dient Zellulose. Lignin inkrustiert die Zellwand. Weitere Substanzen (Asche, Harze, Fette, etc.) sind in geringen Anteilen vertreten und für die einheimischen Hölzer nur von untergeordneter Bedeutung.

Die Verteilung der mengenmäßig häufigsten Bestandteile in der Zellwand nach PANSHIN und DEZEEUW (1980) ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Den Hauptbestandteil des Holzes bildet mit einem Gewichtsanteil von 35 bis 50% die *Zellulose*, ein aus 1000 bis 4000 aneinandergereihten Glucoseeinheiten bestehendes Polysaccharid. Aufgrund der starken Assoziationstendenz lagern sich 50 bis 100 Kettenmoleküle unter Ausbildung von Wasserstoffbrücken aneinander und bilden ein *Micell*. Einige Moleküle laufen ununterbrochen durch mehrere Micelle und verflechten diese im *Micellarstrang*. *Mikrofibrillen* wiederum vereinigen ca. 20 Micellarstränge und sind häufig, besonders in der Sekundärwand, zu *Fibrillenbündeln* zusammengefaßt (DTV-ATLAS 1990). Aus der äußersten Zellwandschicht können sich einzelne Fibrillen durch die gemeinsame Mittellamelle hindurch in die Nachbarzelle erstrecken (MÜHLETHALER 1953) und beide miteinander verbinden. Röntgenographische Untersuchungen (DADSWELL und WARDROP 1955) zeigen, daß die Mikrofibrillen neben kleineren amorphen Bereichen zu großen Teilen eine kristalline Ordnung aufweisen. Die mechanischen Eigenschaften der Zellulose sind beachtlich: Trotz geringer Dichte ($1,5 \text{ g/cm}^3$ nach GORDON 1989) liegen Elastizitätsmodul (137 GPa nach KOPONEN et. al. 1989) und Zugfestigkeit (1,1 GPa von FREY-WYSSLING 1959 an Flachsfasern gemessen) in der Größenordnung von Metallen.

Der Anteil der *Hemizellulosen* an der Zellwand beträgt 20-30%. Es sind aus Zucker (Pentosen und Hexosen) zusammengesetzte polymere Kohlenhydrate, die kristalline und amorphe Bereiche aufweisen. Hemizellulosen sind vornehmlich in der Sekundärwand an die Zellulose angelagert. Sie stützen und versteifen das Gefüge.

Lignine sind verästelte und dreidimensional zu einem Makromolekül vernetzte Mischpolymerisate verschiedener Phenylpropanderivate, deren Anteil zwischen 20% und 30% der Holzmasse beträgt. Sie sind in der Lage, in interfibrilläre Räume hineinzuwachsen und verbinden sich chemisch und physikalisch mit der Zellulose (WAGENFÜHR 1989).

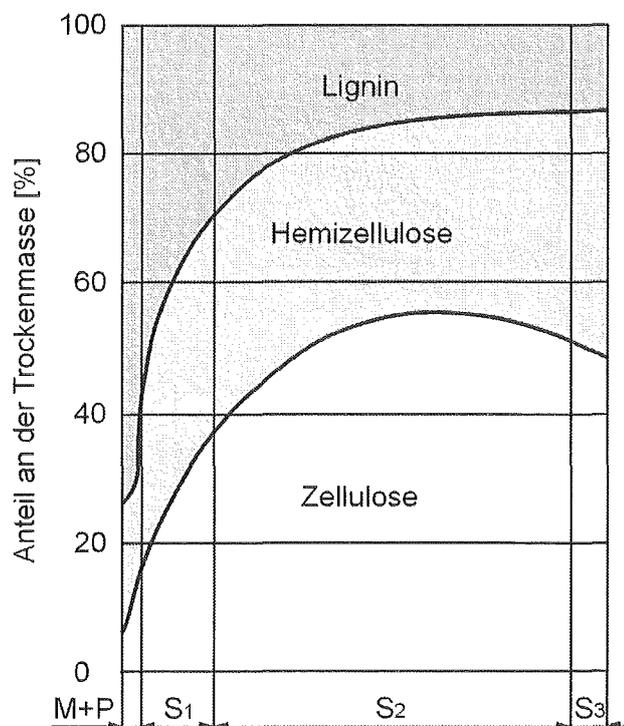


Abbildung 2.5: Verteilung der chemischen Bestandteile innerhalb der Zellwandschichten (PANSHIN und DEZEEUW 1980).

Dadurch wird die Zellwand ausgesteift und deren Festigkeit erhöht. Der größte Effekt wird durch die hydrophobe und dehydrierende Wirkung des Lignins erzielt. Die Dehydratation der Kohlenhydratbaustoffe (Zellulose, Hemizellulosen und Pektine) steigert deren übermolekulare Haft- und Bindungskräfte und erhöht damit die Naßfestigkeit um das 6-10fache (KLAUDITZ 1952).

Pektine sind aus Galakturonsäure zusammengesetzte, makromolekulare Stoffe mit Fadenstruktur, deren Anteil an der Holzmasse zwischen 1% (FENGEL und WEGENER 1984) und 18% (KLAUDITZ 1952) beträgt. Sie sind hauptsächlich in der Mittellamelle lokalisiert. Die Bedeutung der Pektine liegt in der Funktion als Kittsubstanz und lastübertragende Verbindung zwischen den Zellen.

Holz, das besondere Aufgaben erfüllt oder aufgrund äußerer Einwirkungen entsteht und sich im anatomischen Aufbau vom Normalholz unterscheidet, wird als Sondergewebe bezeichnet. Das in der Natur am häufigsten vorzufindende Sondergewebe ist das **Reaktionsholz**. Hierbei handelt es sich um ein aktives Richtgewebe, das die Organe des Baumes zielgerichtet bewegen kann. Es dient dazu, die aus der ursprünglichen Lage gebrachten Stämme oder Äste wieder in ihre Normalstellung zurückzubringen bzw. in eine günstigere (z. B. hinsichtlich größerer Lichtausbeute) zu bewegen. Äußerlich ist Reaktionsholzbildung in der Regel mit exzentrischem Dickenwachstum verbunden. In der Reaktionsholzzone erfolgen große Zuwächse, auf der gegenüberliegenden Sproßseite nur geringe. Die Benennung des Reaktionsholztyps erfolgt aufgrund der axialen Kräfte, die das Reaktionsholz aufbringt, um den Sproß in die gewünschte Richtung zu biegen. Während Nadelhölzer in der Regel *Druckholz* ausbilden, erzeugen Laubhölzer *Zugholz*. Demzufolge befindet sich das Druckholz regelmäßig in den Unterseiten der Äste und schiefstehenden Stämme von Koniferen. Das Zugholz hingegen ist meist in den Oberseiten entsprechender Laubbaumorgane vorzufinden.

Anatomisch unterscheiden sich Druck- von Normalholztracheiden durch eine geringere Länge, dickere Zellwände, rundlichere Querschnitte und dadurch bedingte größere Interzellularräume. Weiterhin verlaufen die Fibrillen in der S2-Schicht mit Winkeln von ca. 45° flacher und der Ligningehalt ist größer als im Normalholz (TIMELL 1986). Makroskopisch ist Druckholz besonders an Querschnitten durch seine rötliche Färbung erkennbar, weshalb es oftmals auch als Rotholz bezeichnet wird.

Zugholzfasern unterscheiden sich anatomisch von Normalholzfasern durch die Präsenz einer zusätzlichen, gelatinösen Zellwandschicht, auch G-Schicht genannt. Diese G-Schicht kann entweder auf die innerste Zellwandschicht (S3) aufgelagert sein, bzw. die S3-Schicht oder die S3- und die S2-Schicht ersetzen (KOLLMANN und COTÉ 1968). Zugholz weist geringere Lignin- und höhere Zellulosegehalte auf als Normalholz (JAYME und HARDERS-STEINHÄUSER, 1953). Dies wird auf die G-Schicht zurückgeführt, die hauptsächlich aus Zellulose besteht und deren Fibrillen nahezu parallel zur Zellachse ausgerichtet sind (JACCARD und FREY 1928).

Unterschiede in den Abmessungen von Zug- und Normalholzzellen werden kontrovers diskutiert. CHOW (1946) fand längere Zellen mit geringeren Durchmessern im Zugholz als im Normalholz, DADSWELL und WARDROP (1955) stellten keine signifikanten Unterschiede fest. Mit bloßem Auge ist Zugholz nur schwer zu erkennen. Indizien für das Vorhandensein von

Zugholz sind eine weiße oder silbrige Färbung, der es auch den Namen Weißholz verdankt. Mikroskopisch gelingt der Nachweis anhand in Safranin-Astrablau-Lösung eingelegten und anschließend gewaschenen und entwässerten Dünnschnitten (AUFSESS 1973, FREUND 1970, WEBER et al. 1999). Der rote Safraninfarbstoff bindet sich an das Lignin und markiert lignifizierte Zellwandschichten, während der Astrablau-Farbstoff in die intermicellaren Hohlräume der Zellulose dringt. Dies gelingt nur an Stellen, an denen diese nicht durch Lignin maskiert ist. Unter dem Durchlichtmikroskop unterscheidet sich die nichtlignifizierte G-Schicht somit durch eine intensive Blaufärbung von den restlichen, rötlich gefärbten Zellwandschichten.

Ein weiteres Sondergewebe ist das **Wundholz**. Es entsteht bei Verletzungen des Baumes und vermag Wundstellen teilweise oder vollkommen zu überwallen, wobei es keine Verbindung mit dem abgestorbenen, darunterliegenden Holz der Wundfläche eingeht. Wundholz unterscheidet sich anatomisch vom Normalholz durch einen unregelmäßigen und welligen Faserverlauf, einen höheren Anteil an parenchymatischem Gewebe und geringeren Anteilen an Fasern und Gefäßen (BOSSHARD 1984).

2.1.2 Die mechanischen Eigenschaften des Holzes

Holz ist ein Produkt lebendigen Wachstums. Es wird durch äußere Bedingungen wie Bodenbeschaffenheit, Klima oder einwirkende mechanische Kräfte stark beeinflusst. Daneben wirken auch erbliche Anlagen auf Baumgestalt und Eigenschaften des Holzes ein. Eine Vielzahl von Faktoren, die vereint, getrennt oder auch wechselnd wirksam sein können, beeinflussen das Holz während seines langen Wuchszeitraumes, abgestuft auch noch durch genetisch bedingte Verschiedenheiten in der Reaktion der einzelnen Individuen auf Umwelteinflüsse. Das führt zu großen Unregelmäßigkeiten in der Beschaffenheit, die sich schon in der Stammform, mehr aber noch in den großen Schwankungen der mechanisch-technischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften des entstehenden Holzes ausprägen. So ist es erklärlich, daß Holz nie in genau gleicher Form und Beschaffenheit entsteht. Eine nahezu völlige Gleichmäßigkeit der Eigenschaften wie bei Metallen, Kunststoffen, Beton und anderen technisch erzeugten Werkstoffen kann man daher beim Holz als organisch gewachsenen Werkstoff nicht erwarten.

Wird ein Holzkörper mazeriert⁶ oder mechanisch stumpf zerlegt, z. B. durch grobes Zermahlen, erhält man ein faseriges Gemenge, ein Umstand der besonders in der Papierindustrie ausgenutzt wird. Ursache der faserigen Strukturen ist die Aneinanderreihung vieler, überwiegend langgestreckter Zellen, die im intakten Holz mit den Nachbarzellen verbunden sind. Dieser Aufbau aus verklebten und teils verwobenen Fasern ist ein Prinzip, das sich, analog der Spindelform, in allen Organisationsebenen reproduziert (vgl. Abbildung 2.2 und 2.4) und die mechanischen Eigenschaften des Holzes maßgeblich bestimmt.

⁶ Mazeration: mikroskopisches Präparationsverfahren zur Isolierung von Gewebsanteilen (z. B. von einzelnen Zellen) unter Erhaltung der Zellstruktur (BROCKHAUS 1995).

Während Verbunde mit gleichmäßig und statistisch regellos verteilten Fasern als quasi-isotrope Werkstoffe behandelt werden, bedingt die Orientierung der Fasern eine Anisotropie der Materialeigenschaften (MOSER 1992). Im Baum sind die Zellachsen vorwiegend in Richtung der Sproßachse und zum Teil auch radial (Holzstrahlen) ausgerichtet. Damit kann näherungsweise von *orthotropen Materialeigenschaften* ausgegangen werden (DINWOODIE 1981), wobei der Stamm als Zylinder mit axialen, radialen und tangentialen Orthotropieachsen betrachtet wird.

Parallel zu den Fasern sind die Festigkeit und die Steifigkeit des Holzes am größten. Mit zunehmender

Abweichung von der Faserrichtung nimmt die Größe dieser Materialeigenschaften ab. Die Abhängigkeit der Zug- und Druckfestigkeit des Eschenholzes vom Winkel zwischen der Faser- und der Lastrichtung ist in Abbildung 2.6 dargestellt (KOLLMANN 1982). Bei dem Faser-Last-Winkel von 90° entsprechen die Werte den Querfestigkeiten des Holzes, wobei in dieser Quelle der Unterschied zwischen radialer und tangentialer Querfestigkeit vernachlässigt wird. Auch die Elastizitätsmoduln zeigen eine deutliche Richtungsabhängigkeit. Dies äußert sich am ausgeprägtesten bei der Zugelastizität, die analog der Zugfestigkeit bereits bei einer Winkelabweichung von 15° auf beinahe die Hälfte ihres Maximalwertes sinkt (KEYLWERTH 1951). Die Elastizitätsmoduln verhalten sich in grober Näherung in axialer zu radialer zu tangentialer Richtung ungefähr wie 20:1,6:1 (BODIG 1982). Genauere und artspezifische Angaben können geeigneten Tabellen (LAVERS 1983, U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY 1987) entnommen werden.

Die lokalen Eigenschaften des Holzes werden entscheidend vom Zeitpunkt seiner Bildung innerhalb der Wachstumsperiode geprägt. So sind Dichte, Festigkeit und Elastizitätsmodul im Spätholz wesentlich größer als im Frühholz. Bei Messungen muß diesem Umstand entweder durch eine mehrere Jahrringe umfassende Probengeometrie oder durch eine größere Probenanzahl und Mittelung der einzelnen Meßwerte Rechnung getragen werden. Abhängig von der Belastungsart kann sich auch das Versagen im Früh- und Spätholz unterscheiden. Bei Belastung quer zu den Fasern erfolgt der Bruch im Spätholz in der Regel durch Separation der Zellen, d.h. die Risse verlaufen entlang der Mittellamelle (GIBSON und ASHBY 1988), dem Bindeglied der Zellen. Das Frühholz hingegen versagt durch intrazelluläre Risse, da es weniger Energie erfordert, die relativ dünnen Zellwände zu zerreißen, als den Riß entlang der Mittellamelle voranzutreiben (TAN et al. 1995).

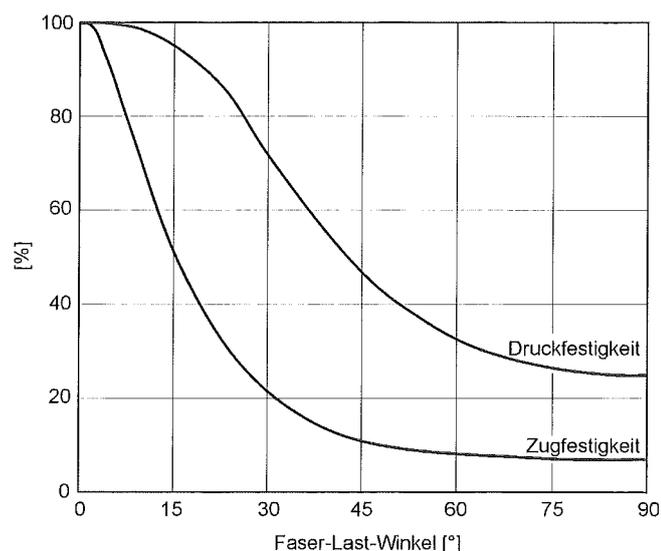


Abbildung 2.6: Abhängigkeit der Druck- und Zugfestigkeit vom Winkel zwischen Last- und Faserrichtung bei Eschenholz (nach KOLLMANN 1982).

Besonderen Einfluß auf die Materialeigenschaften hat auch der Feuchtegehalt des Holzes. Saftfrisches Holz weist in der Regel, abhängig von Baumart, Jahreszeit und Ursprungsort im Holzkörper Feuchtegehalte über 60% auf (KOLLMANN 1982). Wird es getrocknet, so bleiben die Festigkeiten und Elastizitätsmoduln bis zur Fasersättigung⁷ (ca. 30%) näherungsweise konstant und nehmen darunter rapide zu. Dementsprechend muß zwischen biologischer Festigkeit, d.h. der Festigkeit im vollkommen durchfeuchteten Holz, und technischer Festigkeit, d.h. der Festigkeit im lufttrockenen Zustand, wie es für technische Zwecke verwendet wird, unterschieden werden (KLAUDITZ 1952).

Die meisten Literaturangaben beziehen sich auf die technische Festigkeit bei etwa 12% Holzfeuchte. Anhand der wenigen tabellierten Festigkeiten feuchter Hölzer kann man nicht direkt auf die „Festigkeit eines Baumes“ schließen, da Standorteinflüsse und lokaler Ursprung der Probe im Baum stark variierende Holzqualitäten bedingen und daneben Wachstumsspannungen berücksichtigt werden müssen. Die Druck- und Biegefestigkeit sowie der Elastizitätsmodul sind in Abhängigkeit der Holzfeuchte in Abbildung 2.7 dargestellt.

Ein weiterer feuchteabhängiger Effekt ist die anisotrope Schwindung des Holzes. Vom nassen bis zum trockenen Zustand beträgt nach KOLLMANN (1982) die Schwindung des Buchenholzes in longitudinaler Richtung ca. 0,4%, radial ca. 6% und tangential ca. 12%. Auch hierbei treten die größten Schwindungsanteile unterhalb der Fasersättigung auf, doch setzen nach STEVENS (1938) die ersten Schwindungen bereits oberhalb davon ein, was er auf Kapillarwirkung in den Zellumen zurückführt. Als Folge der Schwindungsanisotropie treten häufig Trocknungsrisse auf, die stets parallel zu den Holzstrahlen verlaufen. Die Ursache der anisotropen Schwindung wird in der Entquellung des hydrophilen Pektins der Mittellamelle gesehen (FREY-WYSSLING 1940).

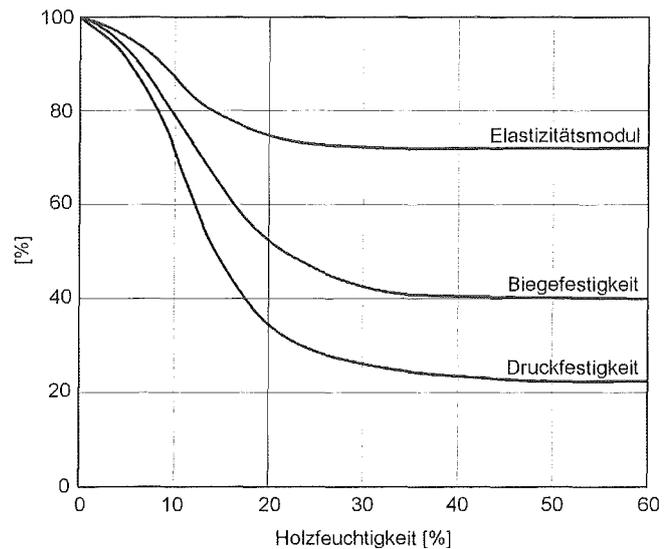


Abbildung 2.7: Abhängigkeit des Elastizitätsmodules sowie der Biege- und Druckfestigkeit von der Holzfeuchte bei Kiefernholz (nach KOLLMANN 1982).

⁷ Fasersättigung ist erreicht, wenn alle chemischen und physikalischen Rückhaltekräfte für Wasser in der Holzzellwand abgesättigt sind (BOSSHARD 1984).

2.1.3 Astanbindungen

Die Seitenzweige der Bäume gehen in der Regel aus einer in der Blattachsel entstehenden Knospe hervor. Unter Blattachsel versteht man den Winkel, den das Blatt mit dem über seiner Ansatzstelle gelegenen Sproßteil bildet. Durch die wiederholte Bildung von Seitensprossen, die ebenfalls zur Verzweigung (*Ramification*) befähigt sind, verwandelt sich der ursprünglich einfache Sproß in ein Sproßsystem, was zur charakteristischen Gestalt der Bäume führt.

Die Anbindung der Nebensprosse ist hinsichtlich des Gefäßsystems eingehend untersucht worden (BÖHLMANN 1970, ESAU 1977). Die Untersuchungen beschränkten sich dabei in der Regel auf junge Nebenachsen, an denen das Gewebe übersichtlich angeordnet ist und die einfach in der Handhabung sind. BÖHLMANN (1970) unterscheidet bezüglich des Gefäßsystems zwei Abzweigungstypen. Der erste Typ (Esche, Nußbaum) weist keine direkte Leitverbindung zwischen dem Ast und dem apikalen Teil der Trägerachse auf. Der zweite Typ (Buche, Eiche) weist im Entstehungsjahr und der ersten Hälfte des folgenden Jahres eine direkte Leitverbindung zwischen dem Ast und dem apikalen Teil der Trägerachse auf, unterbricht diese aber mit zunehmendem Alter. Beiden Typen gemein ist die Ausbildung einer „Störzone“ in der Astachsel. Nach Böhlmann unterbindet diese Störzone den unmittelbaren Stoffaustausch zwischen dem apikalen Teil der Trägerachse und der Seitenachse. Damit wird, entsprechend der apikalen Dominanz, der Einfluß der Trägerachse auf die Seitenachse vermindert und diese in funktioneller Hinsicht weitgehend eigenständig.

LEV –YADUN und ALONI (1990) fanden in den Astachseln kreis- und spiralförmige Verläufe der Leitgefäße (und damit auch der Fasern) und sahen darin ebenfalls eine Trennzone zwischen Ast und Stamm. Neben der Hemmung der hormonellen Einflußnahme mittels Phytohormonen (Auxine) des Stammes auf den Ast, vermuteten sie darin auch eine Barriere für holzabbauende Pilze und in das Hydrosystem eindringende Luft. Größe und Anzahl der Zonen mit spiralförmigen Gefäß- und Faserverläufen steigen mit dem Astdurchmesser und der Anzahl der von einer Stelle abgehenden Äste. Anatomisch fällt die Störzone besonders durch den unregelmäßigen Verlauf ihres Gewebes auf. Daneben ist im Gewebe der Störzone der Parenchymanteil höher, die Anzahl der Gefäße geringer und der Durchmesser der Gefäße kleiner als im normalen Gewebe. Besonders bei der Eiche ist in der Störzone ein höherer Anteil an Holzstrahlen auffällig, die in der Regel breiter sind als vergleichbare im Normalholz.

Ein mechanisch orientiertes Modell der Astanbindung stammt von SHIGO (1985). Danach besteht die Astanbindung aus einem verwebten Faserverbund von seitlich einlaufenden, nach unten umgelenkten Fasern des Astes und von oben nach unten verlaufenden, seitlich um den Ast herumgeführten

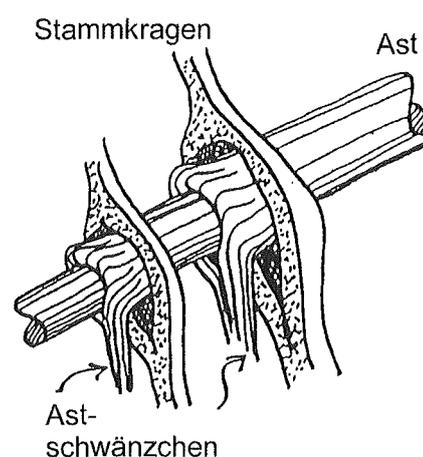


Abbildung 2.8: Faserverlauf in der Astanbindung nach Shigo (Zeichnung: C. Mattheck).

Stammfasern. Dieser Verlauf ist in Abbildung 2.8 zeichnerisch durch auseinandergezogene Zuwachszonen von Ast- und Stammfasern verdeutlicht.

Nach SHIGO (1990) befinden sich in der Astachsel keine vom Ast zum Stamm durchgehenden Gefäße und Fasern. Weiterhin vermutet er, daß dort die Astfasern mit den Stammfasern nicht vollständig verwachsen sind. Beides schließt er aus der Beobachtung von Abschottungszonen, die durch Pilzbefall hervorgerufen wurden, und der Tatsache, daß Äste beim Ausziehen zuerst in der Achsel einreißen und sich dort am leichtesten vom Stamm lösen lassen.

Die umfassendsten mechanischen Betrachtungen der Astanbindung wurden von YOSHIDA et al. (1994) angestellt. Anhand verschiedener zweidimensionaler FE-Modelle mit und ohne Ausrundungen der Astanbindung sowie mit iso- als auch orthotropen Materialeigenschaften schließt er, daß Spannungskonzentrationen durch Ausrundungen gemindert werden und daß eine Faserkontinuität, die er mit der *gleichen* Materialorientierung in Ast und Stamm realisiert, ebenfalls Spannungsspitzen senkt. Interessant sind seine Messungen, die im Ast, besonders in der Nähe der Anbindung, wesentlich geringere axiale und deutlich höhere radiale sowie tangentielle Elastizitätsmoduln als im Stamm aufzeigen. Auch die daraus folgende Simulation „weicher“ Äste führte zu einer Reduktion der Spannungen auf der Oberfläche des Modells. Aus den Messungen der longitudinalen Wachstumsspannungen im Ast folgert YOSHIDA eine Abhängigkeit der Baumgestalt von diesen, da sie die Äste aufwärts drücken bzw. ziehen. Eine Übertragung der Wachstumsspannungen auf das FE-Modell erfolgte nicht.

In Abbildung 2.9 ist ein aus seiner Anbindung gerissener Kastanienzweig mit den umgelenkten Zweig- und Stämmelingsfasern zu sehen. Nach dem ersten Anreißen in der Astachsel läßt sich der Riß mit geringem Kraftaufwand nach unten in den Stämmelng fortführen.



Abbildung 2.9: Aus seiner Anbindung gerissener Kastanienzweig.

Der Grund, warum sich nach unten gezogene Äste häufig leichter aus dem Stamm reißen lassen als zu brechen, liegt in der Faseranordnung. Die Biegung führt im Ast zu Spannungen, welche entlang der Fasern wirken. Dermaßen belastet weisen Faserverbundwerkstoffe höchste Festigkeiten auf. In Folge der Faserumlenkung an der Anbindung werden die Zugspannungen in der Astachsel auch quer zu den Fasern in den Stamm eingeleitet. Die Querkzugfestigkeit von Holz beträgt aber nur einen Bruchteil der Längszugfestigkeit (vgl. Abbildung 2.6). Das Versagen in der Astachsel setzt damit bei Überschreitung der Zugfestigkeit quer zu den Fasern ein, wobei Ast- und Stammfasern separiert werden.

Sofern sich in diesen Bereichen keine eingewachsene Rinde befindet, wie es gelegentlich bei Steillästen der Fall ist, kann aus der Trennung von Ast- und Stammfasern nicht auf eine mangelhafte Verwachsung derselben geschlossen werden. Eigene Versuche mit Farbstoff zeigen, daß auch in der Astachsel Verbindungen zwischen Ast und Stamm bestehen. In den Stamm eingebrachter Farbstoff gelangt über die Achsel in den Ast und umgekehrt. Wenngleich sich in diesem Bereich Ast und Stamm nicht mit durchgehenden Gefäßen und Fasern verbinden, sind benachbarte Zellen zumindest so gut aneinander gefügt, daß ein Stoffaustausch über Tüpfel erfolgen kann.

2.1.4 Zwiesel

Beim Zwieselwuchs entstehen anstatt der normalen Einzelstammform zwei Stämme, wodurch eine Vergabelung erfolgt. Die Ursachen sind vielfältig: Neben mechanischen Schädigungen des ursprünglichen Wipfeltriebes, Insektenbefall, Wildverbiß und Spätfrost sind auch Umgebungsbedingungen und genetische Anlagen für die Zwieselbildung verantwortlich.

Zwiesel wurden in den vorausgegangenen Jahrhunderten als vertikale und horizontale Träger im Holzbau eingesetzt (ZWERGER 1997). Die Gabelung konnte das Kopfband⁸ nicht nur gleichwertig ersetzen, sondern erwies sich stabiler als jede andere Verbindung. Heute zählt die Zwieselbildung aus forstwirtschaftlicher Sicht zu den häufigsten „Fehlern“ in der Stammform (KÖNIG 1958).

Von MATTHECK (1997) stammt die Einteilung nach mechanischen Gesichtspunkten in Zug- und Druckzwiesel (vgl. Abbildung 2.10). Danach ist der Zugzwiesel an eine Belastung angepaßt, bei der sich die Teilstämme infolge ihres Eigengewichtes voneinander wegbiegen, wie bei Solitäräbäumen, die ihre Äste seitwärts zum Licht strecken. Druckzwiesel hingegen sind häufig in engen Beständen zu finden. Beide Stämmlinge wachsen steil nach oben zum Licht, können kaum Abstand voneinander halten und sind an der Basis in einem spitzen Winkel vereinigt. Sekundäres Dickenwachstum der Stämmlinge führt zu deren Berührung und zu Kontaktspannungen in diesen Bereichen. Die Berührflächen werden gemäß dem Axiom der konstanten Spannung weiter vergrößert, so daß beide Stämmlinge innenseitig verflachen und ebene Kontaktflächen ausbilden. Wenn die von beiden Seiten auf die Kontaktflächen zulaufenden Jahresringe stetig und knickfrei ineinander übergehen, wird die Rinde durchbrochen und man spricht von einer Baumverschweißung. Ab diesem Zeitpunkt werden von beiden Stämmlingen durchgehende, gemeinsame Jahrringe über der Verschweißung gebildet. Dazwischen verbleibt die Rinde der ursprünglichen Kontaktflächen erhalten und wird mit der Zeit an den Seiten von den neugebildeten Jahrringen umschlossen.

⁸ Das Kopfband dient der Aussteifung in Holzrahmenwerken. Es verbindet, meist im Winkel von 45°, die vertikalen Träger mit den horizontalen.

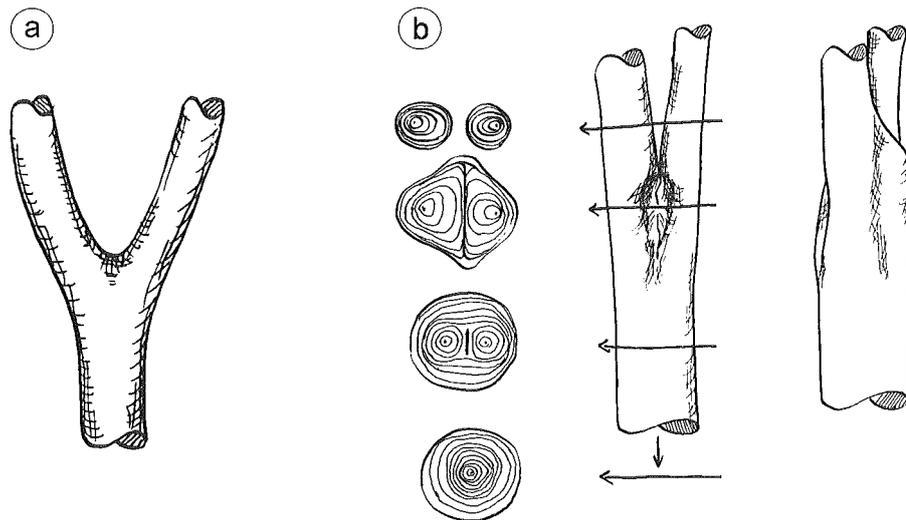


Abbildung 2.10: Zug- (a) und Druckzwiesel (b). In den Querschnitten des Druckzwiesels sind der Rindeneinschluß und die umlaufenden Jahrringe zu erkennen (Zeichnung: C. Mattheck).

Nach Freistellungen oder Bestandslichtungen kann der Rindeneinschluß aus mechanischer Sicht problematisch werden, wenn ein Ausbreiten der Äste Zugbelastungen der Baumgabel bewirkt oder ein Gegeneinanderschwingen der Stämmlinge bei Windbelastung dies zur Folge hat. Dann müssen die wenigen äußeren, alles umschließenden Jahrringe die ganze Zugbelastung übertragen, während der ansonsten vorherrschende Anpressdruck, an den diese Zwieselform angepasst ist, vom Rindeneinschluß mitgetragen wird. In Abbildung 2.11 ist ein vom Sturm abgerissener Stämmling eines Buchendruckzwiesels dargestellt. Deutlich sind die eingeschlossene Rinde und die Verbreiterungen an den Seiten („Ohren“) zu sehen. Die Bruchfläche verläuft von der Gabelung weit nach unten im Stamm. Nach dem ersten Aufreißen im Zwiesel können die uniaxial ausgerichteten Fasern im Stamm mit ihrer geringen Querkzugfestigkeit dem weiteren Aufreißen nur wenig Widerstand entgegensetzen.



Abbildung 2.11: Vom Zwiesel ausgehende Spaltung eines Buchenstammes.

2.1.5 Wachstumsspannungen in Bäumen

Wachstumsspannungen sind im lebenden Holz generierte Eigenspannungen. Sie werden auf eine longitudinale Verkürzung und transversale Verdickung der Zellen im Laufe ihrer Genese zurückgeführt (BOYD 1985, JACOBS 1965). Das ältere Holz sperrt die Längsschrumpfung, so daß die junge Zelle in Längszugspannungen gerät. Dieser Mechanismus wurde bereits 1938 von MÜNCH als Ursache für die Zugwirkung des Zugholzes vermutet. Wie die Verkürzung bei gleichzeitiger Verbreiterung bewerkstelligt wird, ist noch nicht zweifelsfrei geklärt. Die zwei wichtigsten Theorien sind die „cellulose-tension“- und die „lignin-swelling“-Hypothese.

Die „cellulose-tension“-Hypothese (BAMBER 1987) geht von einer Längsausdehnung der Zellen aus, die durch den hohen Turgorinnendruck hervorgerufen wird. Dadurch werden die kristallinen Zellulose-Mikrofibrillen ausgerichtet. Mit dem Absterben der Zelle schwindet der Turgordruck und die Zellulosespiralen versuchen sich wieder zusammenzuziehen und erzeugen Zugspannungen. Diese fallen um so geringer aus, je mehr die Zellwand durch Lignineinlagerungen zwischenzeitlich versteift wurde. Die „cellulose-tension“-Hypothese zeigt gute Übereinstimmung mit der Beobachtung, daß im Zugholz geringere Ligninkonzentrationen vorherrschen als im Normalholz, ist aber nicht geeignet den Mechanismus des Druckholzes zu erklären.

BOYD (1985) geht bei der „lignin-swelling“-Hypothese davon aus, daß aufgrund der spiralförmigen Anordnung der Zellulosefibrillen die Einlagerung von Lignin in der Zellwand eine Längenänderung der Zelle bewirkt. Abhängig vom Neigungswinkel der Spiralen lassen

sich Verkürzungen (steile Spiralen) oder Verlängerungen (flache Spiralen) erzielen. Analog dazu beschreibt MÜNCH (1938) einen Versuch mit einem Seil, dessen Einzelfäden zu Spiralen gedreht sind, das sich bei Durchtränkung mit Wasser verkürzt und dabei verdickt. Die „lignin-swelling“-Hypothese ist geeignet, sowohl die im Normalholz üblichen longitudinalen Zugspannungen, als auch die Druckspannungen im Reaktionsholz der Nadelbäume zu erklären. Sie vermag jedoch nicht die Ursache der Zugspannungen in krautigen (d.h. nicht lignifizierten) Pflanzen zu klären.

Die erste umfassende analytische Beschreibung der Wachstumsspannungen stammt von KÜBLER (1959a, 1959b). Er geht von der Annahme aus, daß Holzstämme außen am Umfang vom Alter und Durchmesser unabhängige longitudinale Zug- und tangential Druckspannungen aufweisen. Diese Spannungen resultieren aus den Zuwächsen dünner Schichten mit den immer gleichen longitudinalen Zug- und tangentialen Druckvorspannungen. Die longitudinalen und tangentialen Spannungsverteilungen innerhalb des Stammes ergeben sich damit aus der Überlagerung vieler Zylindermäntel, die jeweils zum Zeitpunkt, an dem sie die äußerste Hülle bildeten, alle den gleichen Spannungszustand hatten. Die radiale Spannungsverteilung wird ebenfalls mit der Modellvorstellung der konstant vorgespannten Zuwachsschichten errechnet, mit dem Unterschied, daß sie von der tangentialen Spannung am Umfang abhängt. Als Analogon kann hier ein Faß dienen, dessen Faßreif beim Aufziehen tangential gedehnt wird und die eingeschlossenen Bretter radial komprimiert.

Unter der vereinfachenden Annahme transversaler Isotropie ergeben sich die Spannungsverläufe im Stamm in Abhängigkeit des Radius und der Spannungen an der Oberfläche zu:

$$\sigma_L = \sigma_{L0} \left(1 + 2 \ln \frac{r}{R}\right)$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \left(1 + \ln \frac{r}{R}\right)$$

$$\sigma_R = \sigma_{T0} \ln \frac{r}{R}$$

mit σ_L = longitudinale Wachstumsspannung (in Faserrichtung)

σ_T = tangentiale Wachstumsspannung

σ_R = radiale Wachstumsspannung

σ_{L0}, σ_{T0} = Spannungswerte an der Stammoberfläche

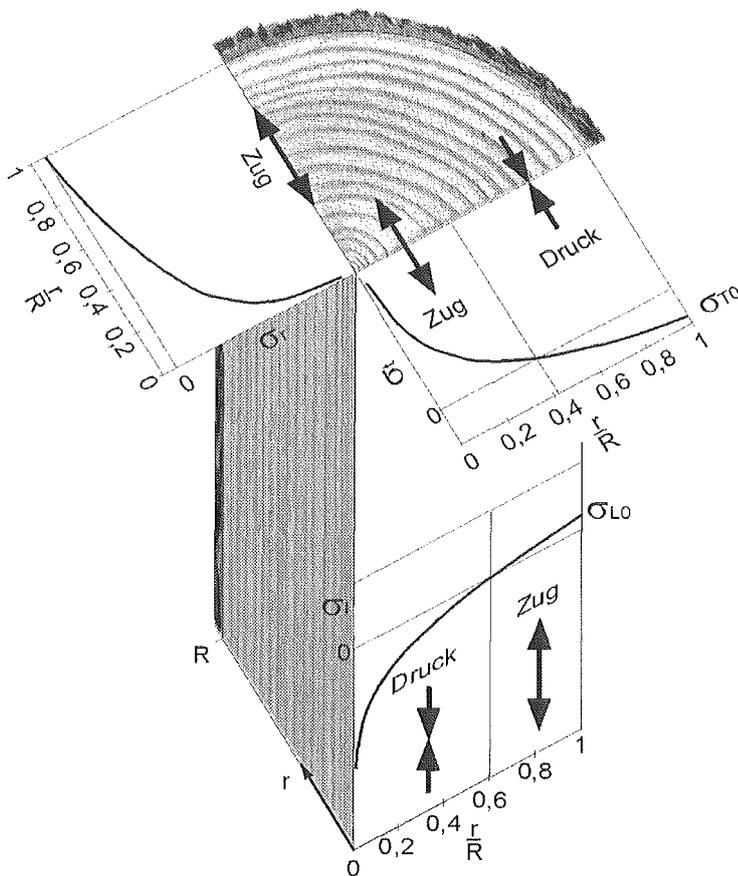


Abbildung 2.12: Theoretische Verteilung der Wachstumsspannungen in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung innerhalb eines Stammes.

läufen (ARCHER 1987). In Abbildung 2.12 sind nach KÜBLER die Wachstumsspannungen in geraden Stämmen über dem Stammradius aufgetragen.

Der Nutzen der longitudinalen Zugvorspannung am Umfang des Stammes liegt für den Baum in der weitgehenden Ausnutzung der verschiedenen Materialfestigkeiten. Windbelastungen in der Krone induzieren Biegespannungen im Stamm. Dabei treten in der Druckseite des Stammes betragsmäßig identisch hohe Spannungen auf wie in der Zugseite. Da Holz in Längsrichtung nur eine ca. halb so hohe Druck- wie Zugfestigkeit aufweist, würde ein eigenspannungsfreier Stamm auf der Druckseite durch lokales Faserknicken versagen, ohne die hohe Zugfestigkeit der gegenüberliegenden Seite optimal genutzt zu haben. In günstigen Fällen kann die Zugvorspannung zu einem nahezu gleichzeitigen Versagen auf Zug- und Druckseite führen und bis dahin die versagensfrei ertragbare Last um beinahe 50% erhöhen (DIETRICH 1995).

Nach KÜBLER (1959a) wirken die tangentialen Druckspannungen am Umfang des Stammes Frost-, Trocken- und Hitzerissen entgegen, die den Baum durch Austrocknung, der häufigsten Todesursache der Landpflanzen, gefährden. Darüber hinaus konnte DIETRICH (1995) zeigen, daß die tangentiale Vorspannung auch eine durch mechanische Belastung induzierte

Trotz Vernachlässigung der unterschiedlichen Materialeigenschaften in tangentialer und radialer Richtung sowie jahreszeitlicher Schwankungen in der Erzeugung von Wachstumsspannungen, zeigen die theoretischen Spannungsverläufe gute Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten. In der Nähe der Stammmitte verlieren diese Formeln ihre Gültigkeit. Die dort errechneten Spannungen überschreiten die Festigkeiten des Holzes. Bei Radien gegen Null treten Singularitäten in den Gleichungen auf.

Weiterführende Arbeiten (GILLIS und HSU 1979) berücksichtigten die Plastizität in der Stammmitte und die Anisotropie des Holzes. Bis auf den Bereich in unmittelbarer Nähe der Stammmitte unterscheiden sie sich aber nicht wesentlich von den KÜBLER'schen Spannungsverläufen

Rißgefahr mindert. In der Unterseite gekrümmter, schrägstehender Bäume erzeugen Längsdruckspannungen in tangentialer Richtung Querzug. Dies ist besonders gefährlich, da die Fasern um die Holzstrahlen, welche außerdem an diesen Stellen breiter als gewöhnlich sind (WEBER 1998), umgelenkt werden. Dadurch sind die Fasern vorgekrümmt und können unter Längsdruck leichter ausknicken, was durch Querzug noch begünstigt wird. Dem entgegen wirken die tangentialen Eigenspannungen, die im Bereich der größten Krümmung, also am Ort der höchsten Querzugspannungen, ihre maximalen Werte erreichen.

Als nachteilig erweisen sich die Wachstumsspannungen im Zentrum des Stammes (KUBLER 1987). Dort können besonders bei dicken Stämmen die Längsdruckspannungen die Festigkeit des Holzes übersteigen und zu einer „brittle heart“ genannter Schädigung des Kerns führen. Die radialen und tangentialen Zugspannungen im Kern können radiale Risse und Ringrisse verursachen. Deren Ausdehnung ist aber, sofern sie nicht durch weitere mechanische Beanspruchungen oder Trocknungsvorgänge vorangetrieben werden, auf die inneren Bereiche beschränkt. Der Baum schont also den Splint auf Kosten des für ihn weniger wichtigen Kerns.

Die Erforschung der Wachstumsspannungen konzentriert sich bis heute hauptsächlich auf den holzwirtschaftlich wichtigen Stamm, an Stellen ohne Störungen im Faserverlauf. Mit den Ästen und Wurzeln haben sich bisher wesentlich weniger Arbeiten befaßt. Häufig wird aus dem Vorkommen von Reaktionsholz auf die Spannungen in Faserrichtung geschlossen. Dementsprechend herrscht, im Gegensatz zum Stamm, nicht durchweg Konsens über die Verteilung der Wachstumsspannungen in Ästen. Es wird dort sogar ein generelles Fehlen der Randvorspannung in Erwägung gezogen (FOBO 1986). Über Wachstumsspannungen in Astanbindungen, Überwallungen etc. ist nahezu nichts bekannt.

Ein frühes Ziel der Erforschung der Wachstumsspannungen war es, diese positiv in der Holzverarbeitung einzusetzen. KÜBLER (1959c), PERKITNY und HELINSKA-RACZKOWSKA (1966) bezweckten, durch Temperatur und Feuchteinstellungen bei der Trocknung, Wachstumsspannungen zu berücksichtigen oder sie gezielt zur Vermeidung von Trocknungsrisen einzusetzen. Andere Arbeiten befaßten sich mit geeigneten Fälltechniken zur Vermeidung von durch Wachstumsspannungen hervorgerufenen Hirnrissen, bzw. deren Minderung durch Kompressionsringe und anderes Gerät (MATTHECK et al. 1989). Neuere Arbeiten untersuchen Möglichkeiten, Wachstumsspannungen bereits im heranwachsenden Baum durch z. B. waldbauliche Maßnahmen zu vermeiden (BEIMGRABEN 1999).

2.2 Methoden

2.2.1 Das Fractometer III

Das Fractometer III ist eine feldtaugliche, rein mechanische Prüfmaschine zur Bestimmung unterschiedlicher Holzfestigkeiten (GÖTZ und MATHECK 1998). Es ist derzeit das neueste Gerät innerhalb der Fractometer-Familie und wurde, ebenso wie seine Vorgänger Fractometer I und II, von der Firma IML (Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Wiesloch) in Zusammenarbeit mit der Forschungszentrum Karlsruhe GmbH entwickelt.

Das Fractometer III besteht aus einer Konsole, auf der weitere Komponenten angebracht sind (vgl. Abbildung 2.13):

- 1 Handrad zur manuellen Lastaufbringung
- 2 Kraftmeßuhr mit Schleppezeiger
- 3 Hebelmechanismus zur Anpassung des Meßbereiches
- 4 Linear verschiebbarer Meßblock mit verschiedenen Stationen
- 5 Wegmeßuhr

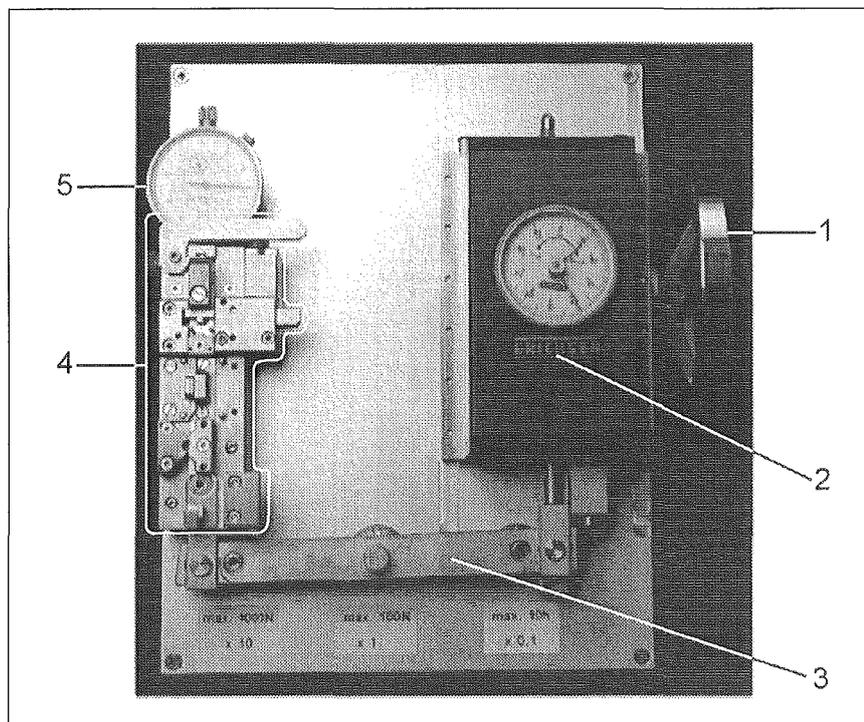


Abbildung 2.13: Das Fractometer III.

Die verschiedenen Festigkeiten werden allesamt an zylindrischen Proben mit einem Durchmesser von 5 mm und einer von der zu bestimmenden Festigkeit abhängigen Länge bestimmt. Die Probenentnahme erfolgt an stehenden Bäumen mit Hohlbohrern, wie sie in der Dendrochronologie Verwendung finden und dort als Zuwachsbohrer bezeichnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Zuwachsbohrer der Firma Suunto verwendet. Diese setzen sich aus dem Bohrerkopf mit Schneide, mehrgängigem Gewinde und Spreiznocken, dem Hohlenschaft und dem Endstück zusammen. Die große Steigung des Gewindes bewirkt einen hohen Vorschub des Bohrers beim Eindrehen in das Holz, so daß die Proben sowohl geschnitten als auch gestantzt werden. Bei der Verwendung des Zuwachsbohrers zur Probengewinnung ist besonders auf eine scharfe und gleichmäßig geschliffene Schneide zu achten, da andernfalls Vorschäden am Bohrkern entstehen, die das Meßergebnis verfälschen können. Die Spreiznocken verdrängen das Holz im Bohrkanal, um die Reibung am nachfolgenden Schaft zu reduzieren. Bei dünnen Organen, wie Ästen oder Wurzeln, können sie jedoch ein Aufreißen des Holzes begünstigen. Das Endstück des Bohrers ist als Vierkant ausgebildet und dient als Anschluß für das Griffstück, an dem das Drehmoment aufgebracht wird.

Die Zuwachsbohrer werden von Hand senkrecht zur Oberfläche des Baumes in Richtung des Marks eingedreht. Richtig positionierte Zuwachsbohrungen ergeben Proben mit senkrecht zur Bohrkernachse verlaufenden Jahrringen und parallel verlaufenden Holzstrahlen. Der Bohrkern ist stets auf Unregelmäßigkeiten wie Einschlüsse, Faulstellen, lose Jahrringe, Drehwuchs etc. zu untersuchen. Sofern vorhanden, sind diese ebenso wie die Position des Markstranges in die Meßprotokolle aufzunehmen und in den Festigkeitsdarstellungen zu berücksichtigen. Um eine Änderung des Feuchtegehaltes mit den in Kapitel 2.2 beschriebenen Auswirkungen auf die Festigkeit zu vermeiden, erfolgen die Messungen direkt vor Ort oder nach kurzer Probenlagerung in Klimaröhrchen. Zur Bestimmung der verschiedenen Festigkeiten sind unterschiedliche Stationen des Meßblocks vorgesehen, in die ein auf die entsprechende Länge zugeschnittenes Teil des Bohrkernes eingelegt wird. Durch Drehen des Handrades wird über den Hebelmechanismus die Probe bis zum Bruch belastet und die dabei maximal auftretende Kraft am Schleppzeiger der Kraftmeßuhr abgelesen. Diese Bruchkraft kann mittels der bekannten Geometrien von Proben und Einspannungsvorrichtungen in die entsprechende Festigkeit umgerechnet werden. Abbildung 2.14 zeigt den Meßblock mit den verschiedenen Stationen, an dem folgende Festigkeiten bestimmt werden können:

- a Tangentiale Biegefestigkeit (σ'_b)
- b Druckfestigkeit in Faserrichtung (σ'_d)
- c Tangentiale Schubfestigkeit in Faserrichtung ($\tau'^{r,l}$) und senkrecht dazu ($\tau'^{r,t}$)
- d Radiale Schubfestigkeit in Faserrichtung (τ''^l)
- e Radiale Biegefestigkeit (σ^r_b)

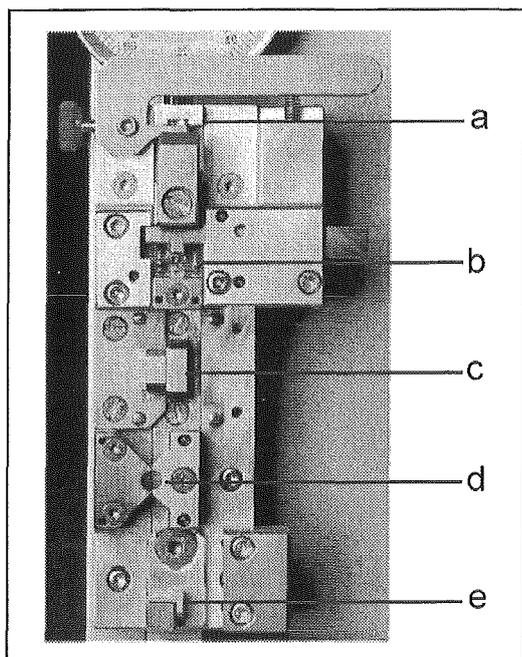


Abbildung 2.14: Die Meßstationen des Fractometer III.

Die unteren Indizes zeigen die Art der Belastung an: B = Biegung, D = Druck und S = Schub. Die oberen Indizes sind auf die Sproßachse bezogen und bedeuten: r = radial, t = tangential und l = longitudinal. Im Falle der Schubfestigkeiten bezeichnet der erste obere Index die Flächennormale der Schubebene und der zweite obere Index die Belastungsrichtung.

Die Meßstationen, an denen die untersuchten longitudinalen Druck- und tangentialen Biegefestigkeiten ermittelt werden, sind in Abbildung 2.15 skizziert.

Aus den Proben- und Einspannungsgeometrien ergeben sich Umrechnungsfaktoren von der Bruchkraft auf die Festigkeit. Hierbei muß das jeweilige Hebelverhältnis des verstellbaren Hebelarmes (vgl. Abbildung 2.13) berücksichtigt werden. Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt im oberen Meßbereich des Fractometers, d.h. die

abgelesene Kraft wird mit 10 multipliziert. Für die Ermittlung der Biegefestigkeit ist der mittlere Bereich ausreichend und die Bruchkraft wird im Verhältnis 1:1 an der Kraftmeßdose angezeigt. Weiterhin muß zur Biegefestigkeitsbestimmung die Scheibenhöhe mit einem Meßschieber ermittelt werden. Diese kann trotz einer speziell angefertigten Schneidvorrichtung in Abhängigkeit von der Härte des Holzes bis zu 0,2 mm vom Sollwert (1,9 mm) abweichen. Die geometriebedingten Umrechnungsfaktoren zur Bestimmung der longitudinalen Druck- und der tangentialen Biegefestigkeit ergeben sich zu (geometrische Größen siehe Abbildung 2.15):

$$\sigma_D^l = \frac{F}{ba} = \frac{F}{15,6\text{mm}^2}$$

$$\sigma_B^t = \frac{M}{W} = \frac{Fl}{\frac{dh^2}{6}} = \frac{2,28F}{h^2}$$

Bei der Messung der *tangentialen Biegefestigkeit* ergibt sich aus den Proben- und Einspannungsgeometrien ein Verhältnis von Hebellänge zu Durchmesser von ca. 1. Der Quotient weicht damit von üblichen Biegeproben mit einem hohem Länge-Durchmesser-Verhältnis ab, so daß sich die Frage nach dem Einfluß der Schubspannungen auf das Versagen stellt. Dies wurde von ZIPSE (1997) erörtert, mit dem Ergebnis, daß die Biegespannungen versagensrelevant sind. Sie sind um ein vielfaches höher als die Schubspannungen. Beobachtungen des Versagensvorganges bei Messungen am Normalholz

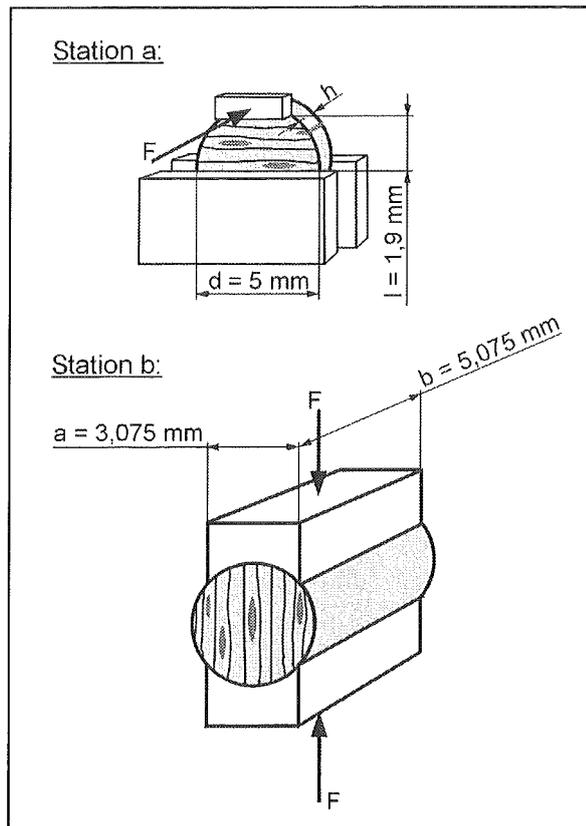


Abbildung 2.15: Die Einspannvorrichtungen zur Bestimmung der tangentialen Biegefestigkeit (a) und der axialen Druckfestigkeit (b).

bestätigen dies. Das Versagen wird durchweg an der Einspannung durch Biegebruch eingeleitet.

Besondere Aufmerksamkeit ist bei der Messung von Holzproben mit unregelmäßigem Faserverlauf und außergewöhnlich hoher Biegefestigkeit geboten. In Einzelfällen kann dort das Versagen durch Abscherung im Bereich des Kräfteinleitungsnockens, dem Ort des geringsten Probenquerschnittes und damit der höchsten Schubspannungen, erfolgen.

Tritt dieser Fall ein, ist das Meßergebnis zu verwerfen. In der Regel jedoch setzt das Versagen auf der Zugseite im Bereich der Einspannung ein. Nach vorsichtiger Versuchsdurchführung befinden sich häufig auf der Druckseite noch einige zusammenhängende Fasern, um welche die Probe wie an einem Scharnier an der Bruchfläche zu- und aufgeklappt werden kann. Die tangentielle Biegefestigkeit wird somit maßgeblich durch die Zugfestigkeit quer zu den Fasern und Holzstrahlen bestimmt.

Beim Einlegen der Probe ist auf eine zur Einspannvorrichtung parallele Ausrichtung der Fasern zu achten, da die Festigkeit des Holzes vom Faser-Last-Winkel stark abhängig ist. Winkelabweichungen von der Parallelität bis 5° , ein Wert der mit etwas Sorgfalt noch zu unterbieten ist, gewährleisten bei der Bestimmung der Querfestigkeit minimale Fehler (vgl. Abbildung 2.6). Aufgrund der geringen Abmessungen erstreckt sich eine Probe nur in extrem zuwachsarmem Holz über mehrere Jahrringe. In der Regel wird nur ein Jahrring, unter Umständen nur ein Bruchteil davon erfaßt. Abhängig davon, ob die Probe überwiegend aus dem Früh- oder Spätholz eines Jahrrings stammt, fällt die gemessene Festigkeit geringer oder höher aus. Dieser Effekt wird an ringporigem Holz sehr deutlich sichtbar. Ist eine weniger hohe lokale Auflösung ausreichend, so erhält man aus der Mittelung der Meßwerte mehrerer Proben die Festigkeit eines sich über mehrere Jahrringe erstreckenden Bereiches.

Beim Druckversuch nimmt die Kraft stetig zu, fällt mit dem Einsetzen des Versagens ab und nimmt nach großer Deformation durch zunehmende Kompression des in der Einspannung verbleibenden Materials wieder zu. Die zur Bestimmung der Druckfestigkeit maßgebliche Kraft ist durch das erste lokale Maximum der Kraft-Weg-Beziehung charakterisiert, so daß die Messung nach dem ersten an der Kraftmeßuhr ablesbaren Kraftabfall beendet wird. Der Einfluß der gekrümmten Druckbacken wurde von ZIPSE (1997) mittels FEM-Analysen und

vergleichender Messungen an würfelförmigen Proben untersucht. Es zeigte sich, daß das Versagen im Probeninneren in hinreichender Entfernung von der Einspannung eintritt und diese die Größe der gemessenen Festigkeit nicht wesentlich beeinflusst. Auch Vergleiche mit Literaturwerten (GÖTZ 1998) zeigten im Rahmen der für Holz typischen großen Streuung gute Übereinstimmung. Da sich die Probengröße in der Regel über mehr als nur einen Jahrring erstreckt, ist eine Auflösung in Früh- und Spätholzfestigkeiten meistens impraktikabel. Beim Einlegen der Probe ist auf eine zur Belastungsrichtung parallele Ausrichtung der Fasern zu achten. Winkelabweichungen unter 5° bedingen auch hier vernachlässigbare Fehler (vgl. Abbildung 2.6).

Die in dieser Arbeit durchgeführten Festigkeitsmessungen waren aufgrund seiner hohen Auflösung ausschließlich mit dem Fractometer III realisierbar. Die Normvorschrift DIN 52185: „Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser“ (FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG 1976) verlangt quaderförmige Proben mit einer Grundkantenlänge von mindestens 20 mm und einer Höhe zwischen eineinhalb und drei Grundkantenlängen. Konventionelle Probengrößen erlauben nur die Ermittlung von Festigkeitsverläufen an Baumorganen mit großen Abmessungen, weshalb dies bisher lediglich an Stämmen erfolgte (KAYA und SMITH 1993). Darüber hinaus ist die Probenfertigung sehr zeitaufwendig und erfordert eine intensive maschinelle Bearbeitung. Dies wiederum ist mit einem Energieeintrag verbunden, was eine Austrocknung der Proben mit den in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Folgen begünstigt.

In Deutschland ist weder die Prüfung der Querbiege- noch der Querkzugfestigkeit von Holz genormt. Legt man zur Prüfung der Querkfestigkeit die Standardprüfung nach ASTM (1987) zugrunde, ergibt sich aufgrund der Probengröße und Fertigung die gleiche Problematik bezüglich der lokalen Auflösung und Trocknungseffekten wie bei der oben ausgeführten Druckprüfung.

2.2.2 Die Ermittlung des Elastizitätsmodules

Die Bestimmung des Elastizitätsmodules in Faserrichtung am Holz saftfrischer Äste ist im Vergleich zum Stammholz mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Äste sind in ihrer Gestalt meist unregelmäßiger geformt als Stämme, weisen geringere Durchmesser auf und beinhalten häufig Störungen im Faserverlauf durch zum Teil abgestorbene Seitenäste. Zur Astanbindung hin weicht der Faserverlauf von der achsparallelen Anordnung ab. Damit gelangt die konventionelle Ermittlung nach den Normvorschriften (Biegeversuch nach FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG 1978), neben der aufwendigen Probenfertigung, besonders wegen der geforderten großen Probenabmessungen an ihre Grenzen. Nur in Ausnahmefällen und aus dicken Starkästen ist es möglich, Proben mit störungsfreiem, achsparallelem Faserverlauf über eine Länge von 360 mm, wie es für die Biegeprüfung gefordert wird, anzufertigen.

Das mit einer mechanischen Wegmeßuhr ausgestattete Fractometer III ist geeignet, den absoluten Bruchweg zu ermitteln. Die Bestimmung einer kontinuierlichen Kraft-Weg-Kurve

oder zumindest mehrerer Punkte davon ist mit Unsicherheiten behaftet und gestaltet sich schwierig. Dazu wurden an einem Prototypen eines mit elektronischem Weg- und Kraftaufnehmer ausgestatteten Fractometers Druckversuche durchgeführt. Die Resultate aus der Wegmessung waren durch Randeffekte beeinflusst, so daß sie bei der Ermittlung der Elastizitätsmoduln nicht berücksichtigt werden konnten. Die gleiche Problematik bezüglich der Randeffekte ergab sich bei den im folgenden beschriebenen Druckversuchen an einer Großprüfmaschine. An dieser konnten die Randeffekte durch Verlagerung des Wegmeßbereiches in die Probenmitte ausgeschlossen werden. Dem entsprechende Abänderungen an der Wegmeßeinrichtung des elektronischen Fractometers sind mit erheblich mehr Aufwand verbunden und hätten zumindest partielle Neukonstruktionen erfordert, so daß sie aus Zeitgründen nicht vorgenommen wurden.

Die Bestimmung der Elastizitätsmoduln von Ästen erfolgte schließlich *in vivo*, das heißt direkt am Baum, in frischem Zustand und unter „Betriebsbelastung“, also durch Kräfte in Gravitationsrichtung. Ausgewählt wurden die Äste nach den folgenden Kriterien: Die untersuchten Äste durften im stammnahen Bereich, dem späteren Meßbereich, keine Krümmungen, Verzweigungen, Schäden oder irgendwelche anderen Unregelmäßigkeiten aufweisen und der Querschnitt sollte in diesem Bereich nahezu unverändert bleiben. Weiterhin mußten die Äste waagrecht verlaufen bzw. durften nur geringfügig aufwärts geneigt sein. Organe dieser Art findet man überwiegend am Waldrand, auf Lichtungen oder an Wegrändern, wo Bäume besonders ihre unteren, weit ausladenden Äste zum Licht hin ausstrecken.

War ein diesen Kriterien entsprechender Ast gefunden, so wurde bei Hölzern mit dicker Rinde (z. B. Weide) diese im Meßbereich geschält. In einer ersten Versuchsreihe wurden auf der Astober- und -unterseite jeweils Meßstifte im Abstand von 150 mm eingesetzt. Daraufhin wurde in hinreichender Entfernung (15- bis 20-facher Astdurchmesser) ein Seil am Ast befestigt und das darüber hinausragende Astende abgetrennt. Am Seil wurden nacheinander acht Gewichte einer Masse von

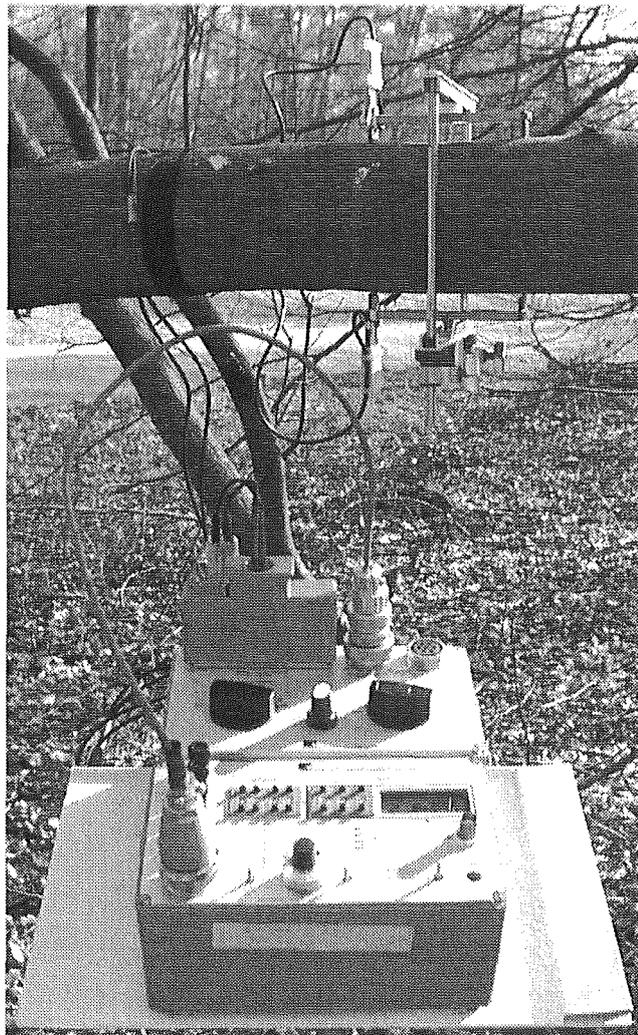
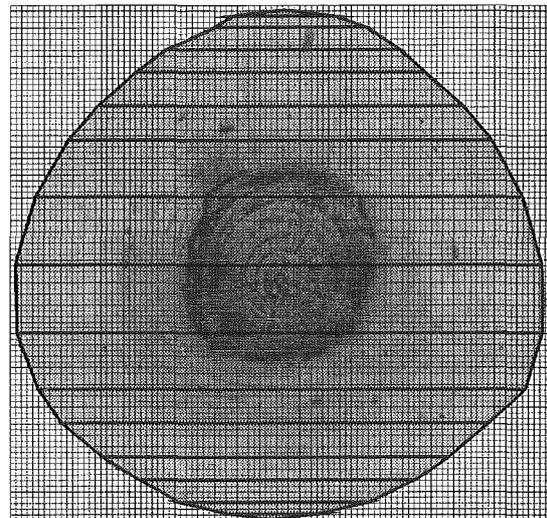


Abbildung 2.16: Dehnmeßaufnehmer mit Klemmvorrichtung, Verstärker und Umschalter.

jeweils vier Kilogramm angebracht und nach Aufbringung des letzten Gewichtes wieder einzeln entfernt. Nach jeder Be- und Entlastungsstufe wurde der Abstand der Meßstifte bestimmt. Die ersten Messungen erfolgten mit einem digitalen Meßschieber, dessen Ablesegenauigkeit 1/100 Millimeter beträgt. Dieser wurde im Laufe der Versuche durch zwei Dehnmeßaufnehmer der Fa. HBM (1991) ersetzt, die mittels einer Klemmvorrichtung auf dem Ast befestigt wurden. Die Meßaufnehmer weisen eine höhere Genauigkeit auf und schließen durch Verkanten des Meßschiebers bzw. durch unterschiedliche Andruckkräfte bedingte Meßfehler aus. Ein Meßaufnehmer enthält eine bewegliche Tastzunge, deren Spitze Verschiebungen von $s=\pm 2,5$ mm aufnehmen kann. An der Tastzunge wird eine Schneide befestigt. Eine zweite Schneide befindet sich am Ende eines ebenfalls am Dehnmeßaufnehmer angebrachten Distanzstückes. Somit steht an Astober- und -unterseite ein Bereich von 100 mm zur Messung der Dehnungen bzw. der Stauchungen zur Verfügung. Die aus der Abstandsänderung zwischen den zwei Schneiden resultierende Verschiebung der Tastzunge wird mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen (DMS) in ein zur Speisespannung proportionales elektrisches Signal umgeformt. Jeweils vier DMS sind in einer Vollbrückenschaltung auf der Tastzunge innerhalb des Gerätes angeordnet. Die zwei zuvor kalibrierten Dehnmeßaufnehmer werden über den Umschalter am Verstärker angeschlossen. Der Verstärker liefert die Speisespannung für die Meßaufnehmer und formt deren Signal (Widerstandsänderung) in einen meßwertproportionalen Anzeigewert um. Abbildung 2.16 zeigt die mittels der Klemmvorrichtung auf einem Ast befestigten Meßaufnehmer und den Verstärker mit dem Umschalter.

Zur weiteren Auswertung wird aus dem Ast der Meßbereich herausgesägt und die Kontur des Querschnitts ermittelt. Der Berechnung der Elastizitätsmoduln liegt die Annahme zugrunde, daß der Querschnitt bei der Verformung eben bleibt. Weiterhin wird vereinfachend ein konstanter Elastizitätsmodul in der Oberseite und ein weiterer, ebenfalls konstanter Elastizitätsmodul in der Unterseite des Astes angenommen, wobei sich der Wechsel an der neutralen Faser der Biegung vollzieht. Die Berechnung der Elastizitätsmoduln erfolgt in mehreren Schritten. Die verwendeten Variablen sind in Abbildung 2.18 skizziert.



*Abbildung 2.17: Zerlegung eines
Astquerschnittes in einfache
Geometrien.*

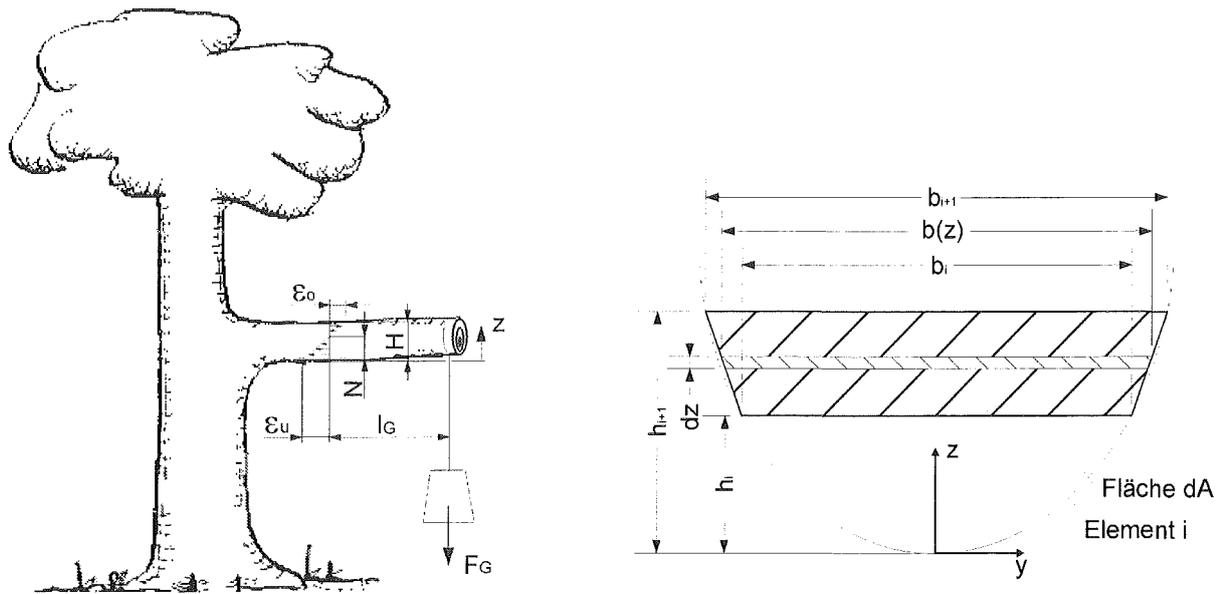


Abbildung 2.18: Variablen zur Bestimmung des Elastizitätsmodules.

Zuerst werden mit den gemessenen Dehnungen der Randfasern auf Astober- und -unterseite und der Querschnittshöhe des Astes die Geradengleichung der über dem Querschnitt linear angenommenen Dehnung und die neutrale Faser der Biegung bestimmt:

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_u + n \cdot z$$

$$n = \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_u}{H}$$

$$N = -\frac{H \cdot \varepsilon_u}{(\varepsilon_o - \varepsilon_u)}$$

N = z -Koordinate der neutralen Faser im Ast

H = Höhe des Astquerschnitts

ε_o = Dehnung der Randfaser auf der Astoberseite

ε_u = Dehnung der Randfaser auf der Astunterseite

n = Steigung der linearen Dehnung

Weiterhin wird, da die Umfangskurve nur unzulänglich durch Ellipsen oder andere einfache Funktionen dargestellt werden kann, der Querschnitt in mehrere einfache Geometrien (Trapeze) zerlegt. Die Höhe der jeweiligen Trapeze ist in der Querschnittsmitte am größten und nimmt zum oberen und unteren Rand hin ab (vgl. Abbildung 2.17).

Zuletzt werden aus den an bekannten Hebellängen aufgebrauchten Kräften, den gemessenen Dehnungen und den zusammengesetzten Querschnittsgeometrien mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen für Kräfte und Momente die Elastizitätsmoduln bestimmt.

In Faserrichtung wirken einzig die aus der Biegespannung σ resultierenden Kräfte F :

$$dF(z) = \sigma(z) \cdot dA(z)$$

$$dA(z) = b(z) \cdot dz$$

$$\sigma(z) = E(z) \cdot \varepsilon(z)$$

Die Breite $b(z)$ ist eine in den verschiedenen Segmenten unterschiedliche lineare Funktion. Sie ergibt sich im i -ten Trapez an der Stelle z zu:

$$b_i(z) = b_i + m_i(z - h_i)$$

$$m_i = \frac{b_{i+1} - b_i}{h_{i+1} - h_i}$$

h_i = Abstand der Unterseite des Astquerschnitts ($z=0$) zur Unterseite des i -ten Trapezes

h_{i+1} = Abstand der Unterseite des Querschnitts zur Oberseite des i -ten Trapezes

b_i = Breite des Trapezes an der Stelle h_i

b_{i+1} = Breite des Trapezes an der Stelle h_{i+1}

m_i = Steigung des Trapezrandes des i -ten Trapezes

Die durch Biegebelastung hervorgerufene Längskraft wird für jedes Trapez des zerlegten Querschnitts berechnet. Die Elastizitätsmoduln E der Astunter- und -oberseite unterscheiden sich, sind jedoch innerhalb ihrer Astseite und der einzelnen Trapeze konstant und können aus dem Integral herausgezogen werden:

$$F_i = E_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} (\varepsilon_u + nz)(b_i + m_i(z - h_i)) dz$$

$$F_i = E_i [\varepsilon_u (b_i - m_i h_i)(h_{i+1} - h_i) + \frac{1}{2} (\varepsilon_u m_i + n(b_i - m_i h_i))(h_{i+1}^2 - h_i^2) + \frac{1}{3} n m_i (h_{i+1}^3 - h_i^3)]$$

Aus der Forderung nach einem Kräftegleichgewicht in Faserrichtung folgt: Die Kräfte in allen Segmenten müssen sich gegenseitig zu Null addieren. Werden dabei die unterschiedlichen Elastizitätsmoduln der Astoberseite E_o und der Astunterseite E_u berücksichtigt, stellt sich das Kräftegleichgewicht in Abhängigkeit von deren Quotienten Q ein:

$$\sum F_i = 0$$

$$\frac{E_o}{E_u} = - \frac{\sum_{i=1}^N [\varepsilon_u (b_i - m_i h_i)(h_{i+1} - h_i) + \frac{1}{2} (\varepsilon_u m_i + n(b_i - m_i h_i))(h_{i+1}^2 - h_i^2) + \frac{1}{3} n m_i (h_{i+1}^3 - h_i^3)]}{\sum_{i=N}^H [\varepsilon_u (b_i - m_i h_i)(h_{i+1} - h_i) + \frac{1}{2} (\varepsilon_u m_i + n(b_i - m_i h_i))(h_{i+1}^2 - h_i^2) + \frac{1}{3} n m_i (h_{i+1}^3 - h_i^3)]} = Q$$

Die Kräfte F_i in den einzelnen Segmenten bewirken, multipliziert mit ihrem Abstand zur neutralen Faser, folgende Momente M_i :

$$M_i = F_i (z - N)$$

$$M_i = E_i \int_{h_i}^{h_{i+1}} (z - N)(\varepsilon_u + nz)(b_i + m_i(z - h_i)) dz$$

$$M_i = E_i \left[N \varepsilon_u (m_i h_i - b_i)(h_{i+1} - h_i) - \frac{1}{2} \varepsilon_u n m_i (h_{i+1}^2 - h_i^2) + \frac{1}{3} n (b_i - m_i h_i)(h_{i+1}^3 - h_i^3) + \frac{1}{4} n m_i (h_{i+1}^4 - h_i^4) \right]$$

Für eine übersichtlichere Darstellung wird folgender Teil aus obiger Gleichung durch X_i ersetzt:

$$X_i = N \varepsilon_u (m_i h_i - b_i)(h_{i+1} - h_i) - \frac{1}{2} \varepsilon_u n m_i (h_{i+1}^2 - h_i^2) + \frac{1}{3} n (b_i - m_i h_i)(h_{i+1}^3 - h_i^3) + \frac{1}{4} n m_i (h_{i+1}^4 - h_i^4)$$

Die Momente im Astquerschnitt müssen sich mit dem durch die Gewichtsbelastung aufgebrachten Moment im Gleichgewicht befinden:

$$\sum M_i + F_G l_G = 0$$

$$E_u \sum_{i=1}^N X_i + E_o \sum_{i=N}^H X_i = -F_G l_G$$

Wird der aus dem Kräftegleichgewicht errechnete Quotient $Q=E_o/E_u$ in die Gleichung eingesetzt, so können die unterschiedlichen Elastizitätsmoduln der Astoberseite E_o und der Astunterseite E_u bestimmt werden:

$$\frac{E_o}{Q} \sum_{i=1}^N X_i + E_o \sum_{i=N}^H X_i = -F_G l_G$$

$$E_o = \frac{-F_G l_G}{\frac{1}{Q} \sum_{i=1}^N X_i + \sum_{i=N}^H X_i}$$

Zum Vergleich wurde an einigen Proben, die aus den untersuchten Ästen gefertigt wurden, der Elastizitätsmodul im Druckversuch an einer Zug-Druck-Prüfmaschine der Firma Instron bestimmt. Im oberen festen Querträger dieser Prüfmaschine befindet sich eine austauschbare Kraftmeßdose. Für saftfrische Holzproben bis ca. 200 mm² Querschnittsfläche ist eine 10KN-Dose ausreichend. Der untere bewegliche Querarm wird mit einstellbarem Vorschub nach oben bewegt. Als Belastungsgeschwindigkeit wurde 2 mm/min gewählt. An den Querträgern wurden planparallele, konzentrisch angeordnete Druckstempel aus gehärtetem Stahl befestigt. Zwischen dem oberen Druckstempel und der Probe wurde eine Halbkugel mit einer Kalotte gelegt, um eventuell vorhandene Ungenauigkeiten der Planparallelität der Proben bzw. Druckstempel auszugleichen. Die Versuche wurden mit zylindrischen Proben der Länge 45 mm und einem Durchmesser von 15 mm durchgeführt. Damit die Fasern möglichst parallel zur Längsachse der Proben lagen, wurde zuerst ein herausgesägtes Aststück gespalten und anschließend wurden die Spaltstücke rund und plan gedreht. Die Aststücke, wie später auch die fertigen Proben wurden zwischen den einzelnen Bearbeitungsstufen bis zur Versuchsdurchführung in feuchte Tücher gehüllt, um Feuchteänderungen zu minimieren.

Zur Wegmessung war die Prüfmaschine ursprünglich mit einem induktiven Wegaufnehmer ausgestattet, der den Weg des unteren Querträgers erfaßte. Dies erwies sich als unzweckmäßig, da die Messungen durch Randeffekte an den Probenenden und durch Biegung der Proben beeinflußt wurden. Diese Einflüsse wurden durch zwei gegenüberliegende, im mittleren Bereich der Proben angebrachte Dehnmeßaufnehmer beseitigt (vgl. Abbildung 2.19). Somit befanden sich die Probenenden und die dadurch verbundenen Randeffekte außerhalb des Meßbereiches. Der Biegeanteil kann durch Mittelwertbildung der Kraft-Weg-Kurven beider Dehnmeßaufnehmer kompensiert werden. Der Elastizitätsmodul wird im linearen Bereich der Kraft-Weg-Kurve aus deren Steigung und der Probenquerschnittsfläche errechnet.

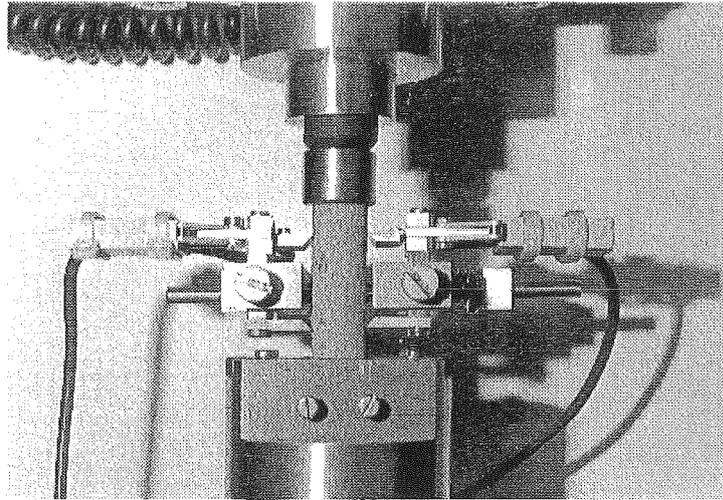


Abbildung 2.19: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Druck-Elastizitätsmoduls an einer zylindrischen Holzprobe (KRÄMER 1998).

2.2.3 Die Ermittlung von Wachstumsspannungen

2.2.3.1 Verschiedene Methoden zur Bestimmung von Eigenspannungen

Wachstumsspannungen sind im lebenden Holz generierte Eigenspannungen. Sieht man von ihrer Entstehung ab und berücksichtigt die besonderen Eigenschaften des Materials Holz, so können sie wie beliebige mechanische Spannungen in der unbelebten Materie behandelt und mit geeigneten Methoden bestimmt werden. Zur Bestimmung der Eigenspannungen stehen grundsätzlich zwei Gruppen von Meßverfahren zur Verfügung. Physikalische Eigenspannungsmessverfahren, die auch als zerstörungsfreie Verfahren bezeichnet werden, und mechanische Eigenspannungsmessverfahren, bei denen das untersuchte Werkstück zumindest teilweise zerstört wird. Zu den wichtigsten physikalischen Verfahren zählen Röntgenografie, Neutronenbeugung, Spannungsoptik, Ultraschallverfahren und magnetische Verfahren (PEITER 1992). Bei der Röntgenografie und der Neutronenbeugung werden anhand von Beugungseffekten die von den anliegenden Last- oder Eigenspannungen abhängigen Netzebenenabstände im Kristallgitter bestimmt. Diese Methoden sind gegenwärtig auf Werkstoffe wie Metalle oder Keramiken beschränkt. Eine Ausweitung auf kristalline Bereiche der Zellulose ist denkbar, wurde aber noch nicht durchgeführt. Sofern realisierbar, würde dies besonders Aufschluß über die Spannungen im Feinbau der Zellen geben. Spannungsoptische Untersuchungen nutzen Interferenzmuster an transparenten Werkstoffen und magnetische Verfahren erfordern ferromagnetische Stoffe. Ultraschallverfahren sind für Holz, wegen des großen Einflusses des Feuchtegehaltes, der nicht konditioniert werden darf, und der Dichte auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls, nur bedingt nutzbar.

Aus diesen Gründen blieb die Eigenspannungsmessung im Holz den mechanischen Verfahren vorbehalten. Deren gemeinsames Prinzip ist, daß durch Abtragen von Material (Freischneiden) das ursprüngliche Gleichgewicht der Eigenspannungen gestört wird und sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Dabei treten Dehnungen auf, deren Größe und Richtung Rückschlüsse auf die freigesetzten Spannungen ermöglichen.

Die Erfahrungen von Praktikern in der Holzverarbeitung, wonach bei radial geführtem Sägeschnitt das Sägeblatt klemmt oder bei zu Bretter geschnittenen Stämmen sich die Randbohlen verkürzen und durchbiegen und sich die Kernbohlen verlängern, geben qualitative Hinweise auf die Wachstumsspannungen und sind Grundlage einiger quantitativer Bestimmungsmethoden. Gerade die in der Holzverarbeitung als Ärgernis betrachteten Krümmungen und Dehnungen nutzte JACOBS (1938, 1939) für seine „plank-stripping“-Methode. Er zersägte dicke Planken in Streifen, maß deren Deflektion und Längenänderung und errechnete mit Hilfe der Materialkonstanten von Holz die Wachstumsspannungen in Faserrichtung. NICHOLSON (1971) nutzte eine verbesserte Meß- und Handhabungstechnik und benötigte anstatt der bis zu mehreren Metern langen Planken nur wenige Zentimeter lange Streifen. Dazu schälte er die Rinde vom Stamm und brachte drei in einer Reihe und parallel zur Faserrichtung angeordnete Meßstellen auf dessen Oberfläche an. Anschließend vermaß er den Abstand der zwei äußeren Meßstellen und ermittelte die Höhendifferenz zwischen den beiden äußeren und der mittleren Meßstelle. Nach dem Heraussägen und -meißeln des Holzstreifens wurde dieser in eine spezielle Haltevorrichtung eingespannt, die eine nachträgliche Krümmung des Streifens anhand der ermittelten Höhendifferenz begradigte. Eine letzte Messung des Abstandes der beiden äußeren Meßpunkte lieferte die gesuchte Längenänderung und damit die entsprechende Wachstumsspannung in Faserrichtung.

Die Verteilungen der radialen und tangentialen Wachstumsspannungen im Stammquerschnitt wurden von KÜBLER (1959a) anhand frischer Baumscheiben aufgezeigt. Auf diese setzte er in radialer und tangentialer Richtung Meßstifte im Abstand von ca. 20 bis 25 Millimetern auf und vermaß deren genaue Entfernung. Anschließend zersägte er die Scheiben soweit, daß er jeweils zwei Meßstifte auf einem Scheibenausschnitt vom umgebenden Holz freigeschnitten hatte. Mit einer erneuten Messung der Stiftabstände schloß er aus der Änderung zu dem ursprünglich auf der Vollscheibe gemessenen Wert auf die jeweiligen Wachstumsspannungen und konnte damit den von ihm theoretisch hergeleiteten Verlauf bestätigen (vgl. Kapitel 2.1.5).

Zur Bestimmung der tangentialen Wachstumsspannungen wählte DIETRICH (1995) eine andere und in der Ausführung einfache Methode, die den eingangs beschriebenen Effekt der Sägeblattklemmung bei radial geführten Sägeschnitt nutzt. Er schlug zwei Nägel im Abstand von ca. 30 mm nahe am Umfang in die Stirnfläche einer Baumscheibe, vermaß deren genaue Entfernung, sägte radial zwischen die Nägel in die Scheibe ein und ermittelte erneut den Nagelabstand. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Methoden, resultiert die gemessene Verschiebung nicht aus der Entspannung des Materials innerhalb der Meßstrecke, das ja entfernt wurde, sondern aus der Entspannung des Materials, das die Meßstrecke umgibt. Die Überführung der gemessenen Dehnungen in Spannungen, in Abhängigkeit von den Scheiben- und Schnittgeometrien, erfolgte mittels von FETT (1987, 1996) entwickelten bruchmechani-

schen Beziehungen und einem Vergleich mit Ergebnissen aus FE-Rechnungen. DIETRICH nutzte diese Methode an Querschnittsscheiben schiefstehender Bäume. Bei Messungen an Zwieselscheiben mit Rindeneinschlüssen beschrieb er die Problematik des Aufreißen im Ligament und beschränkte sich in diesen Fällen auf qualitative Angaben.

Um in Bereichen mit Rindeneinschlüssen oder anderen Unregelmäßigkeiten einen Einblick in die vorherrschenden Wachstumsspannungen zu erhalten, wurde eine an die speziellen Erfordernisse des Materials Holz angepaßte Variante der Bohrloch-Methode verwendet. Im folgenden werden die Grundlagen des Verfahrens und dessen konventionelle Anwendung im Maschinenbau erläutert und anschließend die Vorgehensweise bei saftfrischem Holz erklärt.

2.2.3.2 Die Bohrlochmethode zur Bestimmung von Wachstumsspannungen in Holz

Die Bohrloch-Methode ist das am häufigsten eingesetzte teilzerstörende Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen (KÖNIG 1991). Sie verdankt ihre Beliebtheit der verhältnismäßig geringen Schädigung des Werkstücks, der im Vergleich zu anderen Methoden relativ praktikablen, teilweise auch außerhalb von Laboratorien nutzbaren Handhabungstechnik und den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten. Die verschiedenen, an die jeweiligen Einsatzgebiete angepaßten Varianten der Bohrloch-Methode basieren auf dem von MATHAR (1933) entwickelten Verfahren. Beim Einbringen eines Sack- oder Durchgangsloches in die Bauteiloberfläche wird durch das Entfernen spannungsbehafteter Werkstoffbereiche das innere Gleichgewicht lokal gestört und es stellt sich in der Bohrlochumgebung ein neuer Gleichgewichtszustand ein. Dies resultiert aus dem Sachverhalt, daß die Spannungen senkrecht zur lastfreien Bohrlochoberfläche verschwinden müssen, was zu einer Reduzierung der Spannungen in der Bohrlochumgebung führt. Die Änderung des Gleichgewichtszustandes bedingt entsprechende Verformungen, die mit verschiedenen Meßverfahren bestimmt werden. Aus den gemessenen Verformungen kann entweder mittels eines Kalibrierversuchs oder verschiedenen Auswerteformalismen mit und ohne Kalibrierung auf die Spannungen geschlossen werden. Im Fall des einachsigen Eigenspannungszustandes können die am Werkstück gemessenen Dehnungen mit den an eigenspannungsfreien Vergleichsproben unter definierter einachsiger äußerer Last gemessenen Kalibrierdehnungen verglichen werden. Liegt jedoch ein mehrachsiger Spannungszustand vor, sind Auswerteformalismen zur Ermittlung der Eigenspannungen notwendig. Die verschiedenen Auswerteformalismen beruhen auf der von KIRSCH (1898) gefundenen Lösung für die Spannungsverteilung an einer unendlich ausgedehnten Platte mit kreisrundem Loch unter ein- bzw. zweiachsiger Belastung. Dieser idealisierte Zustand wird näherungsweise durch ein im Vergleich zum Lochdurchmesser ausreichend großes Werkstück, einem Meßbereich in hinreichendem Abstand von Rändern oder anderen Unregelmäßigkeiten und einen über dem Meßbereich nahezu konstanten Spannungsverlauf realisiert. In diesem Fall kann, bei Einsatz von speziellen DMS-Rosetten, die amerikanische Normvorschrift zur Bestimmung der Eigenspannungen (ASTM 1995) verwendet werden. Weicht die Probengeometrie von diesem idealisierten Fall ab, können die in den Formalismen enthaltenen Konstanten mittels

Kalibrierversuchen an eigenspannungsfreien Proben gleicher Geometrie angepaßt werden. Darüber hinaus existieren verschiedene Auswerteverfahren, die in der Lage sind, in Kombination mit Kalibrierversuchen, einen über der Bohrlochtiefe variierenden Spannungsverlauf zu ermitteln (MÜNKER 1995).

Eigenspannungsmessungen an technischen Bauteilen mit dem Bohrloch-Verfahren erfolgen heutzutage fast ausschließlich mit speziell dafür entwickelten DMS-Rosetten. Diese bestehen aus einer Kunststoffolie, auf die drei radial in verschiedenen Winkeln um die Bohrlochachse angeordnete Meßgitter und deren Lötstützpunkte aufgebracht sind. Die Rosette wird auf das Werkstück aufgeklebt und mit den elektrischen Zuleitungen verlötet. Anschließend wird der Bohrapparat positioniert und abhängig vom Rosettentyp zentrisch ein Loch mit einem Durchmesser von 1,5 bis 2 Millimeter gebohrt. Der Zeitaufwand für eine Messung beträgt ca. 1,5 Stunden (SCHWARZ und KOCKELMANN 1993). Trotz der vielfältigen technischen Einsatzmöglichkeiten sind die DMS-Rosetten für saftfrisches Holz nur bedingt geeignet. Beim Einsatz der DMS-Technik raten Hersteller zu Messungen an trockenem Holz. Die Veränderungen der Holzfeuchte führen zum Driften des DMS-Nullpunktes und eine hohe Restfeuchte erschwert das Kleben bzw. macht es unmöglich (BLH 1999). Problematisch ist auch die relativ lange Zeitdauer des Meßvorganges mit Meßstellenvorbereitung, da die Gefahr der Trocknung besteht und mit steigender Anzahl der Messungen zunimmt. Ein weiterer Einfluß auf die Messungen resultiert aus der relativ hohen Steifigkeit der DMS im Vergleich zum Holz. Die Elastizitätsmoduln des Klebstoffes, der Trägerfolie und des Meßgitters sind um ein mehrfaches größer als der Elastizitätsmodul des Holzes quer zur Faser. Bei Zug- und Druckversuchen an trockenem Holz fand BRÖKER (1985) Abweichungen zwischen induktiv und mittels DMS gemessenen Dehnungen von 13% bis 23%, die er auf die hohen Steifigkeiten der DMS zurückführte. Zuletzt ist noch anzumerken, daß die aus dem Wechsel von Früh- und Spätholz stammende Inhomogenität des Holzes relativ große Meßstrecken erfordert, um eine zuverlässige Mittelung zu erreichen.

Eine Alternative zu direkt applizierten DMS ist die Messung mit Dehnmeßaufnehmern. Diese können zum einen mit geeigneten Halterungen direkt auf das zu prüfende Teil aufgeklemt und beim Bohrvorgang darauf belassen werden. Zum anderen können Meßpunkte an der Probe befestigt und deren Abstände vor und nach dem Bohren ermittelt werden.

Ersteres hat den Vorteil, daß keine Meßfehler durch das Wiederansetzen entstehen, ermöglicht aber nur Messungen in einer Richtung. In beiden Fällen können die Messungen zügig durchgeführt werden, so daß Trocknungsvorgänge auf ein Minimum beschränkt bleiben. Die Steifigkeit der Aufnehmer ist vernachlässigbar klein und durch den Einsatz verschieden langer Rahmenstücke kann die Meßstrecke, und damit der Bohrlochdurchmesser, nahezu beliebig gewählt werden.

In Abbildung 2.20a ist ein aufgeklemtter Dehnmeßaufnehmer dargestellt. Die Klemmvorrichtung wurde eigens für diesem Zweck entwickelt und drückt die beiden Meßspitzen unter der Vorspannung einer Feder in das Holz. Abbildung 2.20b zeigt einen Setzdehnungsmesser und die entsprechenden Meßstifte. Die Meßstifte wurden speziell für diese Messungen hergestellt. Sie bestehen aus einem Stiftstück, das in das Holz eingedrückt wird, einer

Schulter, die zum Ansetzen der Eindrück- und Ausziehwerkzeuge dient, und dem auf einem kurzen Zylinder befindlichen halbkugelförmigem Meßkopf. Der Taster und das feste Ende am Rahmen des Dehnungsaufnehmers sind mit Kegelpfannen zum Aufnehmen der Stiftköpfe bestückt.

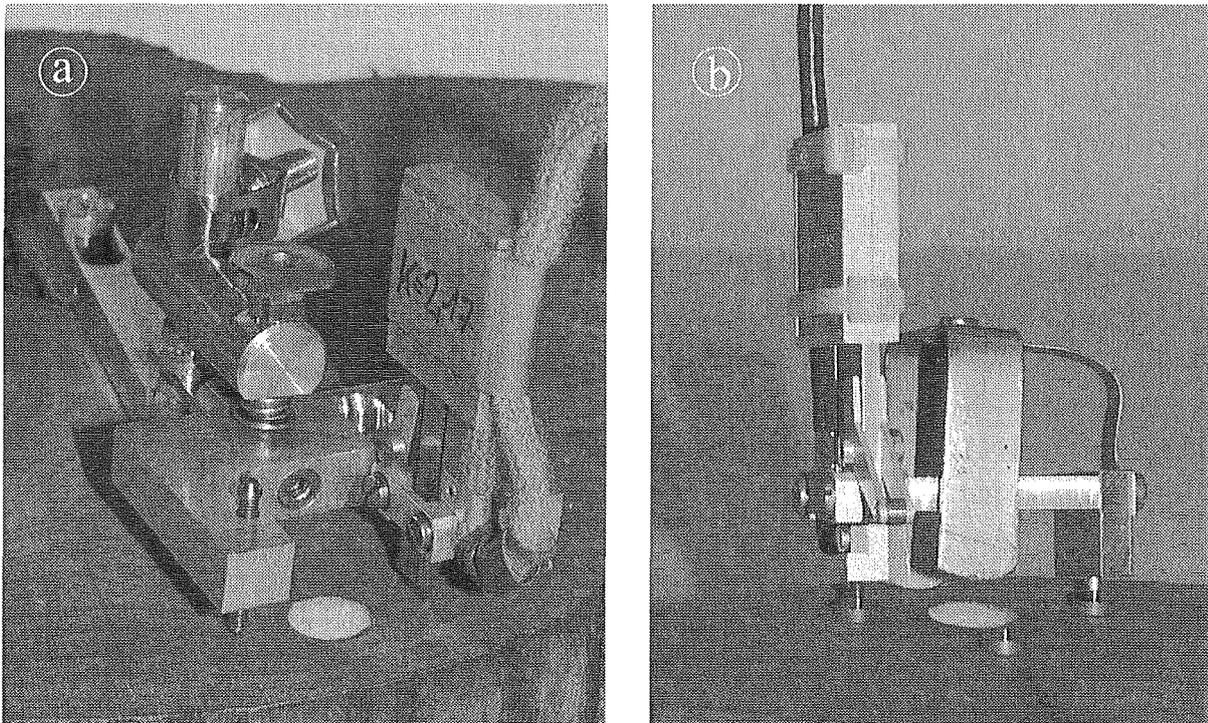


Abbildung 2.20: Aufgeklemmter Dehnungsmesser (a) und Setzdehnungsmesser mit Meßstiften (b).

Bei unbekanntem Spannungszustand sind drei Meßstiftpaare zur Ermittlung von Größe und Richtung der Hauptspannungen erforderlich. Am Ort, an dem die Spannungen zu ermitteln sind, werden zuerst Meßmarken konzentrisch angebracht (vgl. Abbildung 2.21) und der Abstand zwischen jeweils zwei gegenüberliegenden Marken gemessen. Anschließend wird zentrisch ein Loch gebohrt und wieder der Abstand der Meßmarkenpaare bestimmt. Aus den Differenzen der Abstände vor und nach dem Bohren können die Spannungen mit den folgenden Gleichungen errechnet werden (PEITER 1966):

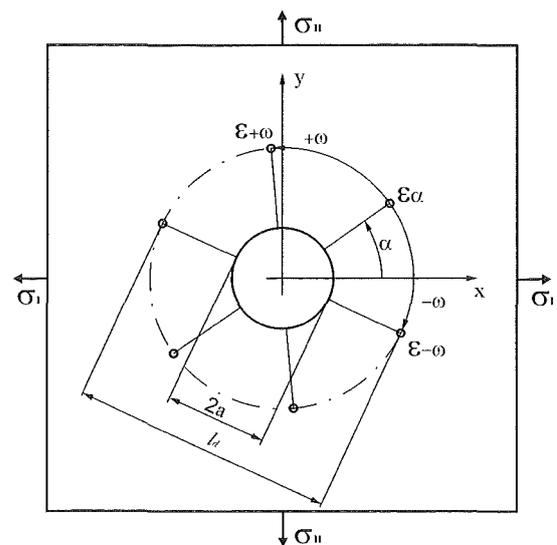


Abbildung 2.21: Anordnung der Meßpunkte um das Bohrloch.

$$\sigma_I = \frac{E}{8} \left(\frac{\varepsilon_{+\omega} + \varepsilon_{-\omega} - 2\varepsilon_\alpha \cos 2\omega}{A \sin^2 \omega} + \frac{\sqrt{(2\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{+\omega} - \varepsilon_{-\omega})^2 + \tan^2 \alpha (\varepsilon_{-\omega} - \varepsilon_{+\omega})^2}}{B \sin^2 \omega} \right)$$

$$\sigma_{II} = \frac{E}{8} \left(\frac{\varepsilon_{+\omega} + \varepsilon_{-\omega} - 2\varepsilon_\alpha \cos 2\omega}{A \sin^2 \omega} - \frac{\sqrt{(2\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{+\omega} - \varepsilon_{-\omega})^2 + \tan^2 \alpha (\varepsilon_{-\omega} - \varepsilon_{+\omega})^2}}{B \sin^2 \omega} \right)$$

$$\tan 2\alpha = \tan \omega \frac{\varepsilon_{-\omega} - \varepsilon_{+\omega}}{2\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{+\omega} - \varepsilon_{-\omega}}$$

E = Elastizitätsmodul

ε = Dehnung

ω = Winkel zwischen den Richtungen des mittleren und der beiden äußeren Meßpunktpaare.

α = Winkel zwischen der ersten Hauptspannungsrichtung und der Richtung des mittleren Meßpunktpaares.

Die Konstanten A und B ergeben sich aus dem Bohrlochradius a , dem Abstand l_d der Meßpunkte und der Querkontraktionszahl μ zu:

$$A = 2 \frac{a^2(1+\mu)}{l_d^2}$$

$$B = \frac{8a^2}{l_d^2} \left(1 - (1-\mu) \frac{a^2}{l_d^2} \right)$$

Bei bekannten Hauptspannungsrichtungen sind zwei um 90° versetzte Meßpunktpaare, die in die entsprechenden Richtungen weisen, ausreichend. Damit vereinfachen sich die Gleichungen zu:

$$\sigma_I = \frac{E}{4} \left(\frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{A} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{B} \right)$$

$$\sigma_{II} = \frac{E}{4} \left(\frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{A} - \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{B} \right)$$

Diese Gleichungen gelten streng genommen für Durchgangslöcher in Blechen. Sie können darüber hinaus auch bei Sacklöchern in dicken Proben angewandt werden, sofern die Eigenspannungen an der Oberfläche vollkommen ausgelöst werden. Dieser Zustand ist erreicht, wenn an der Probenoberfläche bei zunehmender Bohrlochtiefe keine weiteren Verformungen auftreten (PEITER 1966).

Weiterhin liegt den Gleichungen isotropes Materialverhalten zugrunde. Bei Holz kann Isotropie nur näherungsweise in der Querschnittsebene angenommen werden, wo der Quotient des Elastizitätsmodules in radialer Richtung zum Elastizitätsmodul in tangentialer Richtung im Mittel 2 beträgt. Für eine exakte quantitative Bestimmung der Wachstumsspannungen im Holz ist ein hinreichender Abstand (15facher Lochdurchmesser nach MOTZFELD 1961) des Bohrlochs zu den Probenrändern und anderen Störungen erforderlich.

Können die zur präzisen Funktion der Bohrlochmethode notwendigen Bedingungen nicht eingehalten werden oder ist die Dehnungsmessung ausschließlich in einer Richtung durchführbar (z.B. mit aufgeklemmtem Dehnungsmesser), so ist nur eine qualitative Abschätzung der Spannungen anhand der gemessenen Dehnungen möglich.

2.2.4 Die CAO-Methode

Die CAO-Methode (Computer Aided Optimization) dient vorzugsweise der Gestaltoptimierung mechanisch belasteter Bauteile durch Simulation der biologischen Wachstumsprozesse nach dem Axiom der konstanten Spannung (vgl. Kapitel 2.1). Die Simulationsrechnung kopiert dabei das sekundäre Dickenwachstum wie es im Kambium der Bäume stattfindet. In hoch belasteten Bereichen wird verstärkt Material angelagert und es zeigt sich geringes oder kein Wachstum, wo vergleichsweise niedrige Belastungen vorherrschen. Zur Bauteiloptimierung kann zusätzlich die Option „Schrumpfen“ zugelassen werden, die sich am Abbauprozess unterbelasteter Knochenbereiche orientiert. Durch diese Vorgänge verändert sich die ursprünglich inhomogene Spannungsverteilung im Bauteil derart, daß die oft versagensauslösenden Spannungsspitzen abgebaut werden. Die erforderlichen Berechnungen kann jedes FEM-Programm verrichten, sofern sich damit auch thermische Verschiebungen (s. u.) realisieren lassen. Das CAO-Paket muß nur an die Ein- und Ausgaberroutinen des verwendeten FEM-Codes angepaßt werden.

Im ersten Schritt der Optimierung wird ein FE-Modell mit Materialkennwerten und Randbedingungen (Einspannungen, Belastungen, vorgegebene Verschiebungen etc.) erzeugt. An Oberflächen von Bereichen, die Veränderungen erfahren sollen, ist eine dünne Schicht finiter Elemente als Wachstumsschicht zu definieren. Eine nachfolgende Spannungsanalyse liefert für das Ausgangsdesign die Verteilung der von Mises-Spannungen⁹. Die Spannungs-

⁹ Die Vergleichsspannung nach von Mises bzw. der Gestaltänderungsenergiehypothese überführt einen mehrachsigen in einen einachsigen Spannungszustand. Sie gilt für duktile Werkstoffe, die bei Auftreten plastischer Deformation versagen oder bei schwingender Beanspruchung mit Versagen durch Dauerbruch reagieren (BEITZ und KÜTTNER 1990).

werte σ_i an den Knoten i der Wachstumsschicht werden, in Abhängigkeit von einer Referenzspannung σ_{ref} und des Skalierungsfaktors A , formal in eine fiktive Temperatur T_i umgewandelt:

$$T_i = A[\sigma_i - \sigma_{ref}]$$

Als Referenzspannung wird die Spannung gewählt, die später auf der Bauteiloberfläche wirken soll. Zusammen mit dem Skalierungsfaktor kontrolliert sie die Temperaturverteilung und die damit verbundenen Materialzuwächse. Für eine zweite FE-Analyse wird den Elementen der Wachstumsschicht ein thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha > 0$ und ein anderer Elastizitätsmodul zugewiesen. Der neue Elastizitätsmodul beträgt etwa 1/400 des Wertes des umgebenden Materials und gewährleistet, daß die Verformungen auf die Wachstumsschicht beschränkt bleiben und etwa senkrecht zu der freien Oberfläche erfolgen. Diese Analyse ist frei von mechanischen Lasten, so daß ausschließlich die vorgegebene Temperaturverteilung zu Verformungen (Wachstum oder Schrumpfen) der Wachstumsschicht führt. Zuletzt werden die thermischen Verschiebungen der Randknoten zu den ursprünglichen Knotenkoordinaten addiert und eventuell notwendige Netzkorrekturen durchgeführt. Nach einer erneuten Spannungsberechnung mit den ursprünglichen Materialkennwerten und Randbedingungen kann das Ergebnis beurteilt werden. Befinden sich auf der Oberfläche der modifizierten Geometrie noch immer kritische Spannungskonzentrationen, so wird die oben beschriebene Vorgehensweise wiederholt. In der Regel ist nach zwei bis fünf Iterationen ein ausreichend homogener Spannungszustand erreicht.

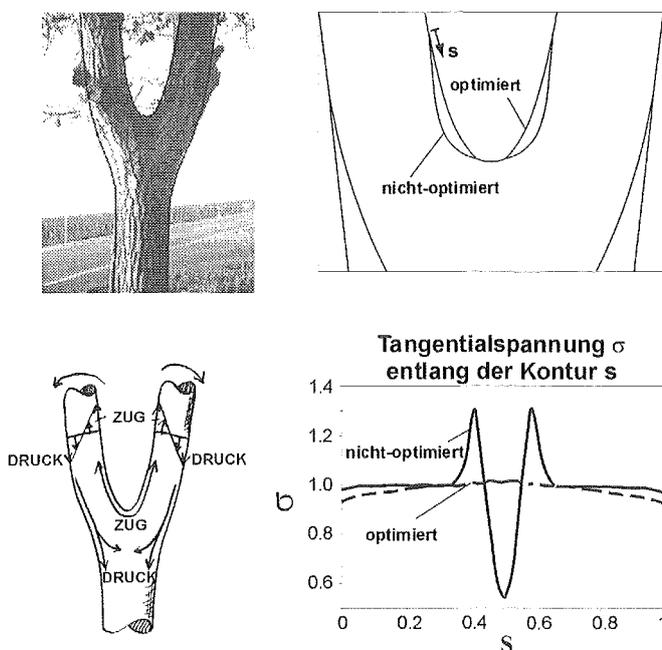


Abbildung 2.22: Auswirkung der Gestaltoptimierung auf die Spannungsverteilung in einer Baumgabel.

Neben der Optimierung mechanischer Bauteile kann die CAO-Methode auch zur Simulation natürlicher, mechanisch stimulierter Wachstumsprozesse eingesetzt werden. MATTHECK (1997) und WALTHER (1994) weisen in ihren Arbeiten ausdrücklich auf die guten Ergebnisse auf diesem Gebiet hin. Abbildung 2.22 zeigt die Auswirkung der Gestaltoptimierung auf die Spannungsverteilung in einer Baumgabel. Nach Vorgabe eines groben Designvorschlages (mit Spannungsüberhöhungen an einer Kreiskerbe) und der äußeren Last wächst die Geometrie in einen Zustand nahezu konstanter Spannungsverteilung und zeigt beeindruckende Übereinstimmungen mit der Kontur des natürlichen Vorbildes.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Druckfestigkeitsverteilung in Ästen

Äste werden durch ihr Eigengewicht permanent belastet. In den Vegetationsphasen addiert sich dazu noch das Gewicht des Laubes, im Winter erhöht gelegentlich Schnee die Belastung. Daraus resultiert ein zum Stamm hin zunehmendes Biegemoment, dem die Äste mit einer Durchmesserzunahme und häufig auch mit einer Ovalisierung des Querschnitts begegnen. Das oberseitige Astholz wird durch die Biegespannungen auf Zug beansprucht und das unterseitige auf Druck. Die Druckfestigkeit von Holz in Faserrichtung ist nur ca. halb so groß wie die Zugfestigkeit, so daß bei Biegebelastung in der Regel durch Druckversagen den Bruch einleitet (MATTHECK 1997). Daraus ergibt sich die Frage, ob die permanente Stimulation durch Druckspannungen zu einer Anpassung der Festigkeit führt. Eine Anpassung der Druckfestigkeit wäre sinnvoll, falls die Druckspannungen als kritische Belastung vom Holz der Äste erkannt werden und es in der Lage ist, diese Festigkeit zu variieren.

Zur Klärung dieser Frage wurde die Druckfestigkeit vom Holz der Unter- und Oberseiten von Ästen mit dem Fractometer III bestimmt. Daneben wurde die Druckfestigkeit des Stammholzes mit dem gleichen Meßgerät ermittelt. Dieses Vorgehen ermöglicht den Vergleich des überwiegend druckbelasteten Holzes der Astunterseite mit dem überwiegend zugbelasteten Holz der Astoberseite und dem wechselseitig beanspruchten Stammholz hinsichtlich einer Druckfestigkeitsanpassung.

Die Probenentnahme erfolgte zum einen aus Stämmen, zum anderen aus stammnahen, geraden Abschnitten waagrecht oder leicht aufwärts geneigter Äste von Bäumen verschiedener Laubholzgattungen. Dazu wurde ein Zuwachsbohrer am Ast radial und senkrecht zu der Oberfläche auf Unter- bzw. Oberseite angesetzt und eingedreht, bis er den Querschnitt durchdrungen hatte. Um ein Aufreißen dünner Äste zu minimieren, wurden die Erhebungen (Verdrängungsnocken zur Verminderung der Schaftrreibung) am Gewindeauslauf des Bohrers abgeschliffen. Den Stämmen wurde mit dem gleichen Zuwachsbohrer jeweils ein Bohrkern radial in einer Höhe von ca. 1,5 m entnommen. Die Bohrkern wiesen 5 mm Durchmesser auf. Ihre Länge entsprach der Querschnittshöhe des jeweiligen Astes bzw. dem Durchmesser des Stammes, sofern dieser die Länge des Zuwachsbohrers nicht übertraf. Sie wurden in ca. 7-10 mm lange Stücke unterteilt und im Fractometer III durch Druck in Faserrichtung bis zum Versagen belastet. Aus den gemessenen Kräften wurde die axiale Druckfestigkeit errechnet. Eine Zuordnung der Festigkeiten zu den Ursprungsorten der Proben ergab die Festigkeitsprofile der untersuchten Äste. Abbildung 3.1 zeigt exemplarisch für alle untersuchten Bäume den Querschnitt und das Druckfestigkeitsprofil eines Astes und die im Stamm gemessenen Druckfestigkeiten der Eiche A. Im folgenden wird ausschließlich der für diese Arbeit bedeutende Verlauf der Druckfestigkeiten im Ast explizit dargestellt. In der Darstellung des Astquerschnittes sind die Ovalisierung und die Jahrringe mit den unterschiedlichen Zuwachsraten in der Astober- und -unterseite zu erkennen. Im Festigkeits-

profil ist eine höhere Festigkeit des unterseitigen Astholzes deutlich sichtbar. Die Festigkeiten des unterseitigen Astholzes sind im Mittel größer als die des Stammholzes, dessen Festigkeiten wiederum übertreffen die des oberseitigen Astholzes.

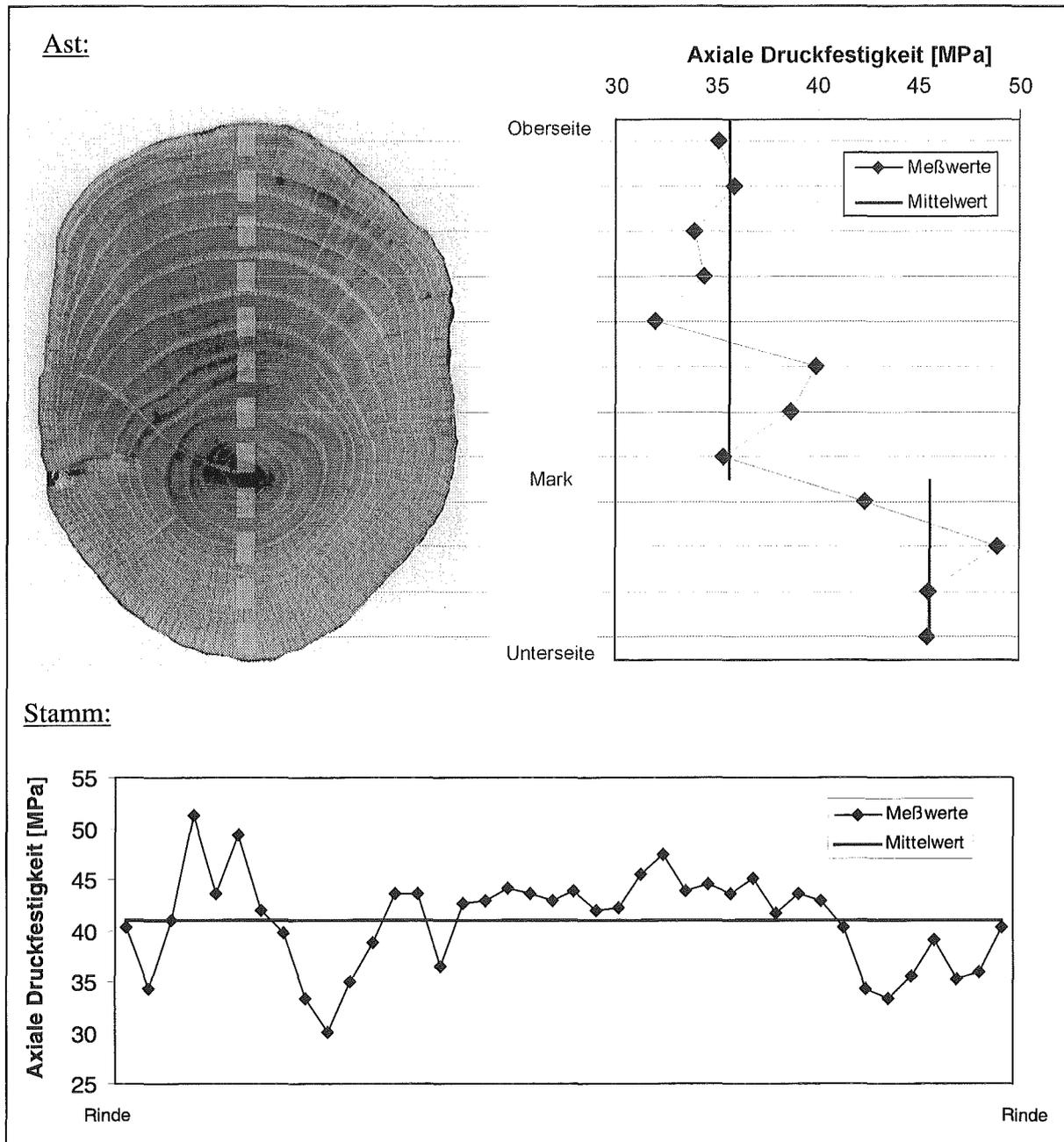


Abbildung 3.1:

Oben: Querschnitt eines Eichenastes (Quercus spp.) und dessen Druckfestigkeitsprofil. Die hellen Rechtecke im Querschnitt markieren die ursprünglichen Positionen der entnommenen Proben.

Unten: Im Stammholz gemessene Druckfestigkeiten.

In den Abbildungen 3.2 und 3.3 sind die Druckfestigkeitsprofile aller untersuchten Äste der Gattungen Rot- (*Fagus sylvatica* L.) und Hainbuche (*Carpinus betulus* L.), Eiche (*Quercus spp.*), Erle (*Alnus glutinosa* (L.) Gae.), Kirsche (*Prunus avium* L.), Ulme (*Ulmus spp.*) und Weide (*Salix alba* L.) dargestellt. Viele der untersuchten Äste stammen von Eichen. Diese Gattung bildet häufig starke Äste aus, die sich weit und nahezu waagrecht vom Stamm weg zum Licht hin erstrecken und die vom Boden aus noch zugänglich sind. Die Anzahl der Meßproben pro Ast ist von dessen Durchmesser abhängig. Im jeweiligen Diagramm ist die Position des Markstranges (M) gekennzeichnet. Trotz der starken Streuung der Materialeigenschaften ist in der Regel ein deutlicher Anstieg der Festigkeiten zur Astunterseite hin zu beobachten. Mit Ausnahme der Hainbuche wurde bei allen Ästen der höchste axiale Druckfestigkeitswert im Holz der Astunterseite gemessen. Oberhalb des Markstranges ist häufig in den ersten Jahrringen ein lokales, manchmal auch ein globales Festigkeitsminimum vorzufinden.

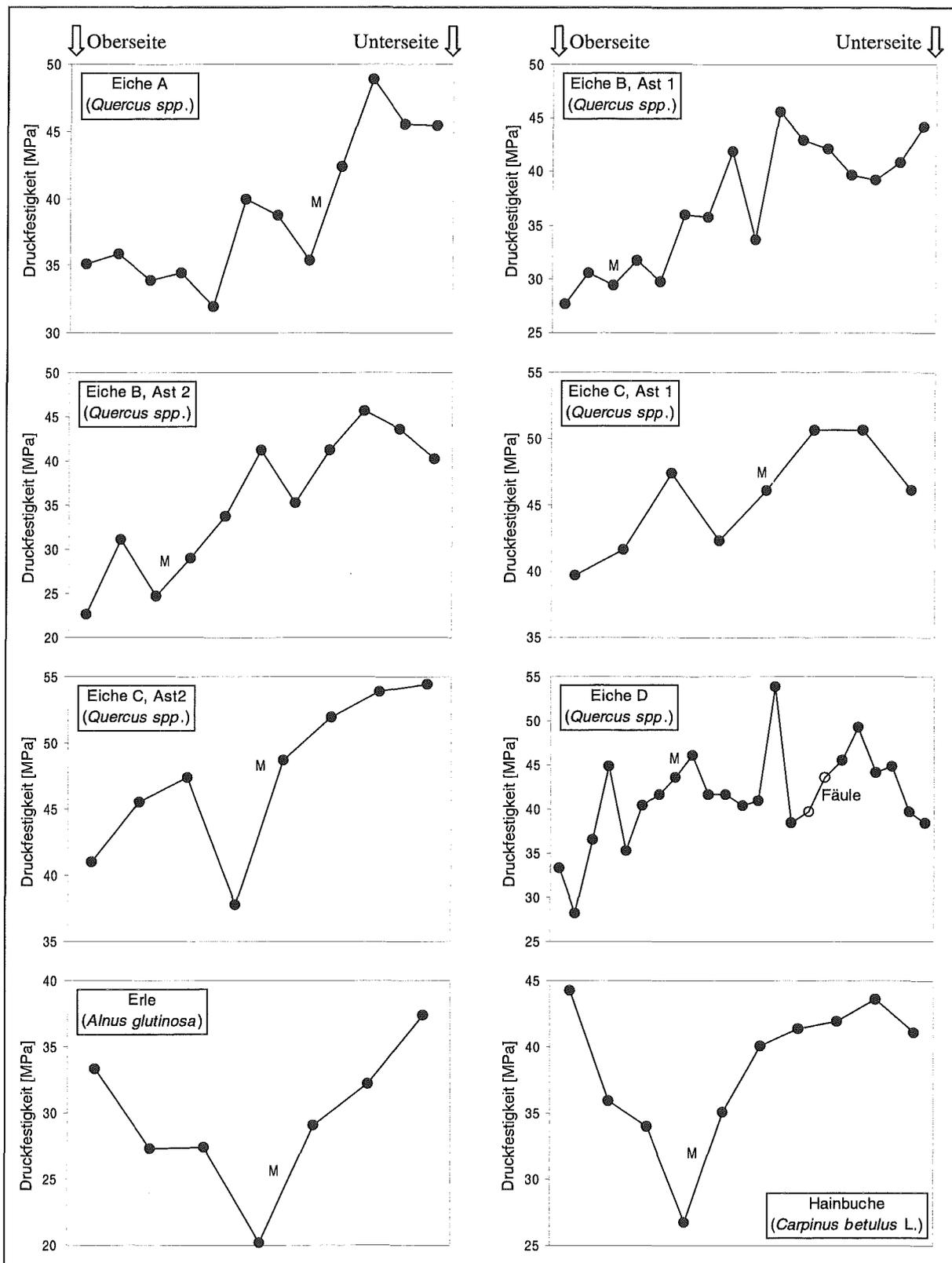


Abbildung 3.2: Verlauf der axialen Druckfestigkeit über der Querschnittshöhe von verschiedenen Laubholzästen. Die Festigkeitsprofile beginnen in den Diagrammen links mit der Astoberseite und enden rechts mit der Astunterseite. Die Position des Markstrangs ist mit M gekennzeichnet.

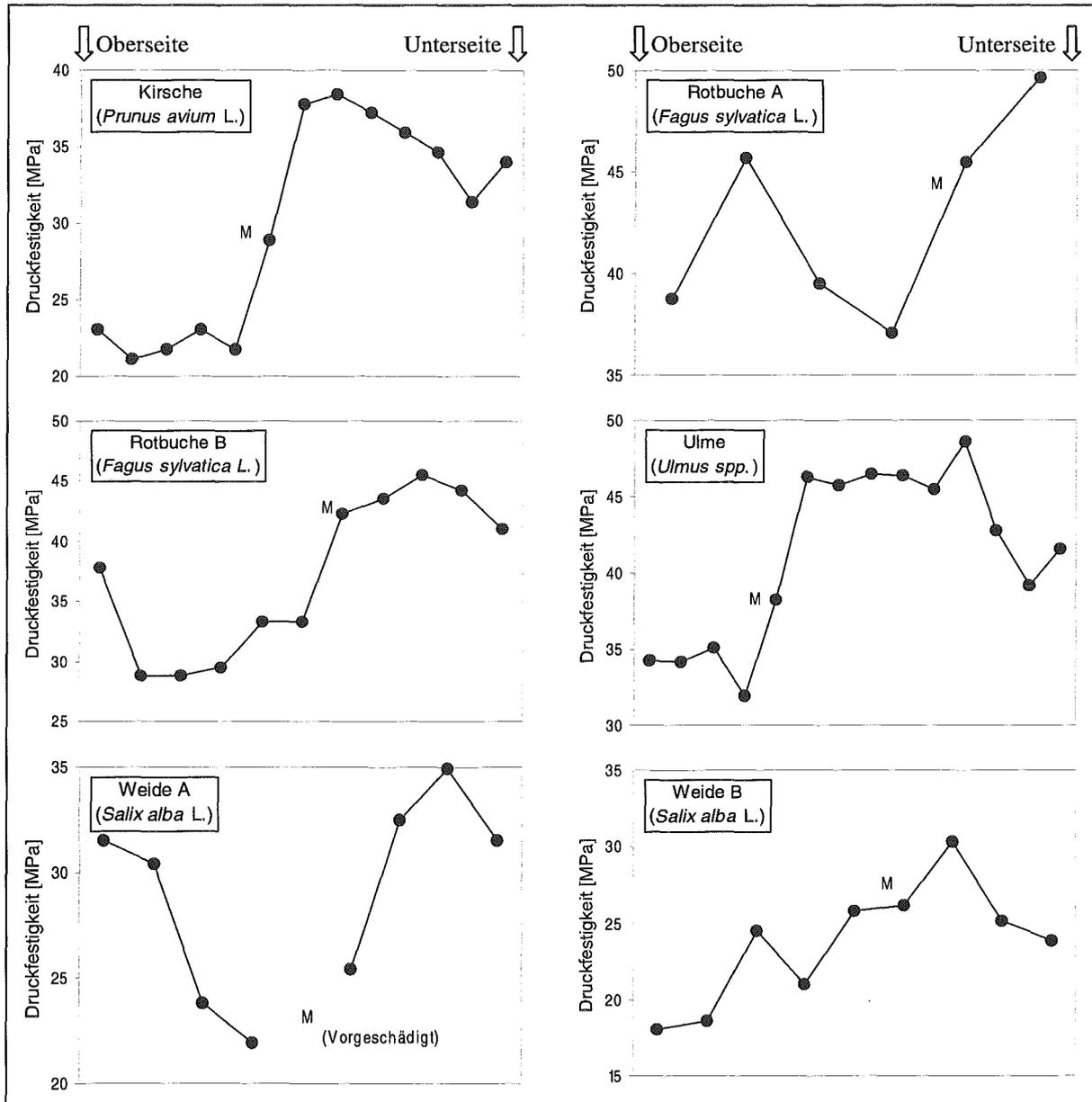


Abbildung 3.3: Verlauf der axialen Druckfestigkeit über der Querschnittshöhe von verschiedenen Laubholzstämmen. Die Festigkeitsprofile beginnen in den Diagrammen links mit der Astoberseite und enden rechts mit der Astunterseite. Die Position des Markstrangs ist mit M gekennzeichnet.

In den Festigkeitsverläufen zeigt sich eine Überlegenheit des astunterseitigen Holzes. Es sind mehrere Ursachen für diese lokale Druckfestigkeitserhöhung denkbar. Zum einen kann die Druckfestigkeit des Holzes der Astoberseite aufgrund mangelnder Stimulation reduziert sein. Zum anderen kann die Druckfestigkeit der Astunterseite belastungsgerecht erhöht sein. Möglich wäre auch eine Kombination dieser beiden Mechanismen. Aufschluß darüber gibt ein Vergleich der Ast-Druckfestigkeiten mit denen des allseitig gleichermaßen belasteten Stammholzes. Dazu wurde die über einem Bohrkern gemittelte Druckfestigkeit des Stammholzes dem Mittelwert des Astholzes oberhalb des Markstranges und des Astholzes unterhalb davon gegenübergestellt (vgl. Abbildung 3.4 und Tabelle 3.1). Meßwerte von Proben, die den Markstrang enthielten, wurden nicht mit einbezogen. Als Trennlinie im Ast wurde der Markstrang gewählt, da das Holz unterhalb davon im Zeitraum seiner Bildung mit Sicherheit auf Druck beansprucht wurde. Durch die überproportionalen Zuwächse auf der Astoberseite wird die Neutrale Faser der Biegung aus dem Markstrang nach oben verschoben. Damit wird auch das sich etwas oberhalb des Marks befindende Holz auf Druck beansprucht, mit einer nachträglichen Verfestigung ist jedoch aufgrund der relativ geringen Biegespannungen im Astinneren nicht zu rechnen. Anhaltspunkte dafür sind auch in den Festigkeitsverläufen in den Abbildungen 3.2 und 3.3 nicht zu finden.

Die mittleren Festigkeiten des unterseitigen Astholzes sind bei allen Ästen zwischen 15% und 54% höher als die des oberseitigen.

Die mittlere Druckfestigkeit des Stammholzes ist bei allen untersuchten Bäumen kleiner als die mittlere Festigkeit des unterseitigen Astholzes und meist größer als die mittlere Festigkeit des oberseitigen Astholzes. Lediglich zwei Bäume weisen im Stamm geringere Festigkeiten auf als in den Astoberseiten, zu den Festigkeiten im Stamm der Eiche B liegen keine Meßwerte vor.

Die Festigkeitsunterschiede zwischen astober- und -unterseitigem Holz sind offensichtlich auf hohem Niveau signifikant, ebenso verhält es sich mit den Differenzen zwischen dem Holz des Stammes und dem Holz der Astunterseite. Weniger eindeutig sind die Unterschiede zwischen Astunterseite und Stamm. Zur Prüfung der Signifikanz wurde ein zweiseitiger, paariger t-Test (KÖHLER 1996, BRONSTEIN 1989) durchgeführt, dessen Nullhypothese: „die mittlere Druckfestigkeit des astoberseitigen Astholzes ist gleich der mittleren Druckfestigkeit des Stammholzes“ auf einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ zu verwerfen war.

Damit können aus den gemessenen Festigkeiten folgende Schlußfolgerungen getroffen werden: Überwiegend druckbelastetes Holz (Astunterseite) weist im Vergleich zum Normalholz, d.h. zu in der Regel wechselnd beanspruchtem Holz (Stamm), eine erhöhte Druckfestigkeit auf. Hauptsächlich durch Zug beanspruchtes Holz (Astoberseite) weist im Vergleich zu normal beanspruchtem Holz eine geringere Druckfestigkeit auf. Die Druckfestigkeit des Astholzes in saftfrischem Zustand ist somit abhängig von seiner Lastgeschichte.

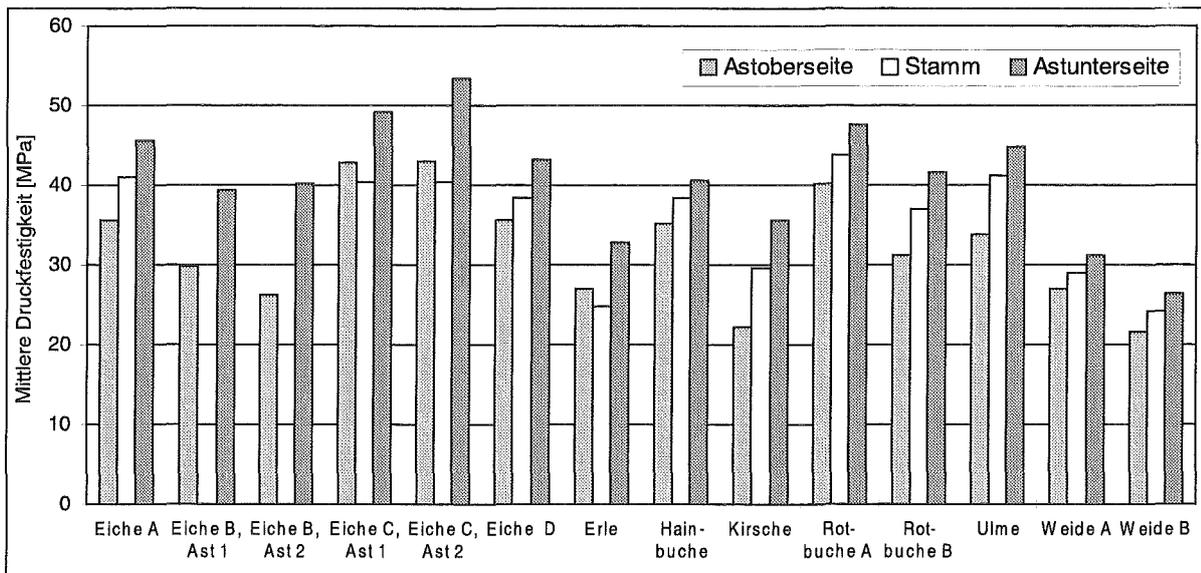


Abbildung 3.4: Mittlere axiale Druckfestigkeit der untersuchten Äste und Stämme.

Die Festigkeitsminima am Markstrang, bzw. dicht oberhalb davon, können mit der Überlagerung der Eigenschaften des Holzes der ersten Jahresringe, dem „juvenile wood“, und des oberseitigen Astholzes erklärt werden. Untersuchungen von KAYA und SMITH (1993) an Pinien zeigen, daß juveniles Holz geringere Druckfestigkeiten aufweist als das später gebildete. Aus dem Mangel an Stimulation durch eine entsprechende Belastung kann ein Festigkeitsminimum resultieren.

Die Astquerschnitte waren in vertikaler Richtung häufig stark ovalisiert. Dies stellt eine Gestaltanpassung der Starkäste an die dominierende Belastung durch ihr Eigengewicht dar (vgl. Kapitel 2.1). Mit der Ovalisierung gehen meist sehr ungleiche Zuwachsraten mit entsprechend unterschiedlichen Jahrringbreiten auf Astober- und -unterseite einher. Nach KOLLMANN (1982) steigt die Druckfestigkeit von Stammholz mit zunehmender Jahrringbreite. Einige der untersuchten Äste zeigen deutlich größere Jahrringbreiten auf der Unterseite, andere hingegen weisen oberseitig größere Zuwächse auf. Die Druckfestigkeit aller untersuchten Äste ist jedoch in den Unterseiten am größten, so daß der Einfluß der Jahrringbreite gegenüber dem Einfluß der Lastgeschichte nur von untergeordneter Bedeutung sein kann.

	Ast				Stamm		Verhältnisse der mittleren Druckfestigkeiten:		
	Oberseite		Unterseite		σ_D^S	$Stda$	Oberseite/ Stamm	Unterseite/ Stamm	Oberseite/ Unterseite
	σ_D^O	$Stda$	σ_D^U	$Stda$			σ_D^O/σ_D^S	σ_D^U/σ_D^S	σ_D^O/σ_D^U
Eiche A	35,7	2,6	45,6	2,7	41,0	4,6	0,87	1,11	0,78
Eiche B, (Ast1)	29,8	1,7	39,3	4,7	-	-	-	-	0,76
(Ast2)	26,1	4,4	40,2	4,3					0,65
Eiche C, (Ast1)	42,8	3,3	49,1	2,6	40,4	5,1	1,06	1,22	0,87
(Ast2)	42,9	4,3	53,4	1,3			1,06	1,32	0,8
Eiche D	35,6	5,7	43,3	4,1	38,4	5,4	0,93	1,13	0,82
Erle	27,1	5,4	32,9	4,2	24,9	2,8	1,09	1,32	0,82
Hainbuche	35,2	7,2	40,5	2,9	39,0	1,4	0,92	1,06	0,87
Kirsche	22,2	0,9	35,6	2,5	29,5	3	0,75	1,21	0,62
Rotbuche A	40,3	3,8	47,6	2,9	43,9	4,7	0,92	1,08	0,85
Rotbuche B	31,3	2,2	41,7	4,4	37,0	3,4	0,85	1,13	0,75
Ulme	33,9	1,4	44,7	2,9	41,2	4,5	0,82	1,09	0,76
Weide A	26,9	4,8	31,1	4	29	1,8	0,93	1,07	0,87
Weide B	21,6	3,5	26,4	3,4	24,2	2,4	0,89	1,09	0,82

Tabelle 3.1: Mittlere Druckfestigkeit (σ_D) und Standardabweichung ($Stda$) der untersuchten Äste und Stämme.

3.2 Die Verteilung der Elastizitätsmoduln in Ästen

Vergleicht man die Querschnitte von Ästen und Stämmen, so fallen die Äste besonders durch ihren häufig sehr exzentrischen Wuchs auf. Die Zuwachsraten einer Seite können die der gegenüberliegenden Seite um ein Mehrfaches übertreffen. Befinden sich an Laubbaumästen die größeren Zuwächse auf der Oberseite, so wird die Bildung von Reaktionsholz, dem sogenannten Zugholz, als mögliche Ursache für das vermehrte Dickenwachstum angenommen. Zugholz bewirkt in der Regel eine Aufwärtskrümmung der Äste.

Befinden sich die größeren Zuwächse auf der Astunterseite, so wird dieses Holz als Stützholz bezeichnet, dessen Aufgabe es ist, einem durch Eigengewicht bedingten Absinken der Äste entgegenzuwirken. Wie bereits vielfach nachgewiesen wurde, sind biologische Wachstumsprozesse häufig spannungsgesteuert. In einem homogenen Material sind die Spannungen von der jeweiligen Last und der Geometrie des beanspruchten Körpers abhängig. Bei inhomogenen Materialien beeinflussen variierende Elastizitätsmoduln ebenfalls die Spannungsverteilung. Wie sich die Elastizitätsmoduln im Holz der Astoberseite von denen im Holz der Astunterseite unterscheiden, wurde in vivo untersucht, um mit einer Simulations-

rechnung auf mögliche Einflüsse der Elastizitätsmoduln auf das Wachstum der Starkäste zu schließen.

Mit den in Kapitel 2.2.2 erläuterten Methoden wurden die Biegemoment-Dehnungs-Kurven in der Abbildung 3.5 erstellt. Die gleichmäßigeren Kurven sind mit Hilfe von elektronischen Dehnungsaufnehmern aufgenommen, die unebeneren Kurven wurden mit einem digitalen Meßschieber erfaßt. Dessen geringere Genauigkeit erfordert größere Längenänderungen, um den relativen Meßfehler gering zu halten. Dementsprechend zeigen diese Kurven in der Regel höhere Gesamtdehnungen. Häufig sind die Be- und Entlastungs-Kurven nicht deckungsgleich und weisen eine Hysterese auf. Diese ist durch kleine plastische Formänderungen zu erklären, die nach KOLLMANN (1982) bei Holz stets neben den elastischen Verformungen auftreten.

Aus den gemessenen Dehnungen wurden mit Hilfe der Astquerschnittsflächen und der angreifenden Biegemomente die Elastizitätsmoduln der Astober- und -unterseiten errechnet (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese Werte und die Quotienten der Moduln von Holz der Astoberseite zu den Moduln des Holzes der Astunterseite sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Zum Vergleich sind an dieser Stelle auch die von Lavers (1983) an saftfrischem Stammholz bestimmten Elastizitätsmoduli angegeben.

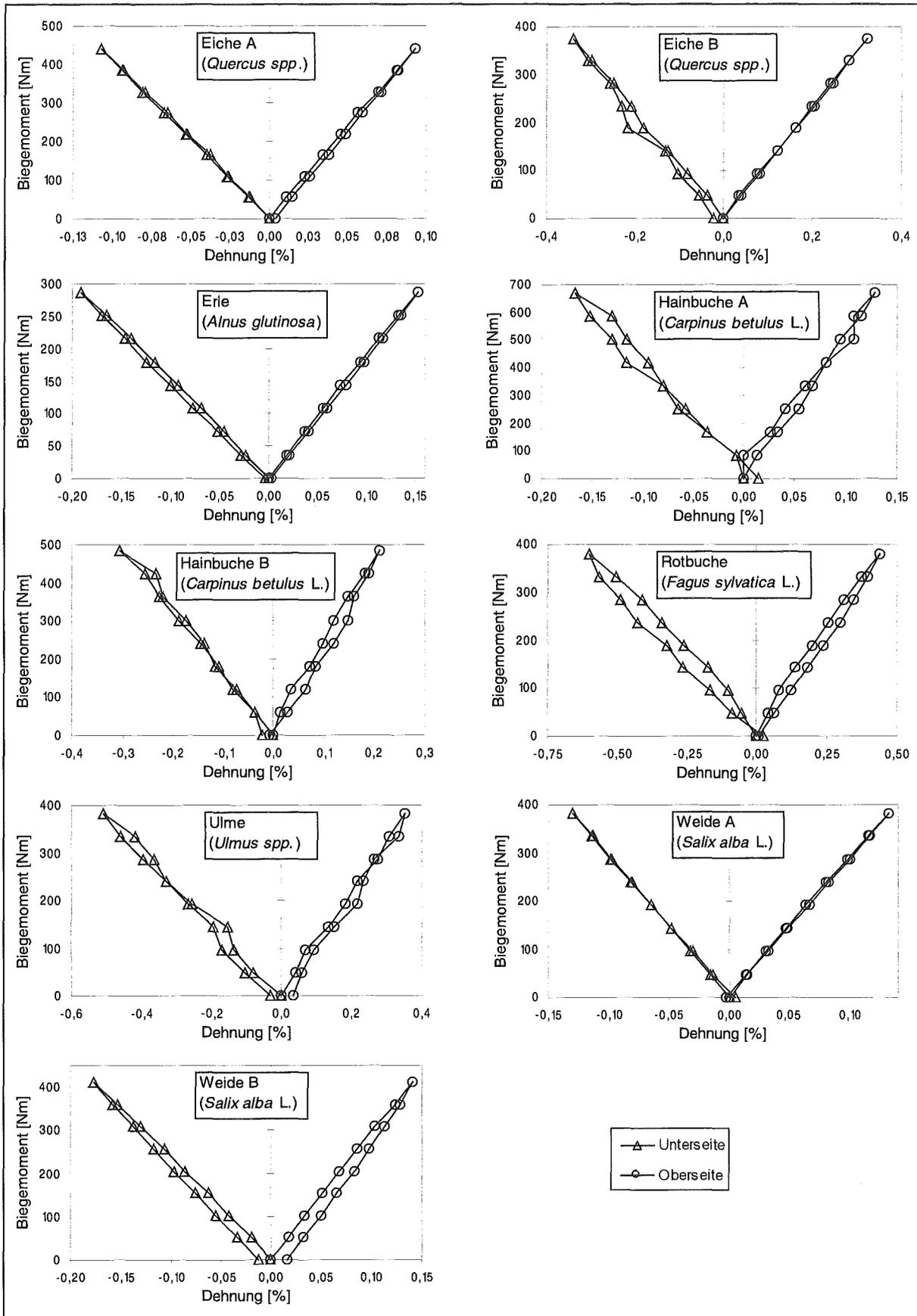


Abbildung 3.5: Durch das aufgebraachte Biegemoment hervorgerufene Randfaserdehnungen in den Ober- und Unterseiten der untersuchten Äste.

		Eiche A	Eiche B	Erle	Hain- buche A	Hain- buche B	Rot- buche	Ulme	Weide A	Weide B
Elastizitätsmodul	Astoberseite Eo	8320	10510	8400	7050	7370	4780	8580	4850	6890
	Astunterseite Eu	6110	9720	4240	3450	3620	2300	4840	4330	3220
	Stamm (LAVERS 1983)	8300		7600	9700		9800	5400	5600	
	Quotient Eo/Eu	1,36	1,08	1,98	2,04	2,03	2,08	1,77	1,12	2,14

Tabelle 3.2: Ermittelte Elastizitätsmoduln (in N/mm^2) des Holzes von Astober- und Astunterseiten, sowie deren Quotienten und Literaturwerte für Stammholz (LAVERS 1983).

Im Mittel sind die Moduln der Astoberseite 1,73-fach höher als die Moduln der Astunterseite, wobei die geringsten Unterschiede mit einem Faktor von 1,08 an einer Eiche und die größten Unterschiede mit einem Faktor von 2,14 an einer Weide beobachtet wurden.

Verglichen mit Literaturwerten für Stammholz (LAVERS 1983), sind die im unterseitigen Astholz gemessenen Elastizitätsmoduln bis auf eine Ausnahme (Eiche B) alle kleiner. Das Astholz weist zumindest lokal wesentlich geringere Elastizitätsmoduln auf als das Stammholz. YOSHIDA et al. (1994) haben sowohl im unter- als auch im oberseitigen Astholz einer Konifere Elastizitätsmoduln bestimmt, die weniger als 20% der mittleren Elastizitätsmoduln des Stammes betragen.

Die ermittelten Elastizitätsmoduln des oberseitigen Astholzes liegen, unter Berücksichtigung der naturgemäß breiten Streuung der Materialkennwerte von Holz, im Bereich der in der Literatur aufgeführten Werte für Stammholz. Ein direkter Vergleich von Ast- und Stammholz desselben Baumes wäre wünschenswert, ist aber mit der genutzten Methode nicht durchzuführen. Momentan ist dazu noch die Fällung des gesamten Baumes erforderlich.

Nachdem die Fähigkeit der Bäume zur Variation des Elastizitätsmodules in den Ästen gezeigt wurde, werden nun die Auswirkungen der in den Astober- und Astunterseiten verschiedenen Elastizitätsmoduln betrachtet.

Die geringeren Elastizitätsmoduln in den Astunterseiten sind sinnvoll, wenn man berücksichtigt, daß die Gleichgewichtslagen der Äste nicht dauerhaft sind. Über die Jahre wechselnde Lichtverhältnisse oder ein durch Eigengewicht bedingtes Absinken der Äste können Korrekturen der Astlage erforderlich machen. Diese Korrekturen werden in der Regel aktiv durch in der Astoberseite gebildetes Zugholz bewirkt. Dabei ist es von Vorteil, wenn das passive Holz der Astunterseite einer notwendigen Aufwärtsbiegung möglichst wenig Widerstand entgegenbringt.

Daneben hat eine größere Nachgiebigkeit der Äste Vorteile in der „Flexibilitätsstrategie“. Hierunter versteht man die Fähigkeit von z.B. Gräsern, sich unter Winddruck einfach wegzubiegen und damit die effektiven Hebelarme zu minimieren. Bei Bäumen findet sich diese Strategie in der Baumkrone, wo Blätter, Zweige und in geringerem Maße auch Äste in

Windrichtung gebogen werden. Dadurch wird die Kronenquerschnittsfläche reduziert, somit die Windlast und schließlich auch das Biegemoment im Stamm minimiert (MATTHECK und KUBLER 1993).

Weiterhin beeinflussen variierende Elastizitätsmoduln die Spannungsverteilung im Lastträger. Das Material mit der höheren Steifigkeit übernimmt einen überproportional großen Anteil der Lastspannungen, der höhere Elastizitätsmodul zieht sozusagen den Kraftfluß an. Bei der durch Eigengewicht bedingten Biegebelastung bewirkt dies, daß die Randfasern der Astoberseite einer erhöhten Zugspannung ausgesetzt sind und die Druckspannungen in den Fasern der Astunterseite reduziert werden (vgl. Abbildung 3.7). Damit ist der geringere Elastizitätsmodul in den Astunterseiten eine weitere Maßnahme, um die relativ zur Zugfestigkeit geringe Druckfestigkeit des Holzes zu kompensieren.

Zum Vergleich mit den *in vivo* ermittelten Elastizitätsmoduln, wurde an zwei der untersuchten Äste (Eiche A und Erle) der Elastizitätsmodul zusätzlich im Labor an einer konventionellen Zug-Druck-Prüfmaschine bestimmt (vgl. Kapitel 2.2.2). Die an den zylindrischen Proben im Druckversuch ermittelten Elastizitätsmoduln sind in Abbildung 3.6 über den Querschnittshöhen der Äste aufgetragen.

Aus dem Ast der Eiche konnten zwei Probenreihen gefertigt werden. Probenreihe 1 beinhaltet den Markstrang und das darüber und darunter befindliche Holz (ähnlich den Festigkeitsmessungen, vgl. Abbildung 3.1); die zweite Probenreihe wurde seitlich davon entnommen. Die im Druckversuch bestimmten Elastizitätsmoduln beider Äste sind in den Astoberseiten größer als in den Astunterseiten (Abbildung 3.6). In der Größe stimmen die im Druckversuch ermittelten Werte gut mit den am Baum ermittelten Werten überein.

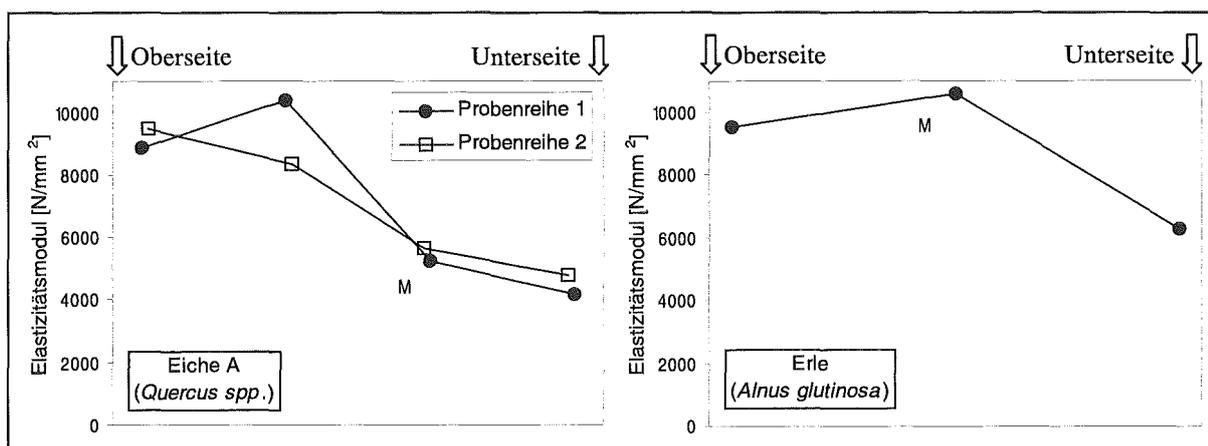


Abbildung 3.6: Im Druckversuch ermittelte axiale Elastizitätsmoduln innerhalb zweier Astquerschnitte. Die Position des Markstranges ist mit M gekennzeichnet.

3.3 Die CAO-Simulation des sekundären Dickenwachstums von Ästen

Die Auswirkung auf das sekundäre Dickenwachstum eines über dem Astquerschnitt von unten zur Oberseite hin ansteigenden Elastizitätsmodules wurde mit der CAO- Methode (vgl. Kapitel 2.2.4) simuliert. Die Berechnungen erfolgten mit der FEM-Software Abaqus (HIBBIT et al. 1998). Unter Ausnützung der vertikalen Symmetrieebene wurde ein Halbzylinder generiert, der auf einer Stirnseite fest eingespannt und auf der anderen mit einem Biegemoment belastet ist. Mit einem von der Unterseite des Halbkreisquerschnittes bis zur Oberseite linear auf den doppelten Wert ansteigenden Elastizitätsmodul wird der maßgebliche mechanische Unterschied bezüglich des Elastizitätsmoduls in der Astober- und -unterseite modelliert. Bei der Simulation wurden die maximalen Zuwächse pro Iteration, an den Orten der höchsten auftretenden Spannungen, auf 10% der Höhe der Ausgangsstruktur begrenzt. Mit diesen Vorgaben wurde in vier Iterationen spannungsgesteuertes Wachstum simuliert.

Die Ausgangsstruktur einschließlich FE-Netz und die nach jedem Zuwachsschritt neu errechneten Außenkonturen sind in Abbildung 3.7 links dargestellt. Die Verläufe der auf den Wert der Oberseite der Ausgangsstruktur bezogenen Dehnung, Biegespannung und des Elastizitätsmodules sind in Abbildung 3.7 im Diagramm aufgetragen. Zur deutlicheren Darstellung wurde die modellierte Struktur gespiegelt und als Vollquerschnitt abgebildet.

Der über die Querschnittshöhe ansteigende Elastizitätsmodul bewirkt eine Verschiebung der Neutralen Faser nach oben, die Dehnung selbst bleibt linear. Damit ist die Randfaserdehnung in der Oberseite kleiner als die in der Unterseite des simulierten Astquerschnittes. Die Spannung ergibt sich als Produkt von Elastizitätsmodul und Dehnung und ist eine quadratische Funktion von der Höhenkoordinate, mit dem höchsten Absolutwert in der Randfaser der Oberseite. In der Unterseite beläuft sich der Betrag der Biegespannung auf ca. 60% des Wertes der Oberseite. Entsprechend beträgt der maximale Zuwachs der Unterseite auch nur etwas mehr als die Hälfte des maximalen Zuwachses der Oberseite. Nach mehreren Iterationen befindet sich der ursprüngliche Mittelpunkt in der unteren Hälfte des neuen Querschnittes. Die simulierten Zuwächse erfolgen rein spannungsgesteuert, sodaß in der neutralen Faser der Biegung kein Material angelagert wird.

3.4 Holzanatomische Untersuchungen an Ästen

Die gemessenen Unterschiede bezüglich der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmodules zwischen dem Holz der Astoberseite und dem der Astunterseite werfen die Frage nach den Mechanismen auf, mit denen der Baum dies realisiert. Zur Klärung dieser Frage wurden jeweils ein Ast und die Stämme der Eiche A, der Hainbuche B und der Kirsche holzanatomisch untersucht.

Die Probenentnahme erfolgte mit einem Zuwachsbohrer. Die Bohrkern wurden in ca. 20 mm lange Holzproben zersägt und in 70 %igem Ethanol aufbewahrt. Anschließend wurden sie in Methacrylat (Nobecutan®) eingebettet, um von ihnen mit einem Schlittenmikrotom (Microm HM 440 E) 10–15 µm dicke Querschnitte anzufertigen. Die Holzchnitte wurden mit Safranin-Astrablau gefärbt (Kombinationsfärbung). Die Färbezeit betrug 10 Minuten. Anschließend wurden sie zweimal mit entmineralisiertem Wasser gewaschen, über eine Alkoholreihe entwässert, in Xylol überführt und in Eukitt eingeschlossen (Alkoholreihe: 50%, 70%, 99,8% Ethanol).

Beim Kontakt der Safranin-Astrablau-Lösung mit den Holzbestandteilen kommt es zu folgender Färbereaktion: Safranin reagiert mit den phenolischen Hydroxylgruppen des Lignins und färbt es rot an. Alle lignifizierten bzw. verholzten Zellwände erscheinen dann rot. Astrablau hat eine hohe Affinität zu Zellulose und färbt diese, wenn sie nicht mit Lignin inkrustiert ist, blau an. Unverholzte Zellwände erscheinen dann blau.

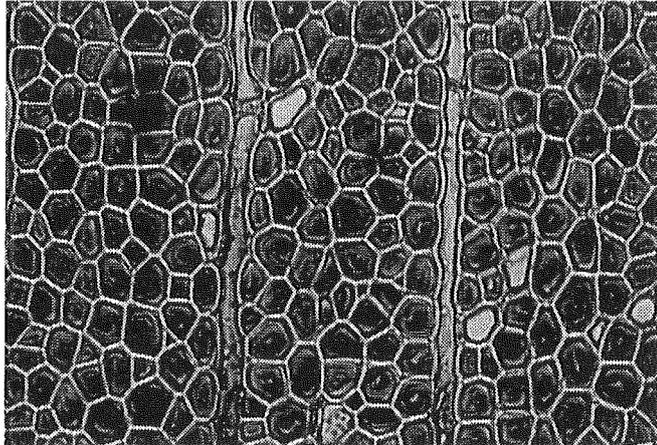
Die gefärbten Holzpräparate wurden mit einem Lichtmikroskop und einer Stereolupe, welche jeweils eine Aufsatzkamera besaßen, untersucht und ausgewertet.

Abbildung 3.8 zeigt die mit Safranin-Astrablau gefärbten Holzquerschnitte aus dem Stamm, sowie der Astober- und der Astunterseite einer Eiche. In der Astoberseite befindet sich das Reaktionsholz (Zugholz). Erkennbar ist dies an der blauen bzw. dunklen Färbung der nicht lignifizierten, gelatinösen Schicht (G-Schicht), welche häufig das Zellinnere ganz ausfüllt. Die G-Schicht ist quellbar und besteht nahezu aus reiner Zellulose.

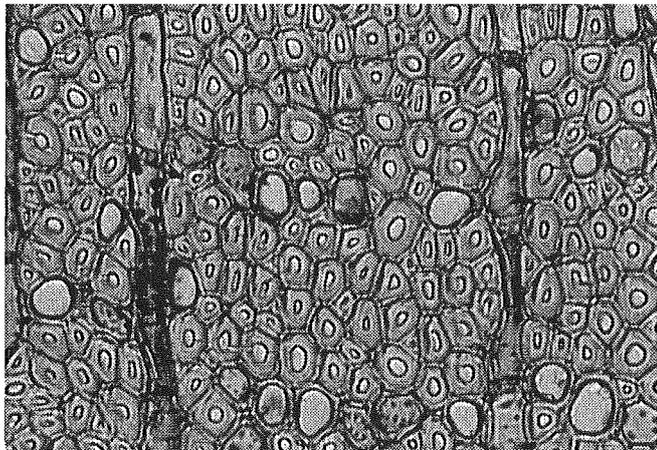
Die Zellwände des Holzes der Astunterseite und des Stammes sind demgegenüber vollständig lignifiziert, was durch eine Rotfärbung angezeigt wird.

Im oberseitigen Astholz ist die Wandstärke der Zellen, aufgrund der quellbaren, gelatinösen Schicht, insgesamt am größten. Betrachtet man nur die verholzten Anteile der Zellwände, so sind diese in der Astunterseite am dicksten, im Stamm etwas dünner und im Reaktionsholz am dünnsten. Die größten Faserzellen und Zellumina befinden sich im Stammholz.

a) Astoberseite:



b) Astunterseite:



c) Stamm:

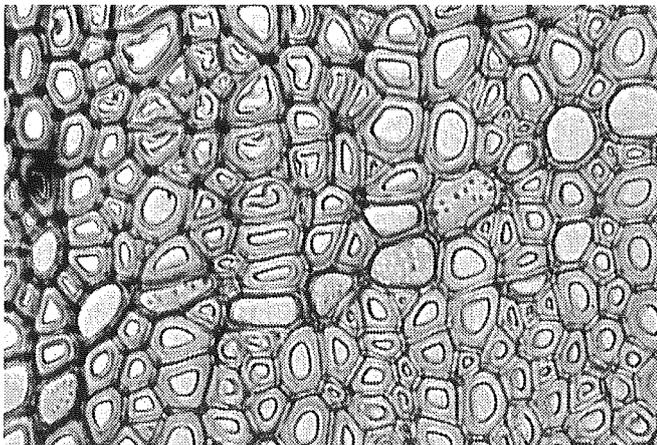


Abbildung 3.8: Mit Safranin-Astrablau gefärbte Querschnitte aus dem Stamm (c) und eines Astes (a, b) der Eiche A (*Quercus* spp.), 400fach. Die Astoberseite enthält Zugholzzellen. Deren nicht lignifizierte, gelatinöse Schicht (G-Schicht) ist blau eingefärbt und erscheint in der Abbildung dunkel. Lignifizierte Zellwandschichten sind rot gefärbt und erscheinen in der Abbildung heller. Die Zellwände der Holzfasern aus der Astunterseite (b) und des Stammes (c) sind komplett rot gefärbt, was eine vollständige Verholzung der Wandschichten anzeigt (Fotos: K. Weber).

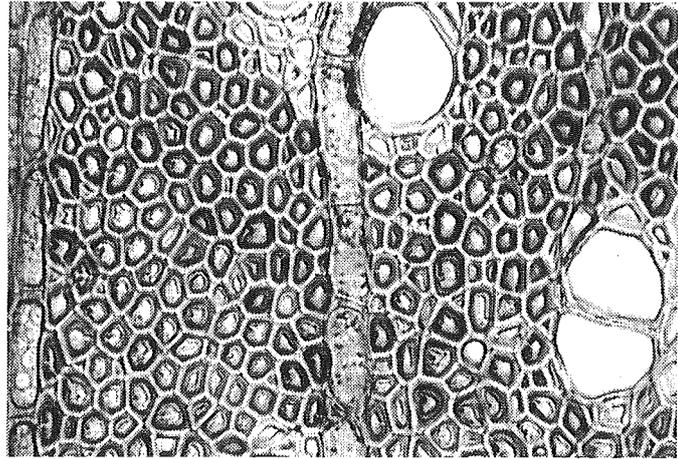
Abbildung 3.9 zeigt die Querschnitte aus Stamm, Astober- und -unterseite einer Kirsche. In der Astoberseite ist ebenfalls Zugholz enthalten. Die gelatinöse Schicht ist hier (Abbildung 3.9a) weniger dick als die in der Astoberseite der Eiche (Abbildung 3.8a). Die Zellwände des Holzes der Astunterseite und des Stammes sind durchgehend lignifiziert. Die verholzten Schichten der Zellwände sind in der Astunterseite sehr dick, im Stamm etwas dünner und im Reaktionsholz am dünnsten. Am größten sind die Durchmesser der Faserzellen und Lumina im Stammholz. Die Lumina der Holzfaserzellen in der Astoberseite sind annähernd gleich groß wie die der Astunterseite.

In Abbildung 3.10 sind die Querschnitte aus Stamm, Astober- und -unterseite der Hainbuche A dargestellt. Die gelatinöse Schicht ist hier (Abbildung 3.10a) nicht so dickwandig wie in den Ästen der Eiche und der Kirsche. Sie ist auch nicht durchgehend dunkel eingefärbt, sondern weist häufig große hellere Bereiche auf. Diese sind nicht rötlich eingefärbt und folglich auch nicht lignifiziert. Vermutlich ist die Zellulose an diesen Stellen durch Hemizellulosen maskiert, so daß sie nicht durch das Astrablau angefärbt werden kann (WEBER 1999c).

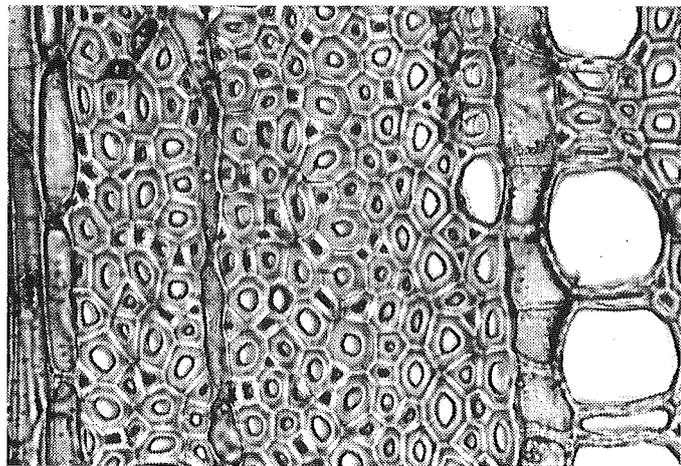
An einigen Stellen ist die G-Schicht von den restlichen Zellwandschichten abgelöst, dies kann als Artefakt der Probenpräparation angesehen werden. Es ist davon auszugehen, daß die Zellwandschichten im Originalzustand aneinander anliegen.

Die Zellwände des Holzes der Astunterseite und des Stammes sind durchgehend lignifiziert. Die verholzten Schichten der Zellwände sind in der Astunterseite ähnlich dick wie im Stamm, im Reaktionsholz sind sie dünner. Die Durchmesser der Zellen und Lumina unterscheiden sich vom Stamm- zum Astholz nur unwesentlich.

a) Astoberseite:



b) Astunterseite:



c) Stamm:

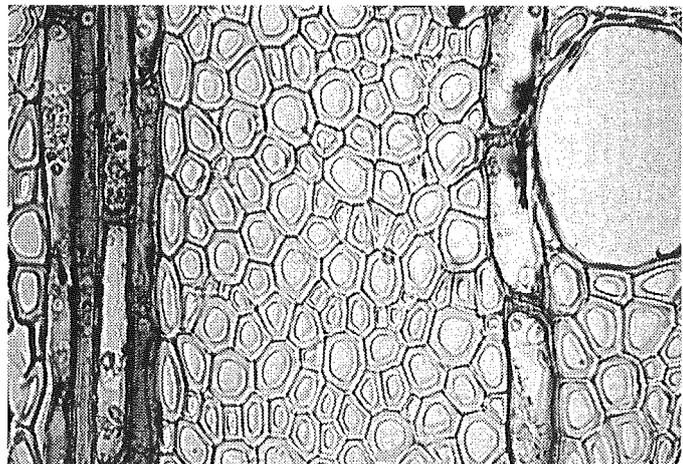


Abbildung 3.9: Mit Safranin-Astrablau gefärbte Querschnitte aus dem Stamm (c) und eines Astes (a, b) der Kirsche (*Prunus avium* L.), 400fach. Die Astoberseite enthält Zugholzzellen. Die nicht lignifizierte, gelatinöse Schicht (G-Schicht) der Zugholzfasern ist blau bzw. dunkel eingefärbt. Lignifizierte Zellwandschichten sind rot gefärbt und erscheinen in der Abbildung heller. Die Zellwände der Holzfasern aus der Astunterseite (b) und des Stammes (c) sind komplett rot gefärbt, was eine vollständige Verholzung der Wandschichten anzeigt. Neben den Faserzellen sind einige Gefäße und Holzstrahlen abgebildet (Fotos: K. Weber).

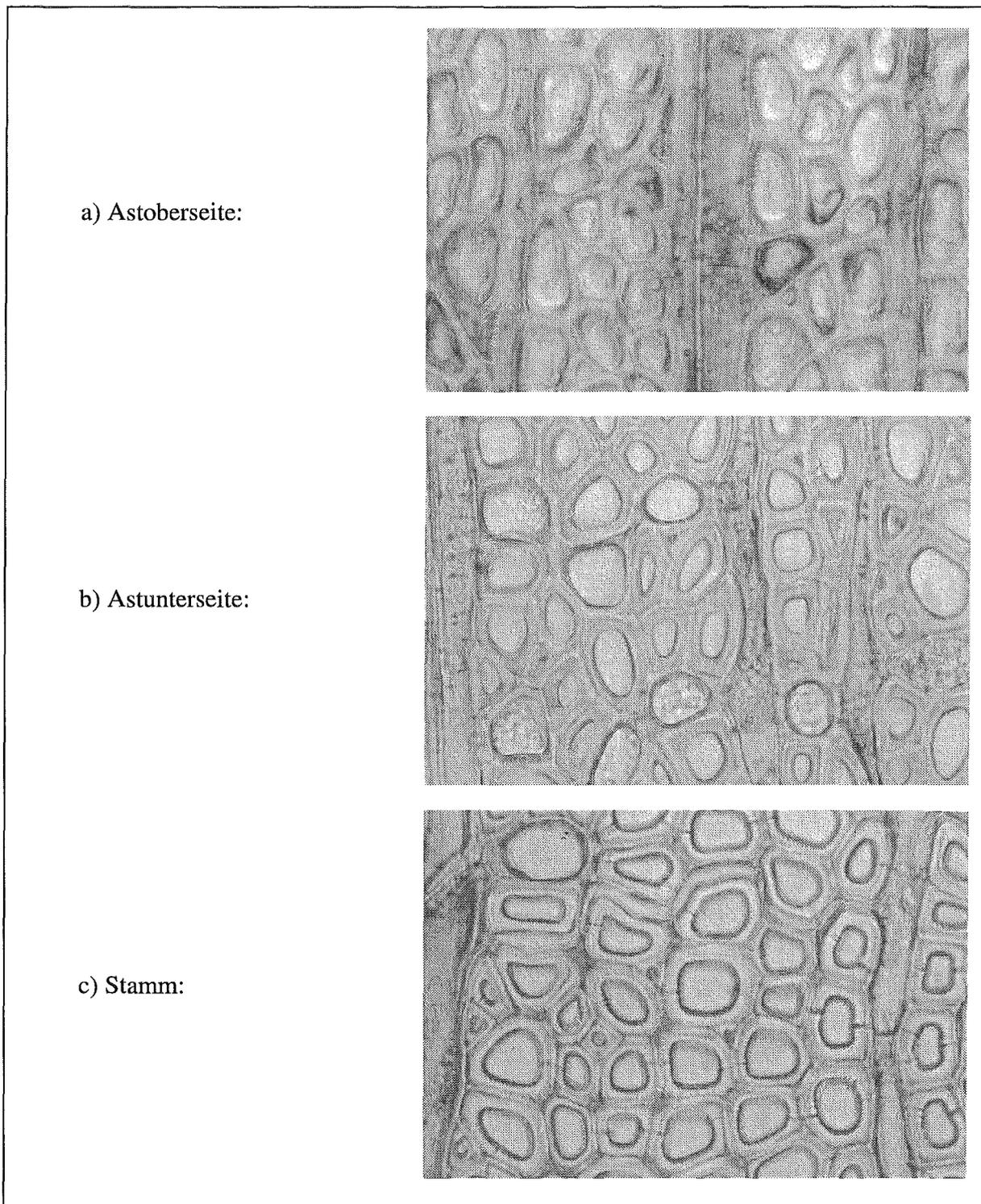


Abbildung 3.10: Mit Safranin-Astrablau gefärbte Querschnitte aus dem Stamm (c) und eines Astes (a, b) der Hainbuche A (*Carpinus betulus* L.), 640fach. Die Astoberseite enthält Zugholzzellen, deren nicht lignifizierte, gelatinöse Schicht (G-Schicht) ist teilweise blau bzw. dunkel eingefärbt. Die Zellwände der Holzfasern aus der Astunterseite (b) und des Stammes (c) sind komplett rot gefärbt, was eine vollständige Verholzung der Wandschichten anzeigt (Fotos: K. Weber).

Vergleicht man den Aufbau der Holzfaserzellen (Abbildung 3.8, 3.9 und 3.10) mit den korrespondierenden Druckfestigkeiten (Tabelle 3.1: Eiche A, Kirsche und Hainbuche A), so kann man folgendes feststellen:

Das Holz mit der höchsten Druckfestigkeit (Astunterseite) besteht im wesentlichen aus Holzfasern mit sehr dicken und vollständig lignifizierten Zellwänden. Das Holz mit der geringsten Druckfestigkeit (Astoberseite) enthält Zugholzzellen mit relativ dünnen lignifizierten Zellwandschichten, während das Holz mit einer mittleren Druckfestigkeit (Stammholz) sich aus Holzfasern zusammensetzt, deren verholzte Zellwände eine Dicke aufweisen, die zwischen jener der Astoberseite und jener der Astunterseite liegt. Die Dicke der *lignifizierten* Zellwandschichten bestimmt demnach wesentlich die axiale Druckfestigkeit des Holzes.

Bemerkenswert ist, daß die untersuchten Laubbäume das „normale“ Holz in den Ästen anatomisch so verändern können, daß die Holzfestigkeiten optimal an die dort vorhandenen Lastbedingungen angepaßt werden. Dieser effiziente Materialeinsatz spart Energie und sichert dadurch dem Baum einen evolutionären Selektionsvorteil. Umgekehrt kann der Zellwandaufbau einer beliebigen Holzfaserzelle ihre ganz spezielle mechanische Belastung widerspiegeln.

Die höheren Elastizitätsmoduln in den Astoberseiten resultieren aus den hohen Anteilen an Zellulose in den dort nachgewiesenen Zugholzzellen. In der G-Schicht ist die Zellulose in Form von Mikrofibrillen nahezu faserparallel ausgerichtet. Zellulose ist von den Hauptbestandteilen der Holzzellen das Material mit dem höchsten Elastizitätsmodul. Die faserparallele Orientierung der Mikrofibrillen ist strukturell steifer als die im Normalholz vorherrschende spiralige Anordnung.

3.5 Der Sommerbruch grüner Äste

Daß Äste trotz der bekannten Gestalt- und Festigkeitsanpassung im Sturm gelegentlich brechen, ist nicht weiter verwunderlich. Ein effizienter und gleichsam sparsamer Einsatz der begrenzten Ressourcen kann keine Sicherheit bei den „Normalbetrieb“ weit übersteigenden Belastungen gewährleisten. Der Sicherheitsfaktor von Ästen beträgt ca. 4, d. h. ein Ast versagt in der Regel erst, wenn die Spitzenlast das Vierfache der normalen Belastung übersteigt (MATTHECK 1995). Um so erstaunlicher ist der als „Sommerbruch grüner Äste“ bezeichnete Schadensfall, der vereinzelt an lebenden Ästen bei ruhigem, heißem Wetter am Spätnachmittag eintritt (SHIGO 1990) und als unvorhersehbar gilt. Nach KOLLMANN (1982) ist die Festigkeit des Holzes bei 40°C um bis zu 20% geringer als bei 20°C. Dies allein kann aber, berücksichtigt man den Sicherheitsfaktor der Äste, noch kein Versagen zur Folge haben. Aufgrund einer vorangegangenen langen Trockenperiode kann es zu einem Nachlassen der durch Quellvorgänge beeinflussten Zugholzwirkung kommen. Die Folge davon ist ein Absenken des Astes mit einer damit verbundenen Erhöhung des Längsdruckes in der Astunterseite. DIETRICH (1995), MATTHECK und BRELEUR (1993) sahen darin die Ursache für

das unerwartete Versagen, denn die um die Holzstrahlen herumgelenkten Fasern können, aufgrund der dazu notwendigen Krümmung, leicht ausknicken.

Ein Erschlaffen des Zugholzes hat zugleich Auswirkungen auf Größe und Verteilung der Schubspannungen im Ast. Nach NIKLAS (1992) können Äste auch durch Scherung versagen. Deshalb wurde an einem einfachen FE-Modell geprüft, ob dies eine weitere mögliche Ursache für den Sommerbruch ist.

In Anlehnung an die Geometrie eines von GENENZ (1997) vermessenen Pappelstarkastes wurde ein einfaches FE-Modell generiert (Abbildung 3.11). Die Modellierung beschränkte sich auf ein kurzes Aststück nahe der Basis. Dessen linkes Ende ist fest eingespannt, das rechte Ende ist mit einem Balken-Element bis zum Astschwerpunkt verlängert, wo eine Querkraft den Ast nach unten, entsprechend seinem Eigengewicht, belastet. Die Wirkung des Zugholzes wurde mittels einer vorgegebenen Temperaturverteilung (von -1°C auf der Oberseite zu 0°C in der Querschnittsmitte linear ansteigend) und eines von Null verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten in der Astoberseite simuliert. Sie wurde gerade so groß gewählt, daß sie das Gewicht des Astes kompensiert und dieser nicht absinkt. Der Zustand des vollkommen erschlafften Zugholzes wurde durch einen Rechenlauf ohne Temperaturgradienten realisiert, d.h. diese Situation entspricht einer Querkraftbiegung des Astes allein durch sein Eigengewicht. Vereinfachend wurde der Ast zweidimensional mit Vierpunktsknoten-Elementen für den ebenen Dehnungszustand modelliert. Die modellierte Ebene entspricht der vertikalen Mittelebene des Astes und ist in ihrer Ausdehnung normal zur xy-Ebene gering gegenüber dem realen Radius. Die verwendeten Materialdaten (siehe Abbildung 3.11) entsprechen Literaturwerten von grünem Pappelholz (LAVERS 1983, U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY 1987).

Die Ergebnisse (Abbildung 3.12) sind entlang der Linie A-B dargestellt, einer Position die hinreichend weit entfernt von den Rändern ist und nicht durch Einspannungseffekte beeinflusst wird.

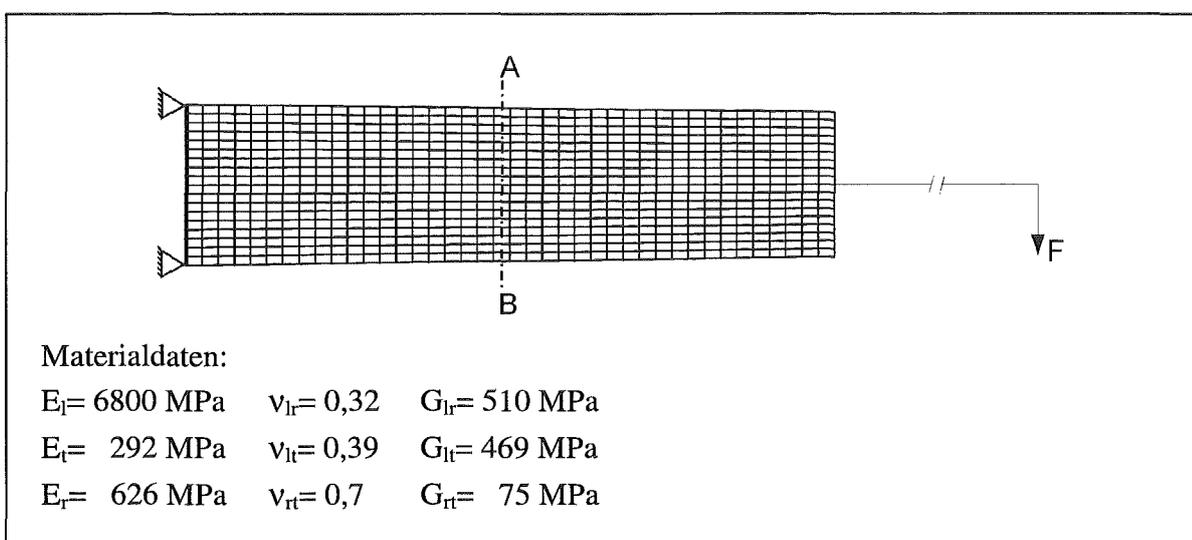


Abbildung 3.11: Astmodell mit Materialdaten.

Alle Spannungen in Abbildung 3.12 sind auf die Spannung in der oberseitigen Randfaser des Modells, im Zustand des erschlafte Zugholzes bezogen. Dieser Zustand entspricht der reinen Biegebelastung durch Eigengewicht. Im Normalfall sind die Biegespannungen mit den durch das Zugholz hervorgerufenen Spannungen überlagert, mit dem Resultat, daß auf der Astoberseite hohe Zugspannungen und in der Astunterseite reduzierte Druckspannungen auftreten. In Fällen, in denen Äste bemüht sind, sich steiler aufzurichten, können überdies Zugspannungen in der Unterseite auftreten.

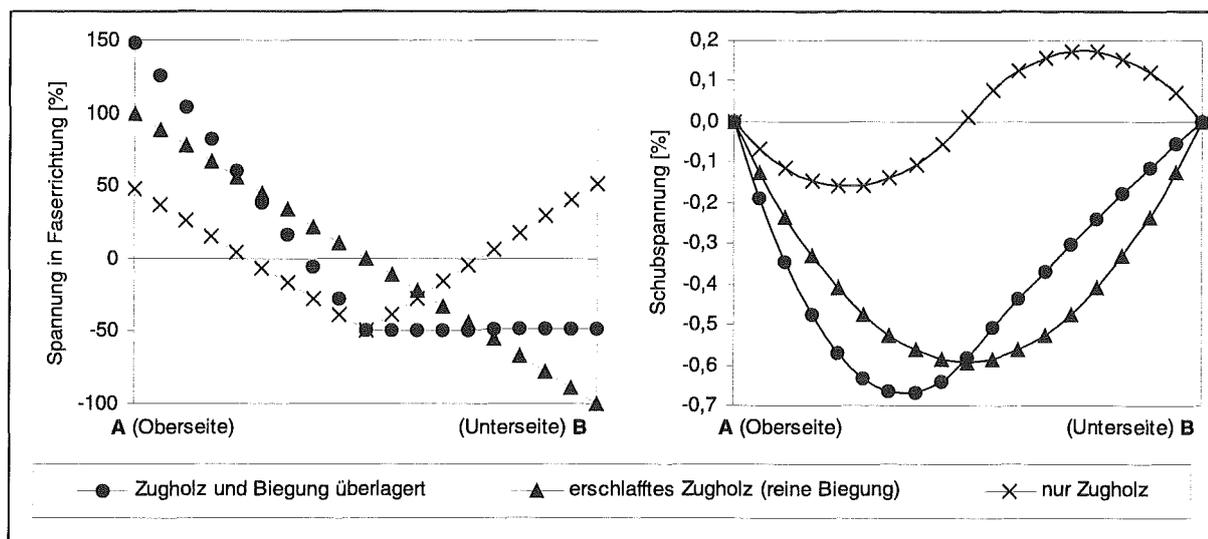


Abbildung 3.12: Spannungen in Faserrichtung und Schubspannungen zwischen den Fasern des Astmodells.

Ein Nachlassen der Zugholzwirkung reduziert das in der Astoberseite vorhandene Maximum der in horizontaler Ebene axial wirkenden Schubspannungen. Gleichzeitig werden jedoch die Schubspannungen in der Astunterseite erhöht. In diesem unteren Bereich befindet sich bei Ästen mit ausgeprägter Zugholzbildung das Mark. Dort verlaufen die Holzstrahlen nahezu parallel zur horizontalen Ebene. Damit befinden sie sich in der kritischen Schubebene und sind nicht in der Lage das Holz gegen die Scherkräfte zu verriegeln, wie sie es oberhalb und unterhalb davon vermögen. Deutlich wird der Verriegelungseffekt beim Vergleich der von GÖTZ (1998) an Pappeln gemessenen radialen und tangentialen Scherfestigkeiten in Faserrichtung. Die tangentiale Scherfestigkeit ist im Mittel um 34% größer als die radiale, was im wesentlichen aus der Verriegelung durch die Holzstrahlen resultiert.

Die Beträge der berechneten Schubspannungen belaufen sich auf weniger als 1% der belastungsinduzierten Druckspannungen. Im Vergleich dazu beträgt die radiale Scherfestigkeit der Pappeln aber 26% der Druckfestigkeit in Faserrichtung (GÖTZ 1998). Ein durch Schub ausgelöstes Versagen an gesunden Ästen kann damit erst durch die im Gegensatz zu den Spannungen in Faserrichtung sehr geringen Schubspannungen ausgeschlossen werden.

Trotz der Verwendung eines vereinfachten Modells und der Betrachtung von nur einer Astgeometrie, kann als Ergebnis der Untersuchung davon ausgegangen werden, daß der

Sommerbruch gesunder grüner Äste nicht aus reinem Schubversagen resultiert. Äste sind als lange, dünne Kraftträger ausgebildet, so daß die durch Eigengewicht bedingten Querkräfte wesentlich höhere Biegemomente als Schubspannungen bedingen. Andere Zugspannungsverteilungen in der Astoberseite üben einen Einfluß auf die Schubspannungen aus, verändern aber deren Größe und Verteilung nicht ausschlaggebend, solange sie nicht unplausibel hoch gewählt werden.

Denkbar wird ein durch nachlassende Zugholzwirkung induziertes Schubversagen in Kombination mit anderen Faktoren, wie z. B. mit der axialen Druck- und circumferentiellen Zugbelastung der astunterseitigen Holzstrahlen, deren schlafende Rißeigenschaft damit geweckt wird.

3.6 Tangentiale Biegefestigkeitsverteilungen in Astanbindungen

Astanbindungen sind geniale Lösungen des Problems, unvermeidliche Kerben so zu formen, daß keine Kerbspannungen auftreten. Sie sind gemäß dem *Axiom der konstanten Spannung* gestaltet und weisen bei bestimmungsgemäßer Belastung auf der gesamten Oberfläche eine gleichmäßige Spannungsverteilung auf (MATTHECK 1997). Die äußere Gestalt dieser Baumteile enthält keine Sollbruchstellen. Wenn sie mitunter doch versagen, so ist die Ursache in ihrer inneren Faserstruktur im Zusammenhang mit der relativ geringen Querfestigkeit von Holz zu suchen.

Im Bereich der Astbasis werden Astfasern (und Gefäße) nach unten in den Stamm umgelenkt (vgl. Modell der Astanbindung, Kapitel 2.1.3). Die Biegespannungen werden hier vom Ast in den Stamm eingeleitet. Die Zugspannungen, die in der Astoberseite distal noch nahezu gänzlich in Faserrichtung wirken, müssen aufgrund der Faseranordnung im Stamm und der Astfaserumlenkung in der Basis teilweise auch quer zu den Fasern übertragen werden. Hierdurch ist die Querzugbelastung im Holz des zentralen Bereiches der Achseln¹⁰ wesentlich höher als im umliegenden Holz. Nach KOLLMANN (1956) und NIEMZ (1993) beträgt die an kleinen fehlerfreien Proben gemessene Zugfestigkeit quer zur Faser bei vielen Gattungen nur ca. 3%-4% der Zugfestigkeit in Faserrichtung. Wie Bäume einem möglichen Versagen durch Querzugbelastung entgegenwirken, wurde in einem ersten Schritt mittels Festigkeitsmessungen untersucht.

Im Bereich der Astanbindungen wurden den untersuchten Bäumen aus den in Abbildung 3.14 skizzierten Positionen Bohrkerne entnommen. Bis auf die Kerne Nr. 3 und Nr. -3 entstammen alle Bohrkerne aus dem Kontaktbereich von Ast- und Stammfasern. Der Bohrkern Nr. 0 wurde aus dem zentralen Bereich der Achsel entnommen, die anderen Kerne unterhalb davon. Der Abstand zwischen zwei Bohrkernentnahmestellen betrug mindestens 4 cm, da der konisch zulaufende Kopf des Zuwachsbohrers beim Eindrehen Tangentialspannungen verursacht, die wiederum Längsrisse induzieren können. Beim Entnehmen des nachfolgenden

¹⁰ Anm.: Die Achseln der Bäume befinden sich zwischen Stamm und Ast auf der Oberseite.

Bohrkerns wird mit dem Abstand sichergestellt, daß dieser nicht aus dem beeinflussten Bereich stammt. Am Bohrkern wurde der erste Millimeter des Holzes unterhalb der Rinde entfernt, da dieses in der Regel auffällig weicher und weniger fest war als das darunterliegende Holz. Die folgenden 20 Millimeter Bohrkern wurden in 10 Scheiben geschnitten, im Fractometer eingespannt und bis zum Versagen belastet. Aus den Meßwerten jedes Bohrkerns wurde der Mittelwert gebildet und in einem Diagramm über dem Ort seiner Entnahme aufgetragen. Untersucht wurden die Astanbindungen von drei Eichen (*Quercus robur* L.) und einer Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.).

In Abbildung 3.13 sind die an jeweils einem Bohrkern aus dem Stamm und der Astachsel einer Eiche gemessenen tangentialen Biegefestigkeiten exemplarisch dargestellt. Die Probe Nr. 1 stammte jeweils aus dem Holz, das der Rinde am nächsten lag. Mit steigender Probennummer befand sich die Probenentnahmestelle weiter von der Rinde entfernt. Generell ist weder eine Zu- noch Abnahme der Festigkeiten zur Baummitte hin festzustellen. Die Proben der aus den Astachsen entnommenen Bohrkern sind zumeist tangential biegefestiger und haben in der Regel größere Streubreiten als die Proben aus den Stämmen. Die Materialkennwerte von Holz weisen allgemein große Streuungen auf. Dies wird bei dermaßen geringen Probenabmessungen, wie sie für die tangentialen Biegefestigkeiten verwendet werden, durch den Einfluß unterschiedlicher Festigkeiten in Früh- und Spätholz noch verstärkt.

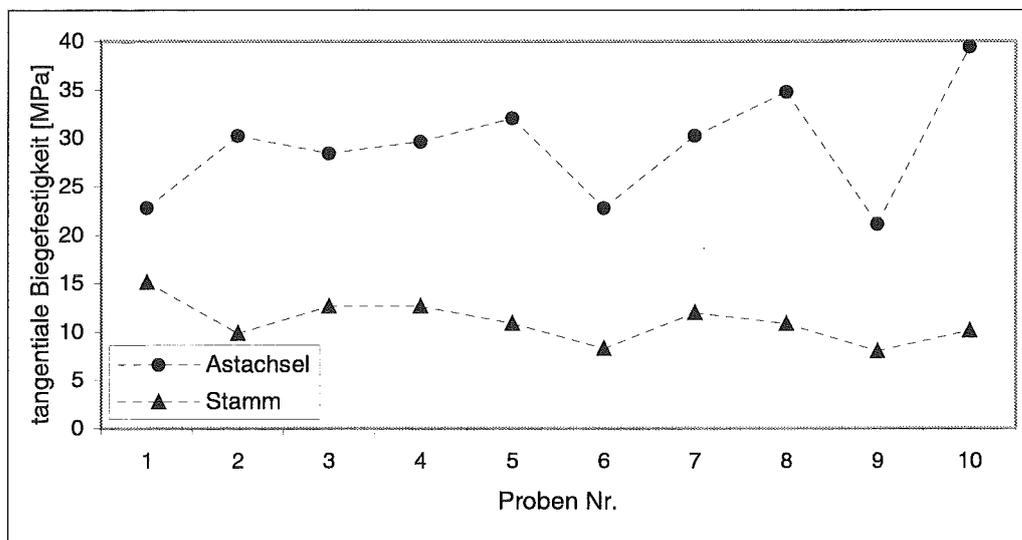


Abbildung 3.13: An jeweils einem Bohrkern aus dem Stamm und der Astachsel einer Eiche (*Quercus robur* L.) gemessene tangentiale Biegefestigkeiten.

Neben der skizzierten Astanbindung mit Probenentnahmestellen sind in Abbildung 3.14 die Verläufe der mittleren tangentialen Biegefestigkeiten entlang der Kontaktzone von Ast- und Stammfasern abgebildet. Im zentralen Bereich der Achsel weist sowohl das Holz der Buche als auch das Holz der Eichen die höchsten Festigkeiten auf. Diese sind bis zu 350% höher als die im Stamm gemessenen Festigkeiten. Zu den Seiten hin werden die Festigkeiten geringer

und entsprechen im Rahmen der natürlichen Streuung den weiter unten im Stamm gemessenen.

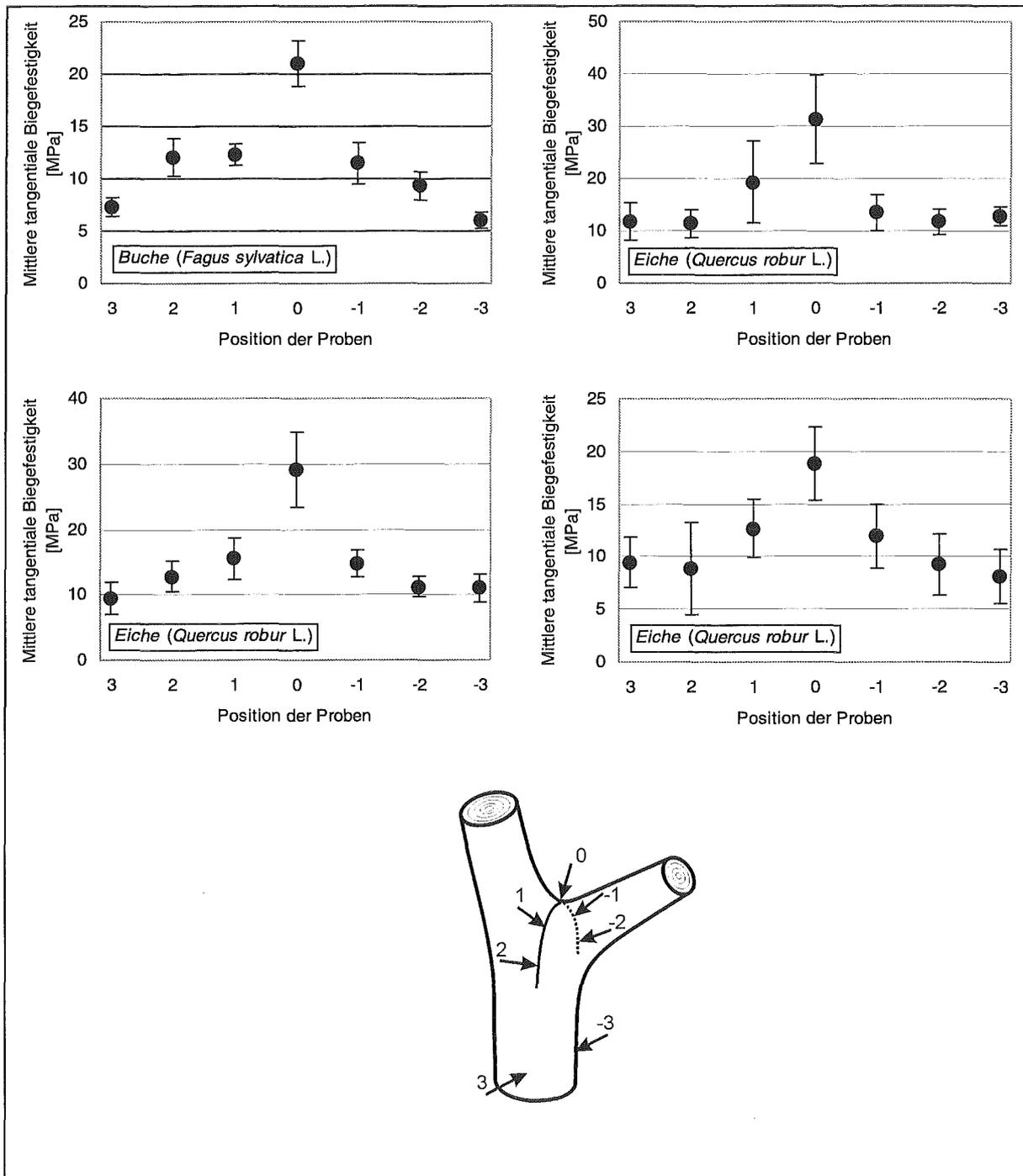


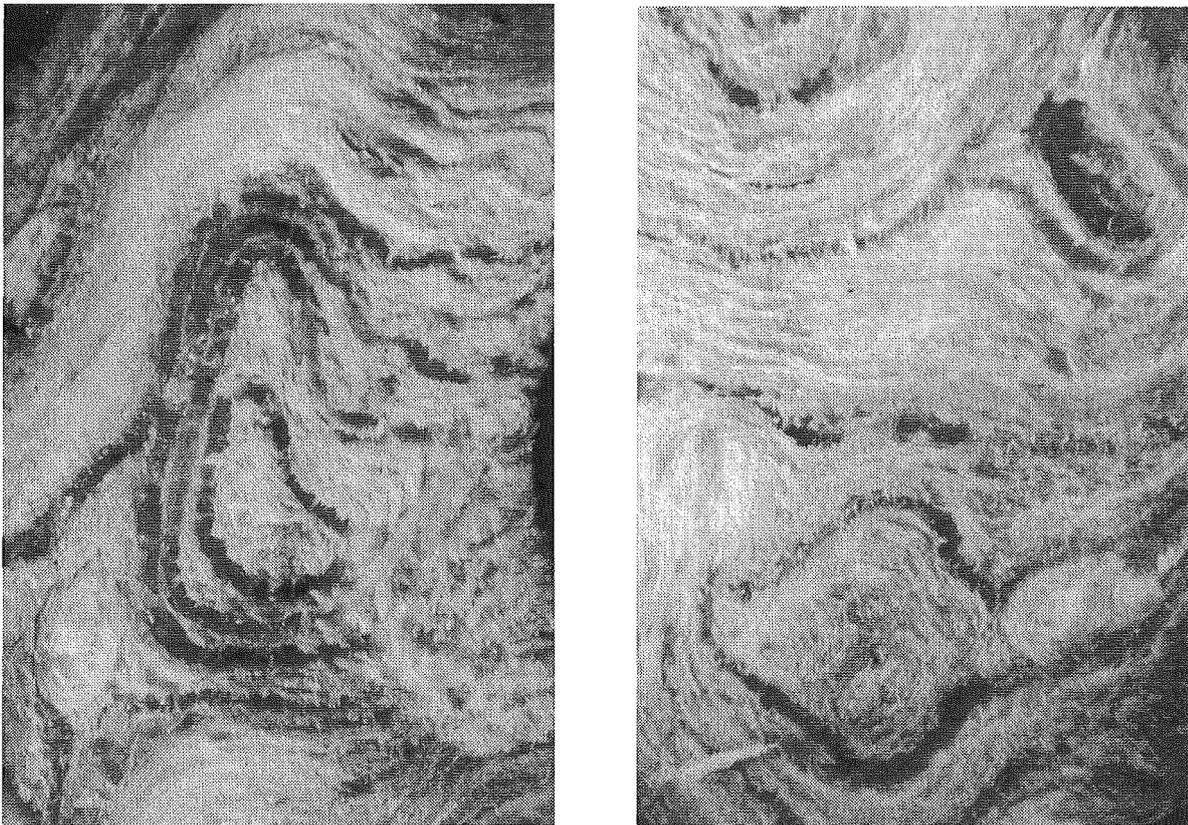
Abbildung 3.14: Mittelwerte und Standardabweichungen der tangentialen Biegefestigkeitsverläufe bei Astanbindungen in Abhängigkeit von der Meßposition.

Die Ursache für die Festigkeitsmaxima im zentralen Bereich der Astachsen wurde in der Struktur des Holzes vermutet. Die im folgenden beschriebenen holzanatomischen Untersuchungen gaben darüber Aufschluß.

Um die Faseranordnung sichtbar zu machen, wurden im Bereich der Achsel an der Position Nr. 0 Bohrkern senkrecht zur Oberfläche entnommen, in mehrere Stücke gebrochen und unter einem Auflichtmikroskop fotografiert.

In Abbildung 3.15 sind zwei Querbruchflächen eines Bohrkerns dargestellt. Beide Brüche erfolgten im Frühholz des entsprechenden Jahrrings. Die Bruchflächen sind senkrecht zum Bohrkern und somit parallel zur Oberfläche der Astanbindung orientiert. Im Unterschied zu anderen Ast- und Stammabschnitten verlaufen die Fasern, und mit ihnen auch die Leitgefäße im zentralen Bereich der Achseln sehr ungeordnet und regellos. Die Leitgefäße sind zum Teil ringförmig in sich geschlossen, an einigen Stellen treten spiralförmige Faserverläufe auf.

Zur Untersuchung der Zusammensetzung der Zellwände wurden Dünnschnitte hergestellt und in Safranin-Astrablau-Lösung (vgl. Kapitel 3.4) gefärbt. Es konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Zellwandbestandteile zwischen dem Holz aus Astachsen und aus tieferen Stammereichen gefunden werden.



*Abbildung 3.15: Bruchflächen des aus der Achsel eines Eichenastes (*Quercus robur* L.) entnommenen Bohrkerns (16-fach vergrößert). Bemerkenswert ist der unregelmäßige Verlauf der Fasern und Gefäße.*

Im Normalholz sind die Fasern in Richtung des Kraftflusses ausgerichtet. Dies kann im zentralen Bereich der Astachsen nicht erfolgen, da hierfür die neugebildeten Astfasern in das bereits vorhandene Stammholz hineinwachsen müssten. Statt dessen sind die Fasern und

Gefäße gezwungen, sich auf der Oberfläche um den Ast zu krümmen und werden entlang dem Stamm nach unten geführt. Die Wachstumsrichtung zu den Wurzeln hin ist eine biologische Notwendigkeit. Nur die Verbindung mit den Wurzeln gewährleistet eine ausreichende Versorgung des Astes mit Wasser und Nährsalzen. Die Orientierung der Fasern unterliegt in diesem Bereich folglich strengen biologischen Restriktionen. Auch der verschlungene Faserverlauf galt bisher als Produkt biologischer Erfordernisse. BÖHLMANN (1970), LEV – YADUN und ALONI (1990) sahen darin eine Trennzone zwischen Ast und Stamm, die hauptsächlich zur Hemmung der hormonellen Einflußnahme des Stammes auf den Ast dient.

Aus mechanischer Sicht ist die Trennzone mit ihrem ungeordneten Faserverlauf die Hauptursache für die gemessenen, extrem hohen Festigkeiten in den Astachseln. Das verworrene Faserarrangement bedingt quasi-isotrope Materialeigenschaften im ansonsten orthotropen Holz. Die Festigkeiten des Holzes in der tangentialen Ebene sind damit im zentralen Bereich der Astachseln nahezu richtungsunabhängig. Die Zugfestigkeit ist dementsprechend kleiner als im Normalholz mit unidirektionaler Faserausrichtung, wenn dieses in Faserrichtung belastet wird, höher jedoch als bei dessen Belastung quer zu den Fasern.

Als weitere Ursache für die Festigkeitserhöhungen kommt der beobachtete geringere Anteil an Gefäßen und damit ein höherer Anteil an Fasern im Holz dieser Bereiche in Betracht. Gefäße sind hauptsächlich für Transportfunktionen spezialisiert und erfüllen kaum Festigungsfunktionen.

Die verworrene Faseranordnung charakterisiert eine weitere erstaunliche und bis dato unbekannte Strategie der Bäume: Im Bereich der Astanbindung, wo biologische Restriktionen eine Orientierung der Fasern exakt in Kraftflußrichtung verhindern, sorgt eine lokal ungeordnete Faseranordnung für ein quasi-isotropes Materialverhalten. Damit meidet der Baum die Schwächen eines unidirektionalen Faserverbundes (geringe Festigkeiten bei Schubbelastungen zwischen den Fasern und Zugbelastungen quer zu der Faserrichtung) an Stellen, an denen er dessen Stärken (sehr hohe Festigkeiten bei Belastung in Faserrichtung) nicht nutzen kann.

Zudem wirkt die verworrene Faseranordnung als Reißstopper, da die Reißausbreitung entweder entlang der Fasern verläuft und damit häufig umgelenkt werden muß oder die Fasern bzw. das Holzstrahlparenchym durchtrennt werden müssen. Beides bedeutet hohen Energieaufwand, was man sich leicht beim schweißtreibenden Versuch, Astanbindungen an den entsprechenden Stellen zu spalten, veranschaulichen kann. Die hohe Energiedissipation beim Strecken der verschlungenen Fasern könnte auch den Effekt einer Stoßbremse bei dynamischer Belastung haben.

Im Holzbau wurde astreiches Holz vorzugsweise beim Bau von Gabelstützen eingesetzt (ZWERGER 1997). Die aus solchem Holz gefertigten Stützen waren weit weniger anfällig gegen das Absprengen einer Zinke als die aus Holz mit gleichförmigem Faserverlauf hergestellten. Zurückzuführen ist dies auf die im vorhergehenden gezeigte, höhere Querkzugfestigkeit und rißhemmende Eigenschaft des Holzes im Bereich der Astanbindungen.

3.7 Tangentiale Biegefestigkeitsverteilungen am Umfang von Zwieseln

Zwiesel haben mit Astanbindungen in mechanischem Sinne gemeinsam, daß die distal in Faserrichtung wirkenden Spannungen an der Verbindungsstelle beider Stämmlinge teilweise quer zu den Fasern übertragen werden müssen. Im Falle der Druckzwiesel mit Rindeneinschlüssen kann dies ausschließlich im Bereich der Verschweißung und der gemeinsamen Jahrringe erfolgen. Der Verlauf der tangentialen Biegefestigkeit über dem Umfang von Zwieseln wurde an jeweils acht Bohrkernen bestimmt, wobei die Proben Nr. 3 und Nr. 7 aus der Kontaktzone der Fasern beider Stämmlinge entnommen wurden. Dies entspricht dem Verschweißungsbereich vor dem Rindeneinschluß zwischen den beiden Stämmlingen.

Das neu gebildete Holz unterhalb der Rinde wurde entfernt und die folgenden 20 Millimeter pro Bohrkern wurden in 10 Scheiben geschnitten, im Fractometer eingespannt und bis zum Versagen belastet. Die Verläufe der Meßwerte entlang der Bohrkern in Richtung Baummitte ließen, analog zu den an Astgabeln gemessenen, keine einheitlich fallenden oder steigenden Tendenzen erkennen.

Aus den Meßwerten jedes Bohrkerns wurde der Mittelwert gebildet und in einem Diagramm über dem Ort seiner Entnahme aufgetragen. Gegenstand der Untersuchungen waren 2 Ahorne (*Acer campestre* L.), 2 Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und 2 Eichen (*Quercus robur* L.). In Abbildung 3.16 sind die Diagramme mit den Festigkeitsverläufen entlang der Zwieselumfänge dargestellt. Die Probenentnahmestellen sind unten im Bild an einem Buchenzwiesel im Profil und an einem Zwiesel im Querschnitt gekennzeichnet.

Die größten Festigkeiten wurden durchweg in den Verschweißungsbereichen gemessen. In den anderen Bereichen variierten die Festigkeiten von Baum zu Baum, sodaß keine Bereiche mit generell geringen Festigkeiten zu lokalisieren waren.

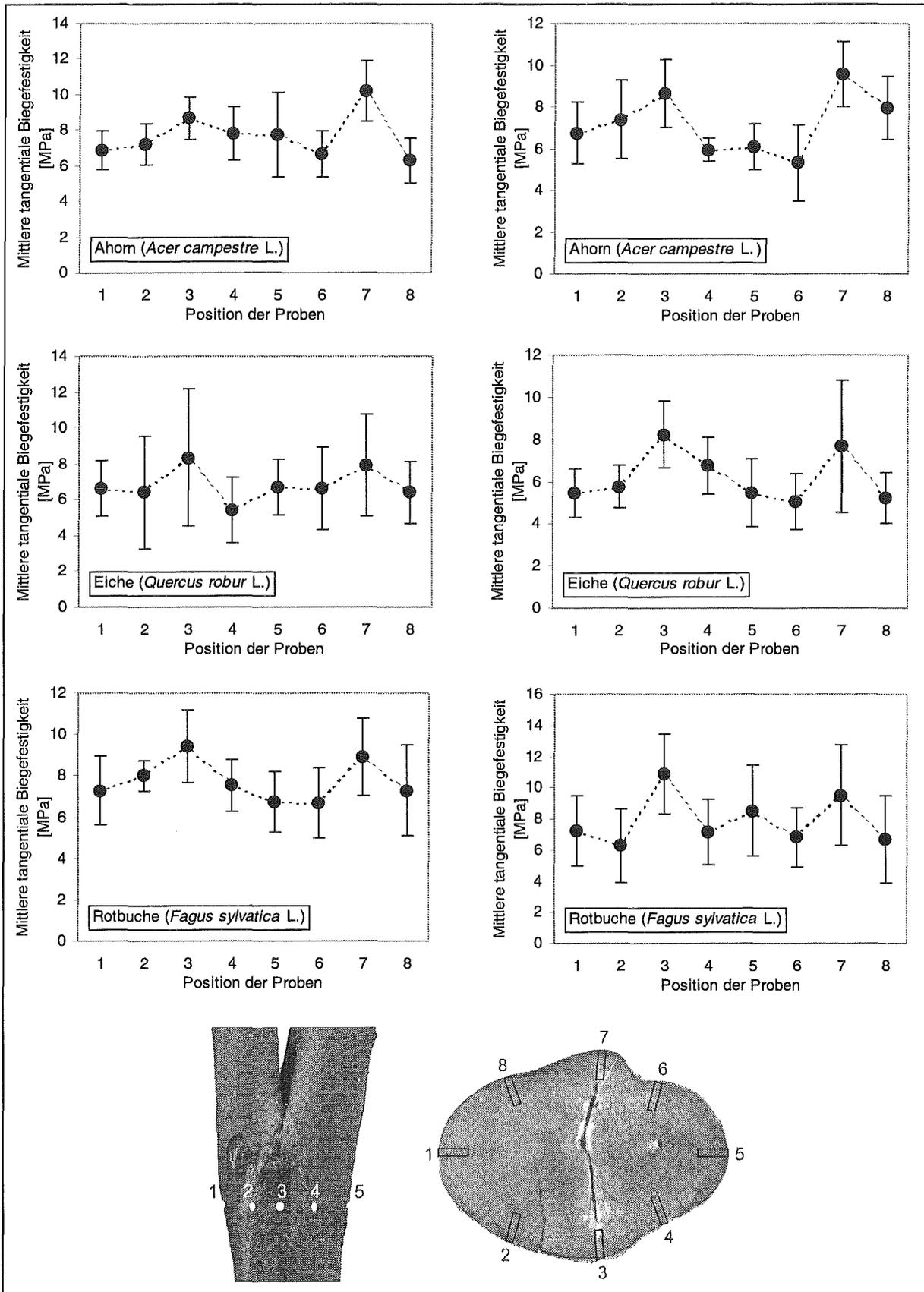


Abbildung 3.16: Mittelwerte und Standardabweichungen der tangentialen Biegefestigkeitsverläufe bei Zwieseln in Abhängigkeit von der Meßposition.

Ergänzend zu den Festigkeitsmessungen wurden mittels eines Microtoms Dünnschnitte angefertigt und unter einem Durchlichtmikroskop untersucht. Abbildung 3.17 zeigt zwei Tangentialschnitte. Der linke stammt aus dem Verschweißungsbereich (Position Nr. 3), der rechte wurde einem der Stämmlinge entnommen. Die größten Unterschiede zwischen den beiden Tangentialschnitten bestehen im Verlauf der Fasern und in der Form der Holzstrahlen. Im Verschweißungsbereich erscheinen die Fasern ungeordnet und verlaufen teilweise spiralförmig, während die Fasern im Normalholz nahezu parallel und entsprechend der Stammachse ausgerichtet sind. Hier weisen die Holzstrahlen durchweg die übliche faserparallele Spindelform auf. Im Verschweißungsgewebe variiert die Holzstrahlform in weitem Rahmen von spindel- bis nahezu kreisförmig. Bemerkenswert ist auch, daß der Holzstrahlanteil im Verschweißungsgewebe größer ist und dort weniger Leitgefäße vorzufinden sind als im Normalholz.

Bei diesen holzanatomischen Untersuchungen wurden, wie bei den Astanbindungen, anhand von Safranin-Astrablau-Färbungen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Zusammensetzung der Zellwände zwischen dem Holz aus dem Verschweißungsbereich und dem aus tieferen Stammbereichen gefunden.

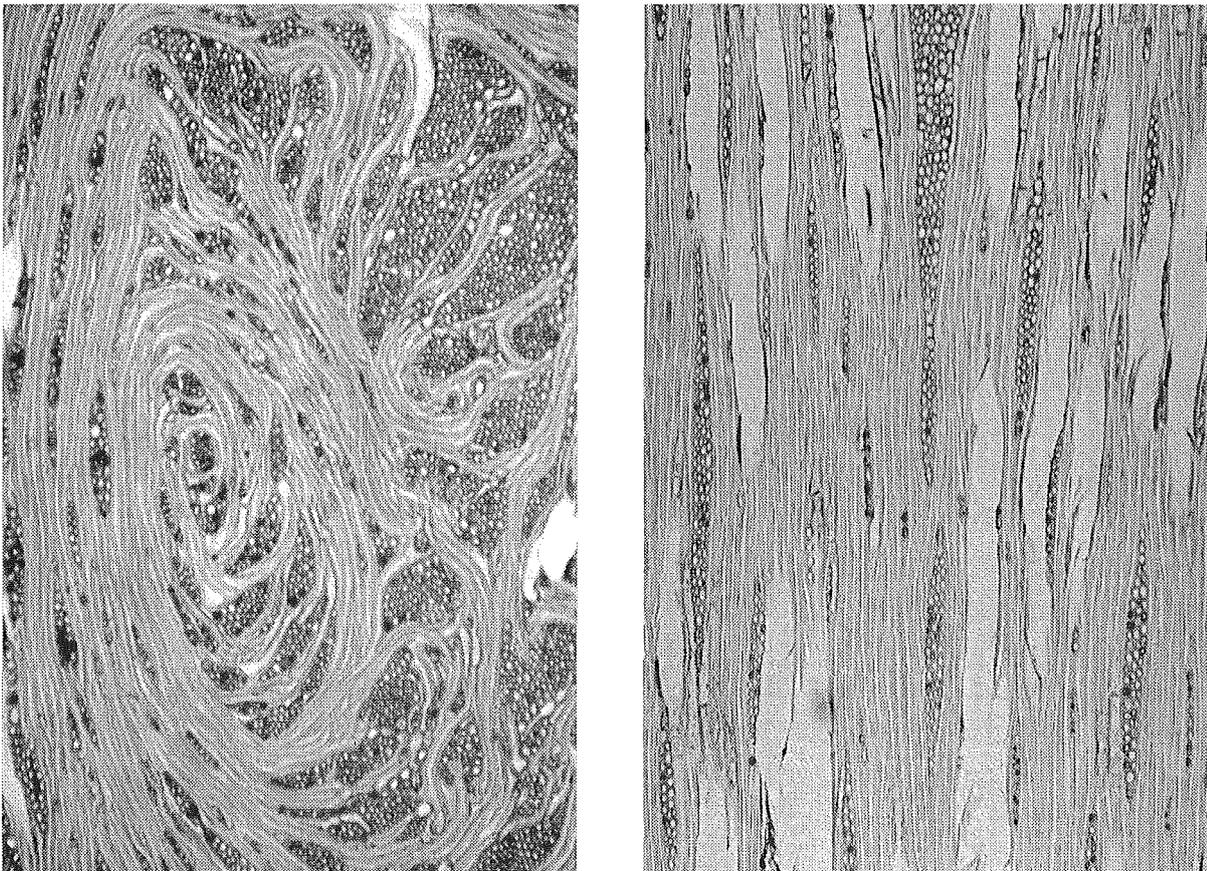


Abbildung 3.17: Tangentialschnitte aus dem Verschweißungsbereich zweier Stämmlinge (links) und dem Normalholz (rechts) eines Buchenzwiesels, 25fach vergrößert (Fotos: K. Weber).

Das Holz der beiden Verschweißungsbereiche vor dem Rindeneinschluß (Probenpositionen Nr. 3 und Nr. 7) weist höhere Festigkeiten auf als das umliegende Holz in der gleichen Horizontalebene. Die Überhöhungen betragen zwischen 11% und 80% und fallen damit kleiner aus als bei den Astanbindungen. Dies wird aber durch den Umstand relativiert, daß die maximalen Festigkeiten in der am höchsten gelegenen Position im Verschweißungsbereich der Meßebene erwartet werden, wo auch die Belastungen, analog den Astanbindungen, am größten sind. In den untersuchten Bereichen fehlt den Zwieseln die permanente mechanische Stimulation, das Holz in diesem Maße zu verfestigen, zumal Druckzwiesel aufgrund der steilen Stellung der Stämmlinge und ihrer Zuwächse überwiegend durch Querdruck im Kontaktbereich und nur zeitweilig durch Querkzug belastet werden.

Maßgeblich für die Festigkeitserhöhungen ist, analog zu den Astanbindungen, der teilweise verworrene Faserverlauf, der in den Verschweißungsbereichen vorgefunden wurde. Auch in diesen kritischen Stellen wirkt er verfestigend und als Rißstopper. Weitere Ursachen für die höheren Festigkeiten sind der geringere Gefäßanteil und die häufig vorgefundenen erhöhten Zuwachsraten, die für die Ausbildung der „Zwieselohren“ verantwortlich sind. Nach KOLLMANN (1982) steigt bei Laubbäumen mit der Zuwachsrate im Jahring der Anteil an Spätholz, dessen Festigkeit höher ist als die des Frühholzes.

3.8 Wachstumsspannungen in den Achseln der Astanbindungen

Die Wachstumsspannungen in Astanbindungen und Astgabeln wurden mittels eines Einsägeverfahrens qualitativ bestimmt. Hierzu wurden die Gabelungen vollständig aus dem Baum herausgesägt. An den beiden Zinken der Gabelung wurde jeweils eine Meßmarke angebracht und der Abstand zwischen den Marken gemessen. Die Messungen erfolgten mit den in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Setzdehnungsmessern und Meßstiften. Anschließend wurde in mehreren Etappen zwischen den Marken eingesägt und nach jedem Sägeschnitt der Abstand der Meßmarken neu bestimmt. Der Sägeschnitt wurde entlang der Rindenleiste geführt. Sie kennzeichnet äußerlich die Stelle, an der das Holz der beiden Sproßachsen aufeinandertrifft. Zwei der untersuchten Astanbindungen und Gabelungen stammen von Hainbuchen (*Carpinus betulus* L.), sieben von Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.) und zwei von Eschen (*Fraxinus excelsior* L.). Abbildung 3.18 zeigt den typischen Verlauf der Abstandsänderung beim schrittweisen Einsägen entlang der Astrindenleiste zwischen Stamm und Ast am Beispiel einer Hainbuche (*Carpinus betulus* L.). Die Hainbuche war ca. 20 Jahre alt, ihr Stammdurchmesser betrug unterhalb der Gabelung 6,5 cm. Der Sägeschnitt wurde bis zu einer Tiefe von 130 mm geführt.

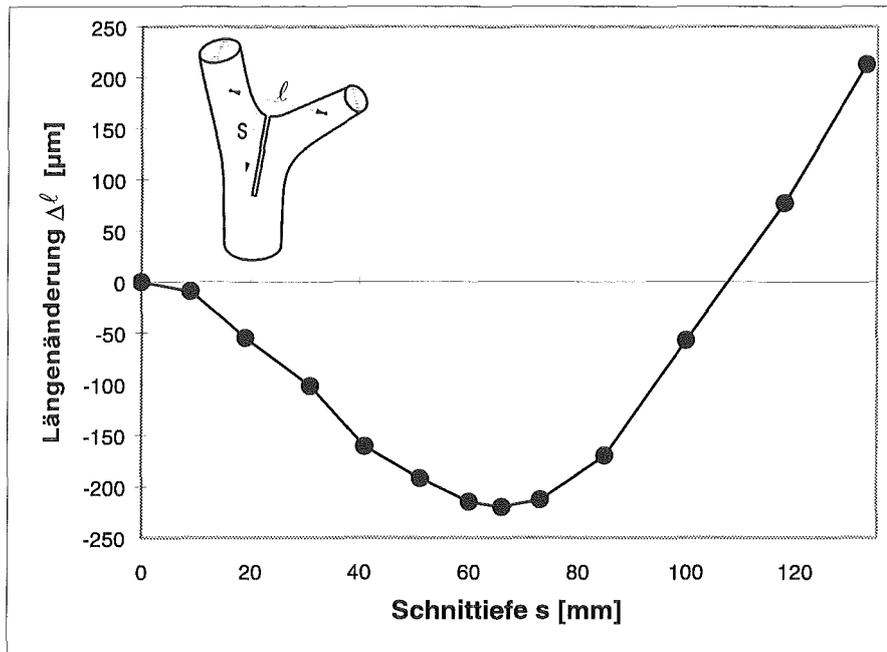


Abbildung 3.18: Gemessene Abstandsänderungen zweier Meßmarken beim schrittweisen Einsägen in die Achsel der Astgabel einer Hainbuche (*Carpinus betulus* L.).

Wie in Abbildung 3.18 ersichtlich ist, verringert sich beim Einsägen in die Astachsel zunächst der Abstand der beiden Meßmarken. Mit zunehmender Schnitttiefe durchläuft die Kurve ein Minimum und der Meßmarkenabstand wird größer. Die Längenänderungen resultieren aus dem Freischneiden der im Holz vorhandenen Wachstumsspannungen.

Aus den gemessenen Abstandsänderungen folgt, daß das oberflächennahe Holz in der Astachsel quer zum Sägeschnitt druckvorgespannt ist. Mit dem Einsägen schwindet der Druck, den das ursprünglich in der Schnittfuge befindliche Holz auf das umgebende Holz ausgeübt hat. Dieses kann sich nun ungehindert verformen und verengt die Schnittfuge und den Meßmarkenabstand.

In einiger Entfernung zur Oberfläche (in dieser Astgabel 66 mm) sind die Druckeigenstressungen soweit abgeklungen, daß ein tieferes Einsägen zu keiner weiteren Verringerung des Meßmarkenabstandes mehr führt. Statt dessen werden die Meßmarken auseinander bewegt. Die Ursache hierfür sind die Längszugspannungen im äußeren Holzmantel und Längsdruckspannungen im Holzkern des Stammes. Wird dieser Zylinder axial aufgetrennt, so biegen sich die beiden Zylinderhälften voneinander weg. Die Wirkung der in Richtung der Fasern orientierten Wachstumsspannungen ist in Kapitel 2.1.5 beschrieben.

Die oberflächennahe Druckvorspannung im Holz der Astachsels erhöht die von den Astanbindungen und Gabelungen versagensfrei ertragbare, maximale Last, indem die effektive Spannung reduziert wird. Dies ist das Resultat der Überlagerung von Druckeigenstressungen mit äußeren Lastspannungen, welche im Bereich der Astachsel vornehmlich durch Biegung bedingte Zugspannungen sind.

An fünf der sieben untersuchten Buchenastanbindungen wurden jeweils zwei gegenüberliegende Meßpunktpaare angebracht. Damit wurde geprüft, ob die Druckspannungen symmetrisch zu der von den beiden Sproßachsen aufgespannten Ebene verteilt sind. Die beim Einsägen gemessenen Abstandsänderungen sind in Abbildung 3.19 dargestellt. Alle fünf Astanbindungen befanden sich an einer 16 Jahre alten Rotbuche, deren Durchmesser unterhalb der am tiefsten gelegenen Gabelung 7 cm betrug. Der höchste Ast (Nr. 1) wies einen Durchmesser von 2,5 cm auf. Je tiefer am Stamm die Äste angelegt waren, um so größer war ihr Durchmesser. Der unterste Ast wies mit 3,5 Zentimetern den größten Durchmesser auf.

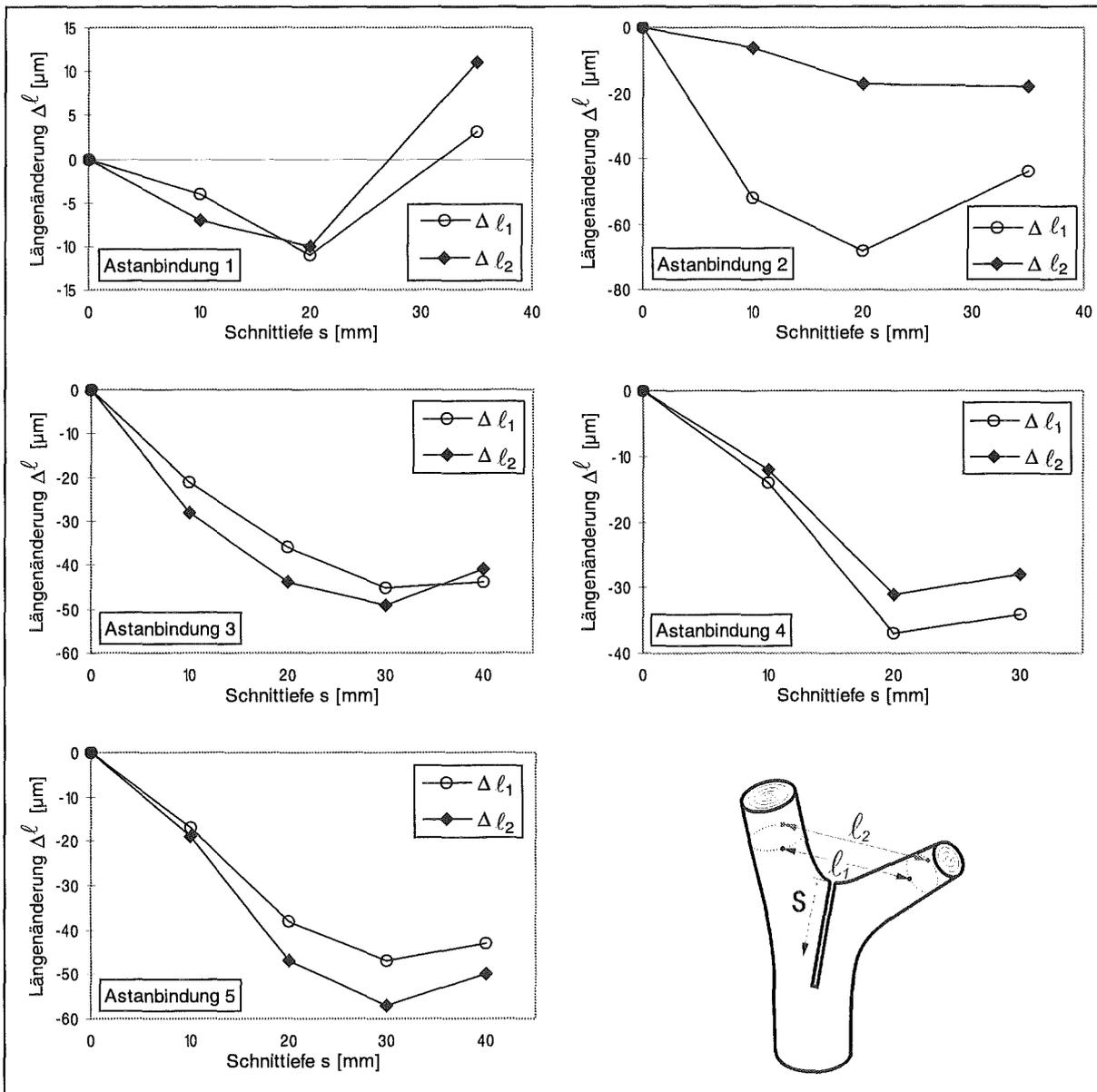


Abbildung 3.19: Beim schrittweisen Einsägen in die Achseln von fünf Astanbindungen einer Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) gemessene Abstandsänderungen jeweils zweier Meßmarkenpaare.

In vier von fünf untersuchten Astanbindungen weisen die Verläufe der gemessenen Abstandsänderungen jeweils zweier diametral angebrachter Meßpunktpaare nur geringe Unterschiede auf. Diese geringfügigen Abweichungen können aus Asymmetrien in der Gestalt der Anbindung bzw. aus einem nicht ganz waagrecht ausgeführten Sägeschnitt resultieren. Die Astanbindung 2 hingegen zeigt deutliche Unterschiede im Verlauf der beiden Kurven. Die Längenänderungen einer Seite übertreffen die der anderen Seite um mehr als das Vierfache.

Ein Vergleich der Gestalt der betreffenden Astanbindung mit den anderen zeigte keine signifikanten Unterschiede. Anders geartete Belastungen scheiden ebenfalls als Ursache der differentiellen Entwicklung der Wachstumsspannungen aus. Ein möglicher Grund ist die ungleiche Verteilung der Wachstumsspannungen in dieser Astanbindung. Dieses könnte aus einer phototrop gesteuerten Neuausrichtung des Astes resultieren. Bäume sind zu beachtlichen Wachstumsleistungen und Selbstverbiegungen fähig, um an bessere Lichtverhältnisse zu gelangen. Diese lichtgesteuerte Neuorientierung von Baumorganen wird durch gerichtete Wachstumsspannungen bewirkt.

Die in den Abbildungen 3.18 und 3.19 dargestellten Verläufe der Abstandsänderungen sind nur für grünes Holz charakteristisch. Mit dem Trocknungsvorgang werden Wachstumsspannungen abgebaut bzw. mit Trocknungsspannungen, die um Größenordnungen höher sein können, überlagert. An einer ca. 4 Wochen gelagerten Probe vorgenommene Vergleichsmessungen wiesen bereits im ersten Bereich trockenungsbedingte Zugvorspannungen auf.

3.9 Wachstumsspannungen in Zwieseln

Zur Bestimmung der Verteilung der Wachstumsspannungen in der radial-tangentialen Ebene von Zwieseln wurden aus diesen 3-5 cm starke Querschnittsscheiben gesägt. An den Zwieselscheiben wurden, ausgehend vom Scheibenrand, entlang der eingewachsenen Rinde bis zum gegenüberliegenden Scheibenrand die Spannungen qualitativ ermittelt. Dies erfolgte an den verschiedenen Meßstellen durch das Bohren eines Loches und Messen der dabei auftretenden Dehnungen. Die Längenänderungen wurden mittels eines auf die Scheiben aufgeklebten Dehnungsaufnehmers bestimmt. Der Abstand zwischen den beiden Meßspitzen betrug 30,5 mm. Dazwischen wurde zentrisch das Bohrloch mit einem Durchmesser von 12 mm eingebracht.

Im Bereich des Rindeneinschlusses wurden die Dehnungen quer zur eingeschlossenen Rinde ermittelt. Nahe am Umfang der Scheiben wurden die Dehnungen parallel zu den Jahrringen bestimmt. Die auf die jeweilige Scheibe bezogene Richtung der gemessenen Dehnungen ist damit an allen Bohrlöchern näherungsweise gleich. Legt man für jede Bohrung lokal das für Holz übliche zylindrische Koordinatensystem zugrunde, so unterscheidet sich die lokale Richtung der ermittelten Dehnungen für die verschiedenen Bohrlöcher. Im Bereich der Scheibenränder liegt die Orientierung der gemessenen Dehnungen parallel zu den Jahrringen und senkrecht zu den Holzstrahlen und entspricht damit der Tangentialrichtung. Im mittleren Bereich des Rindeneinschlusses verlaufen die Holzstrahlen parallel zu den ermittelten

Längenänderungen und die Jahrringe stehen senkrecht dazu. Dies entspricht der radialen Richtung.

An einigen Meßstellen wurde die Bohrung stufenweise vorangetrieben. Nach jedem Schritt erfolgte eine Messung der aufgetretenen Längenänderungen. Deren Verlauf ist exemplarisch für ein Bohrloch im zentralen Bereich des Rindeneinschlusses und für ein weiteres Bohrloch zwischen Rindeneinschluß und Scheibenrand in Abbildung 3.20 dargestellt.

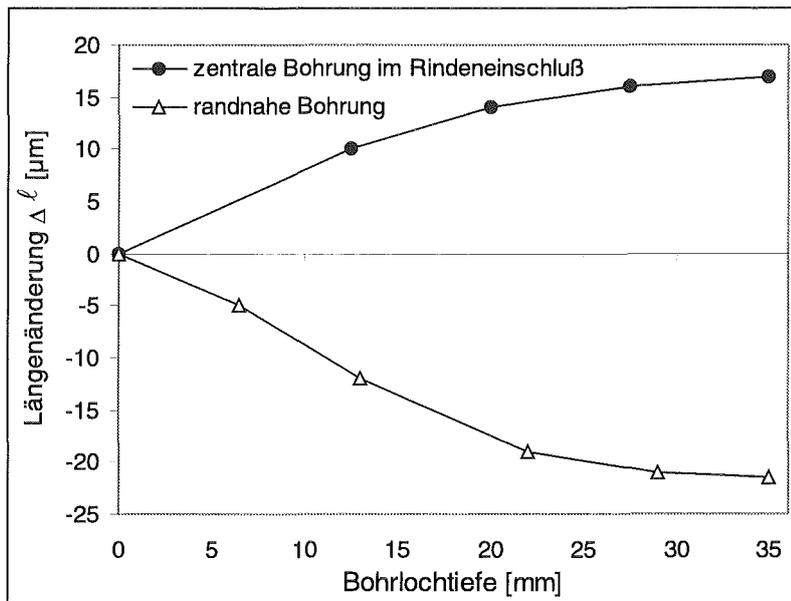


Abbildung 3.20: Verlauf der gemessenen Längenänderungen beim stufenweisen Bohren einer Querschnittsscheibe mit Rindeneinschluß.

Mit zunehmender Bohrlochtiefe werden die Dehnungen größer; beim Durchbohren der Scheibe werden die größten Längenänderungen gemessen. Aus dem Verlauf der gemessenen Längenänderungen ist ersichtlich, daß bereits bei Bohrlochtiefen von 20 mm eine Freisetzung von über 80% der Gesamtdehnungen erfolgt.

In Abbildung 3.21 ist eine Querschnittsscheibe aus einem 69 Jahre altem Rotbuchenwiesel (*Fagus sylvatica* L.) dargestellt. Die Verschweißung der beiden Stämmlinge erfolgte an dieser Stelle 21 bzw. 23 Jahre vor dem Fällen des Baumes. Der Stammdurchmesser der Buche betrug unterhalb der Gabelung ca. 30 cm. Die eingeschlossene Rinde befindet sich im zentralen Bereich des Querschnittes. Die Richtungen der an den Bohrlochern gemessenen Dehnungen werden durch die Pfeile angezeigt. Im Diagramm ist die jeweilige Längenänderung aufgetragen.

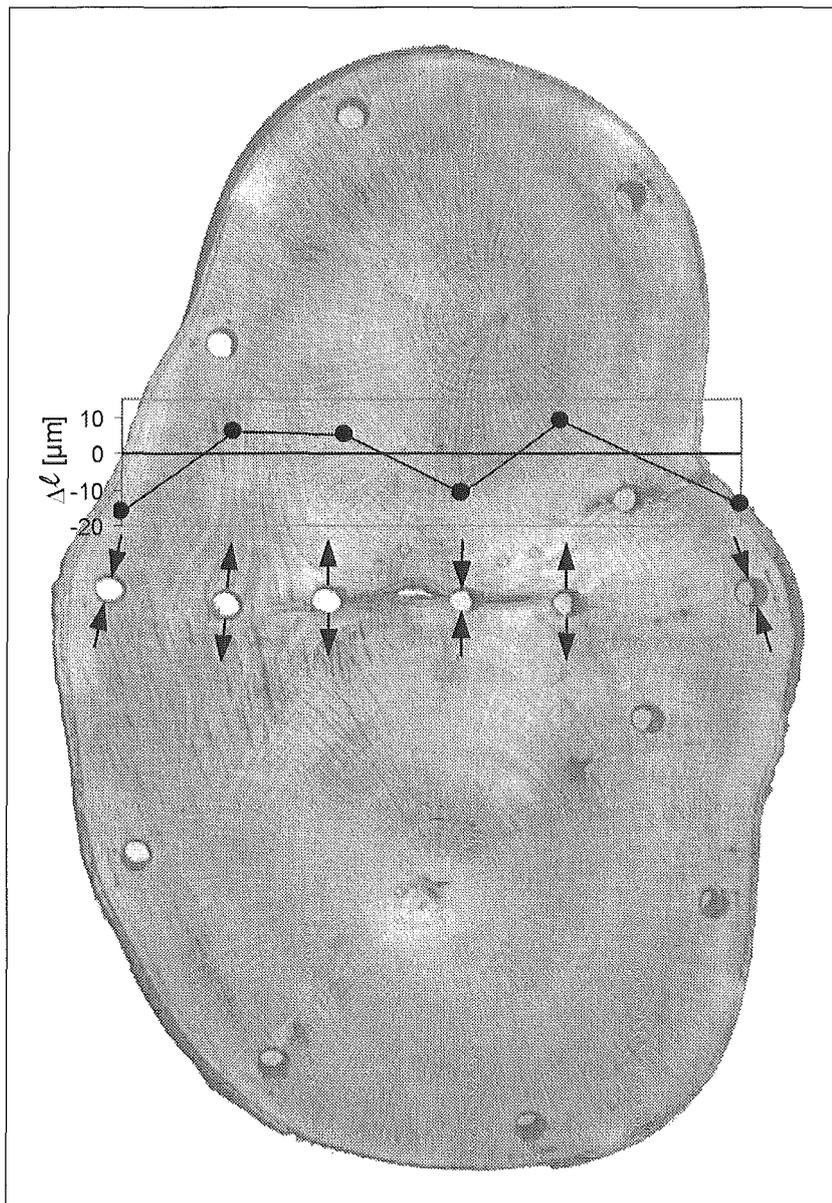


Abbildung 3.21: Querschnittsscheibe aus einem Buchenzwiesel (*Fagus sylvatica* L.). Die Pfeile zeigen die Richtung der nach dem Bohren gemessenen Dehnungen an, im Diagramm ist die Größe der jeweiligen Längenänderung aufgetragen.

Im zentralen Bereich der eingeschlossenen Rinde wird der Abstand zwischen den Meßmarken nach dem Bohren der Löcher kleiner. In diesem Bereich herrschen Druckspannungen vor. Die Rinde zwischen den Stämmlingen wirkt wie ein Reiß, so daß dort kein Zug übertragen werden kann. In den beiden Verschweißungsbereichen des Zwiesels, seitlich am Rindeneinschluß, werden die Meßmarken nach dem Bohren auseinandergezogen. Der Meßmarkenabstand wird größer. Dies ist ein Indiz für eine Zugvorspannung im Holz dieser Bereiche. Nahe am Scheibenrand, zu beiden Seiten des Rindeneinschlusses, herrschen wieder Druckspannungen vor.

In einer weiteren Studie wurden entlang des Umfangs der Scheibe Messungen durchgeführt. Die ermittelten Längenänderungen zeigten, daß das Holz im Bereich des gesamten Umfangs tangential druckvorgespannt ist. Dies trifft auf die weiteren, nicht explizit beschriebenen Meßstellen am Umfang der folgenden Querschnittsscheiben ebenfalls zu.

Abbildung 3.22 zeigt die aus einer Buche (*Fagus sylvatica* L.) mit kräftigem Steilast gefertigte Scheibe und die durch das Lochbohren verursachten Abstandsänderungen. Das Alter der Buche betrug 45 Jahre. Stamm und Ast hatten im untersuchten Bereich 27 bzw. 28 gemeinsame Jahrringe gebildet. Zwischen dem Buchenstamm und dem Steilast befindet sich eingewachsene Rinde. Der Querschnitt ist den aus Zwieseln gewonnenen Schnitten ähnlich, lediglich der Größenunterschied zwischen Stamm und Ast ist deutlicher ausgeprägt.

Die beiden großen, offenen und mehrere kleine, geschlossene Risse entstanden nach den Messungen bei der Trocknung des Holzes. Das Holz schwindet in tangentialer Richtung ca. 2-fach höher als in radialer Richtung und induziert damit Zugspannungen, die quer zu den Fasern und den Holzstrahlen wirken. Bei Zugbelastung quer zur Faser- und Holzstrahlrichtung sind die Holzstrahlen Ausgangspunkte für Längsrisse. Dies wird am Verlauf der Risse entlang der Holzstrahlen, in der radial-longitudinalen Ebene deutlich.

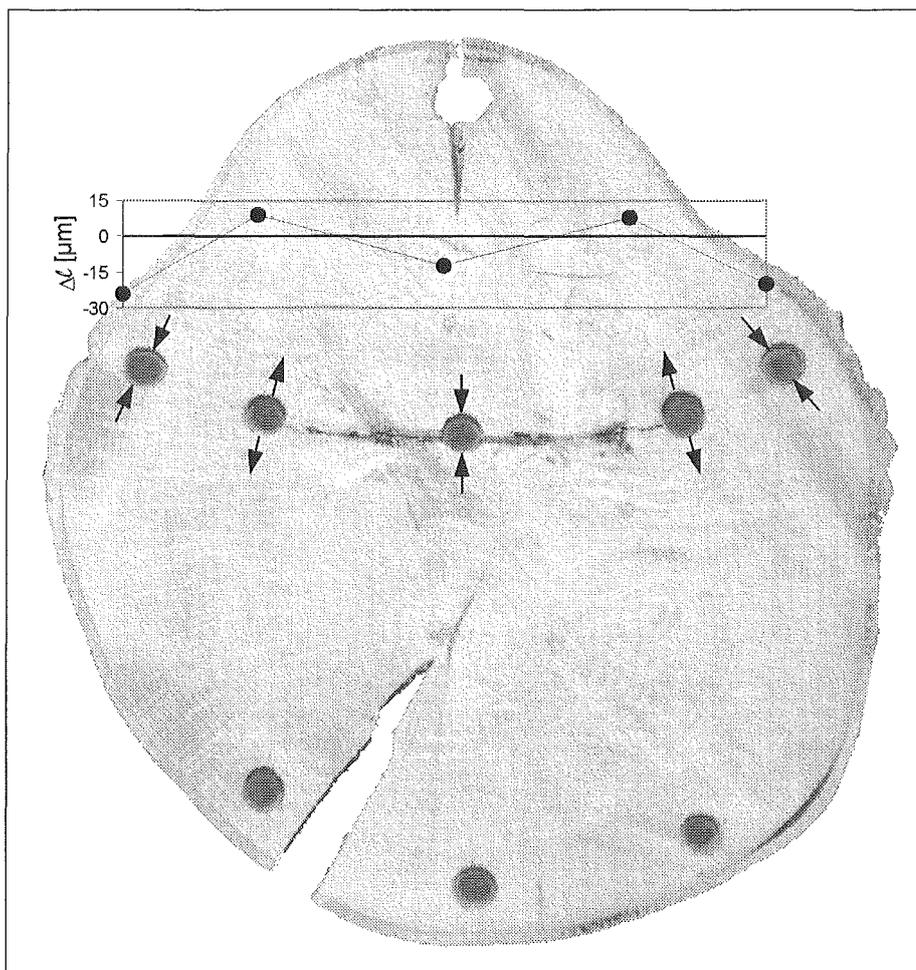


Abbildung 3.22: Querschnittsscheibe aus einer Buche mit Steilast (*Fagus sylvatica* L.). Die Pfeile zeigen die Richtung der nach dem Bohren gemessenen Dehnungen an, im Diagramm ist die Größe der jeweiligen Längenänderung aufgetragen.

Der Verlauf der Dehnungen im Bereich zwischen Stamm und Steilast und den gemeinsamen Jahrringen entspricht den an Zwieseln gemessenen. Am Scheibenumfang und im mittleren Bereich der eingeschlossenen Rinde steht das Holz unter Druckspannungen. In den Bereichen dazwischen, an den Verschweißungen seitlich des Rindeneinschlusses, treten Zugspannungen auf.

Zum Vergleich mit den Querschnittsscheiben mit eingeschlossener Rinde wurde eine Scheibe ohne Rindeneinschluß (Abbildung 3.23) untersucht. Diese entstammt dem gleichen Buchen-zwiesel wie die in Abbildung 3.21 gezeigte Scheibe. Sie wurde an einer tieferen Position in der Gabelung entnommen, an einer Stelle, an der noch keine Rinde eingewachsen war. Die Messungen erfolgten in einer gekrümmten Linie entlang des Kontaktbereiches der beiden Stämmlinge.

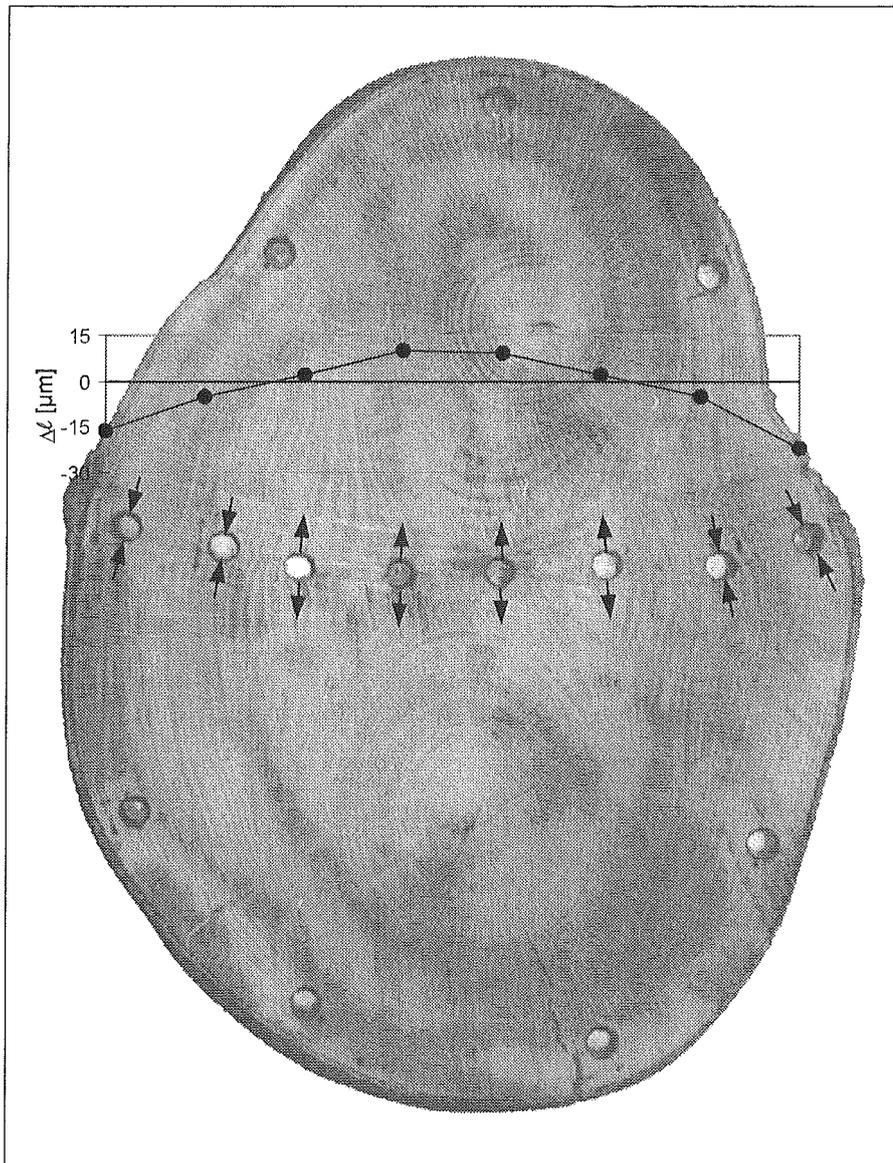


Abbildung 3.23: Querschnittsscheibe ohne Rindeneinschluß aus einem Buchenzwiesel (*Fagus sylvatica* L.). Die Pfeile zeigen die Richtung der nach dem Bohren gemessenen Dehnungen an, im Diagramm ist die Größe der jeweiligen Längenänderung aufgetragen.

Entlang dem Kontaktbereich der beiden Stämmlinge wechseln die Wachstumsspannungen von Druck am Scheibenrand über Zug in der Scheibenmitte wieder zu Druck am gegenüberliegenden Scheibenrand. Der augenfällige Unterschied besteht darin, daß in Zwieseln mit Rindeneinschluß dieser im mittleren Bereich unter Druckvorspannung steht, während an den Zwieseln ohne Rindeneinschluß die gleiche Stelle zugvorspannt ist.

Bei Zwieseln mit Rindeneinschlüssen stellt die Zugvorspannung im Restligament, nahe der eingeschlossenen Rinde eine Gefährdung für den Zwiesel dar. Sie wird mit aufgebrachten Lastzugspannungen überlagert und erhöht die effektive Spannung.

Die Druckeigenstressungen am Umfang der Zwiesel schützen das oberflächennahe Holz vor Versagen. Insbesondere wirken sie der Reißinitiierung durch Holzstrahlen („schlafende Risse“) entgegen, die durch ihre Spindelform bei Quersugbelastung Risse zwischen den umgebenden Fasern auslösen können. Werden die Stämmlinge z. B. durch Schwingen im Wind auseinandergebogen, so überträgt der Restquerschnitt zwischen Umfang und Rindeneinschluß die ganze Zugbelastung. Diese wird durch die Druckeigenstressungen am Umfang reduziert, so daß dort ein Versagen durch Zug später als im Inneren einsetzt und bei nachlassender Belastung gegebenenfalls ausbleibt. Für den Baum sind das Kambium und die am Wasser- und Nährstofftransport beteiligten Zellen nahe der Oberfläche für das Überleben wichtiger als das darunterliegende, weitgehend abgestorbene Holz. Damit sind die Zugvorspannungen im Inneren ein notwendiges Übel, um die Druckspannungen am Umfang aufrecht erhalten zu können. Eigenstressungszustände müssen stets die Bedingungen für ein Kräfte- und Momentengleichgewicht erfüllen, so daß die peripheren Druckspannungen einen Ausgleich durch im Bauminneren befindliche Zugspannungen erfordern.

Die peripheren Druckvorspannungen beugen in besonderem Maße auch dem Versagen durch „Schranttürklappen“ vor, indem die äußeren, tangentialen Druckeigenstressungen am längeren Radialhebel angreifen als die innen plazierte Zugeigenstressungen. So kann einem einseitigen, „schranttürartigen“ Zwieselbruch unter Umständen noch begegnet werden. Dieser Versagensfall kann eintreten, wenn der Wind senkrecht zur Gabel weht und ein Stämmling beim Schwingen aus der Gabelebene herausgebogen oder -gedreht wird (MATTHECK und BRELOER 1994). Dann wird eine Verschweißung auf Querdruck und die andere auf Quersug beansprucht, wobei die größten Spannungen außen im Holz wirken. An dieser gefährdeten Stelle werden die effektiven Quersugspannungen durch die Überlagerung von Last- und Wachstumsspannungen gemindert.

Werden die Stämmlinge zusammengedrückt, stellt die Addition der Lastdruckspannungen mit den Druckeigenstressungen am Umfang keine Gefährdung für das Holz an diesen Stellen dar. Die Lastdruckspannungen wirken nicht nur im Restquerschnitt, sondern werden auch vom Rindeneinschluß mit übertragen.

Eine Modifikation der im vorhergehenden angewandten Lochbohrmethode ermöglichte an einigen Meßstellen eine quantitative Abschätzung der Wachstumsspannungen. Dazu wurden vier Meßstifte im Winkel von jeweils 90° auf einem Kreis mit einem Durchmesser von 35,5 mm angebracht und zentrisch ein Loch mit 12 mm Durchmesser gebohrt. Die Längenänderungen wurden mittels eines Setzdehnungsaufnehmers ermittelt, welcher vor und nach dem Bohren auf die halbkugelförmigen Köpfe der Meßstifte aufgesetzt wurde.

In Abbildung 3.24 ist eine Querschnittsscheibe aus einem 70 Jahre alten Rotbuchenzwiesel (*Fagus sylvatica* L.) dargestellt. Die Verschweißung der beiden Stämmlinge erfolgte an dieser Stelle 37 bzw. 38 Jahre vor dem Fällen des Baumes. Der Stammdurchmesser der Buche betrug unterhalb der Gabelung ca. 30 cm. Die Richtungen der gemessenen Dehnungen

werden durch die Pfeile angezeigt. Die Zahlen an den Pfeilen beziffern die Größe der gemessenen Abstandsänderungen in Micrometern. An den Bohrungen Nr. 1, 2 und 5 wurden die Dehnungen wie oben beschrieben in zwei Richtungen ermittelt. An den anderen Bohrungen war aufgrund der eingeschlossenen Rinde, bzw. geringem Abstand zum Scheibenrand, die Bestimmung der Dehnungen in nur einer Richtung möglich. Im Diagramm sind, analog zu den Abbildungen 3.21 bis 3.23, die quer zur eingeschlossenen Rinde bzw. parallel zu den Jahrringen ermittelten Längenänderungen aufgetragen.

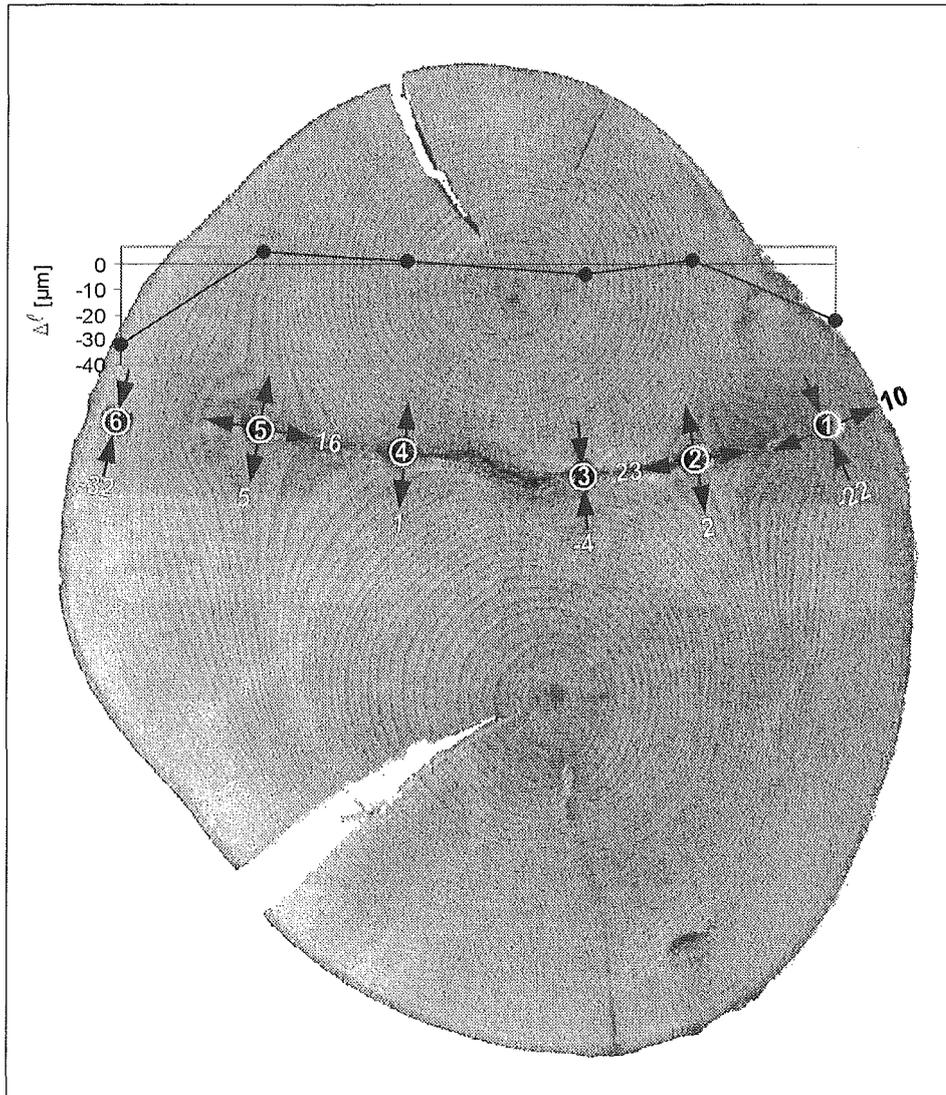


Abbildung 3.24: Querschnittsscheibe aus einem Buchenzwiesel (*Fagus sylvatica* L.). Die Pfeile zeigen die Richtungen der gemessenen Dehnungen an. Die Bohrungsnummern sind eingekreist, neben den Pfeilen ist die Größe der jeweiligen Längenänderung in μm angegeben.

Die mit der Bohrlochmethode an Querschnittsscheiben quantitativ bestimmten Spannungen sind Näherungswerte, da nicht alle Voraussetzungen für eine präzise Spannungsermittlung erfüllt werden können. Den Auswerteformalismen der Bohrlochmethode liegt der Spannungs-

zustand in der Umgebung eines Loches in einer unendlich ausgedehnten Platte mit isotropen Materialeigenschaften zugrunde. Im vorliegenden Fall bedingt die Nähe der Scheibenränder bzw. der eingeschlossenen Rinde zu den Bohrlöchern Abweichungen von diesem theoretischen Spannungszustand. Abweichungen ergeben sich auch durch die orthotropen Materialeigenschaften des Holzes. Der Elastizitätsmodul europäischer Laubhölzer ist in radialer Richtung im Mittel zweifach höher als der in tangentialer Richtung. Die entsprechenden Poissonzahlen sind ebenfalls unterschiedlich.

Nach ASHBEE (1989) und LAVERS (1983) beträgt der Elastizitätsmodul von Buchenholz in radialer Richtung $E_r=1600$ MPa und in tangentialer Richtung $E_t=820$ MPa. Die entsprechenden Poissonzahlen betragen $\nu_{rt}=0,75$ und $\nu_{tr}=0,36$. Für die Spannungsberechnung mit den in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Gleichungen wurden die Mittelwerte dieser Materialdaten gebildet und damit vereinfachend transversale Isotropie zugrundegelegt. Mit einem mittleren Elastizitätsmodul von 1210 N/mm² und einer mittleren Poissonzahl von $0,55$ lassen sich aus den gemessenen Längenänderungen folgende Eigenspannungswerte errechnen:

Das Holz im Bereich der Bohrung Nr. 1 steht in tangentialer Richtung mit $-2,4$ MPa unter Druckvorspannung und ist in radialer Richtung, senkrecht zur äußeren Rinde, am Umfang mit $0,1$ MPa geringfügig zugvorgespannt.

Das Holz im Bereich der Bohrung Nr. 2 steht in tangentialer Richtung, senkrecht zum Rindeneinschluß, mit $1,6$ MPa unter Zugvorspannung und ist in radialer Richtung mit $3,2$ MPa zugvorgespannt.

Das Holz im Bereich der Bohrung Nr. 5 steht in tangentialer Richtung, senkrecht zum Rindeneinschluß, mit $1,6$ MPa unter Zugvorspannung und ist in radialer Richtung mit $2,4$ MPa zugvorgespannt.

Sowohl die errechneten tangentialen als auch die radialen Wachstumsspannungen entsprechen in ihrer Größenordnung den Literaturwerten (ARCHER 1986) für gerade, ungestörte Stammbereiche.

3.10 Wachstumsspannungen im Wundholz

Im Bereich von überwallten Verwundungen stellt die Grenzfläche zwischen dem Kallusgewebe und dem darunterliegenden Holz, analog dem Rindeneinschluß in Zwieseln, eine Störung im Holzkörper dar, die vom neugebildeten Holz umwachsen wird. Es ist nicht bekannt, ob und in welchem Maße das Kallusgewebe Wachstumsspannungen generiert; zu Eigenspannungen im Wundholz von Bäumen finden sich in der Literatur keine Angaben.

Abbildung 3.25 zeigt den Querschnitt einer 67-jährigen Buche mit im 51. Lebensjahr zugefügten, teilweise überwallten Verletzungen. Der Baum hatte die Verwundung gut überstanden und das Gewebe abgeschottet. Lediglich 5 Jahrringe weisen lokal durch eine Verfärbung auf Pilzbefall hin. Die Wachstumsspannungen wurden mittels der Lochbohrmethode mit aufgeklemmtem Dehnungsmesser qualitativ untersucht. Die Messungen der durch das Bohren bedingten Längenänderungen erfolgten quer zu den Kontaktstellen

zwischen überwalltem und überwallendem Holz. Der radiale Riß entstand nach den Messungen durch Trocknung.

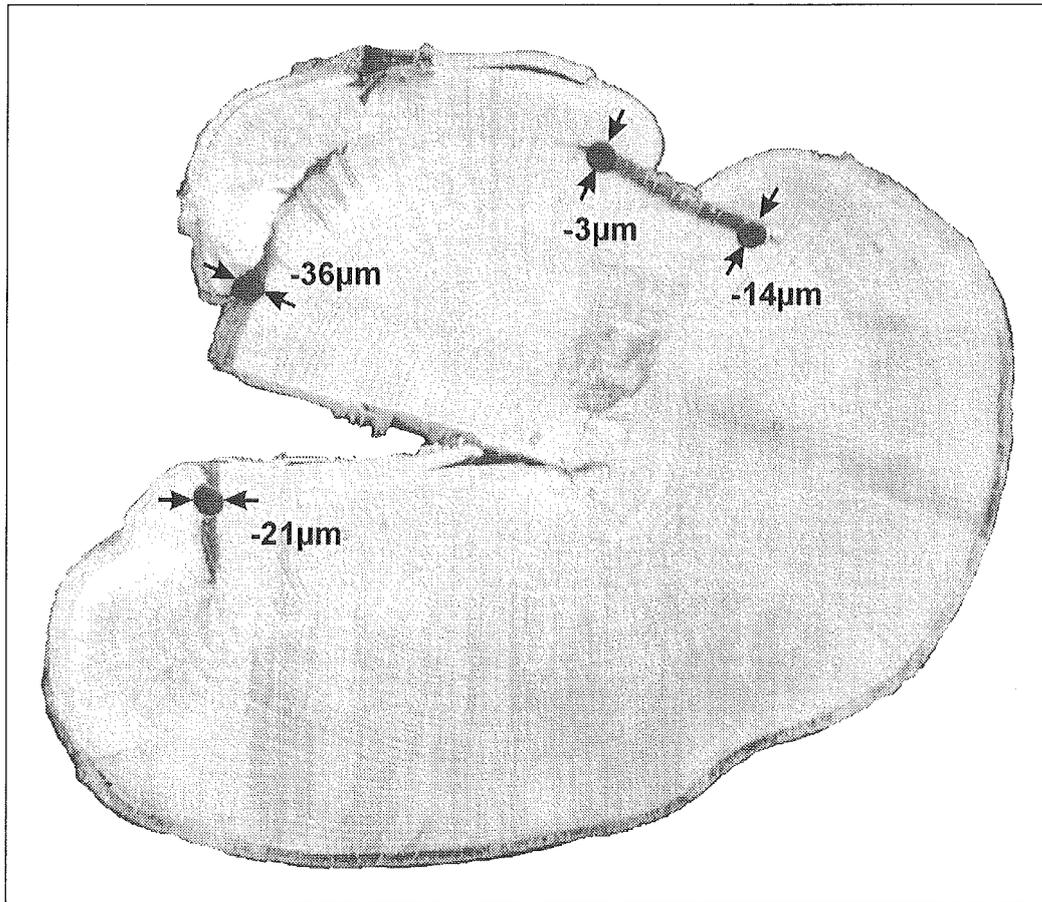


Abbildung 3.25: Buchenstamm mit teilweise überwallten Verletzungen. Die Pfeile zeigen in Richtung der durch das Bohren ausgelösten Dehnungen, der Zahlenwert gibt die jeweilige Abstandsänderung der Meßstellen an.

Nach dem Bohren verringerten sich die Abstände der Meßmarken an allen vier Bohrlöchern. Dies ist ein Indiz dafür, daß das Kallusgewebe gegen die Wunde gedrückt wird. Die Beträge der gemessenen Abstandsänderungen sind mit $-36\ \mu\text{m}$ bzw. mit $-24\ \mu\text{m}$ nahe den Rändern des Kallusgewebes, was dem jüngeren Holz entspricht, größer als im bereits länger überwalltem Holz ($-14\ \mu\text{m}$ bzw. $-3\ \mu\text{m}$). Voraussichtlich resultiert dies aus einem höheren Anpreßdruck an den Rändern des Kallusgewebes, der entlang der Kontaktfläche nach innen zu abnimmt. Im Bereich des miteinander verwachsenen Holzes sind aus Gleichgewichtsgründen Zugspannungen zu erwarten.

Abbildung 3.26 zeigt den Querschnitt einer ca. 60 Jahre alten Buche mit überwallter Faulstelle. Die Faulstelle erstreckte sich bis einschließlich Markstrang, und vereinzelte Bohrkanäle wiesen auf Insektenbefall dieses Bereiches hin. Der Baum befand sich in vitalem Zustand und produzierte Jahresringe mit bis zu 1,2 cm Breite in den an die Faulstelle angrenzenden Bereichen. Die Sägeschnittfugen sind in der Abbildung im gesunden Holz nahezu vollständig

geschlossen, dies ist ein durch Trocknung bedingtes Artefakt. Die durch das Freischneiden der Wachstumsspannungen ausgelösten Dehnungen betragen nur einen Bruchteil der durch die anschließende Trocknung verursachten Dehnungen.

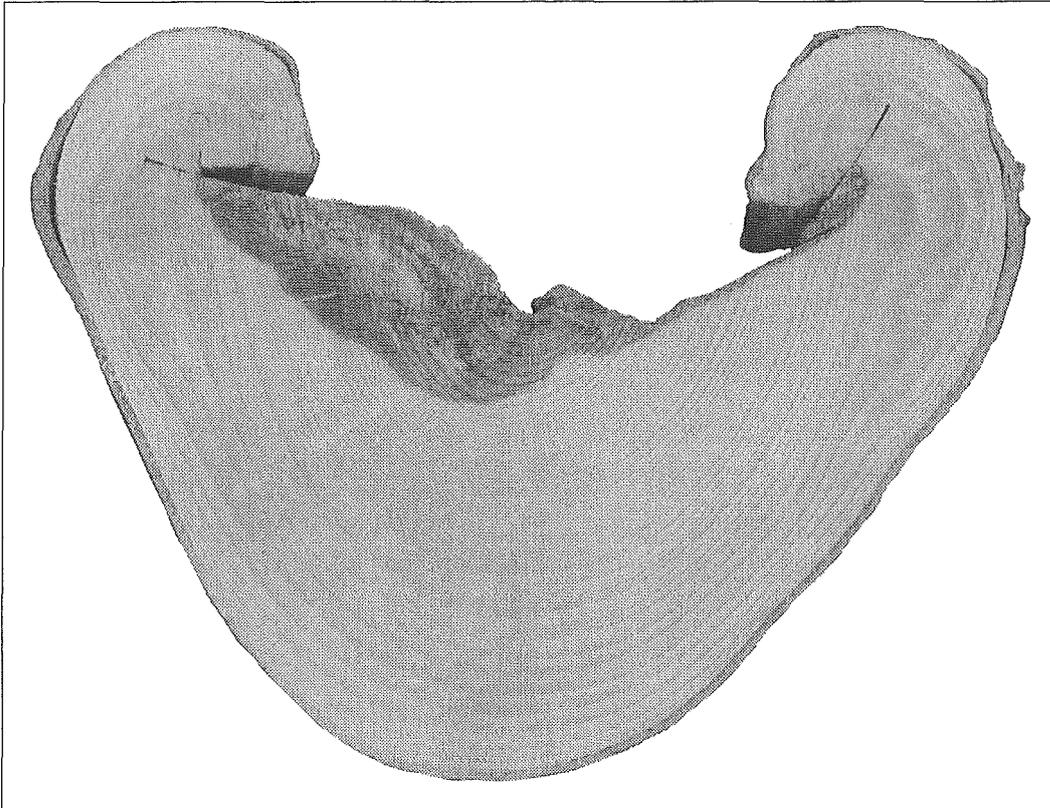


Abbildung 3.26: Querschnitt einer Buche (Fagus sylvatica L.) mit teilweise überwallten Verletzungen.

An beiden Überwallungen wurde in mehreren Schritten zwischen Faulstelle und Überwallung eingesägt und dabei der Abstand jeweils zweier Meßmarken bestimmt. Die nach jedem Sägeschritt gemessenen Abstandsänderungen sind für die beiden überwallten Bereiche in Abbildung 3.27 dargestellt.

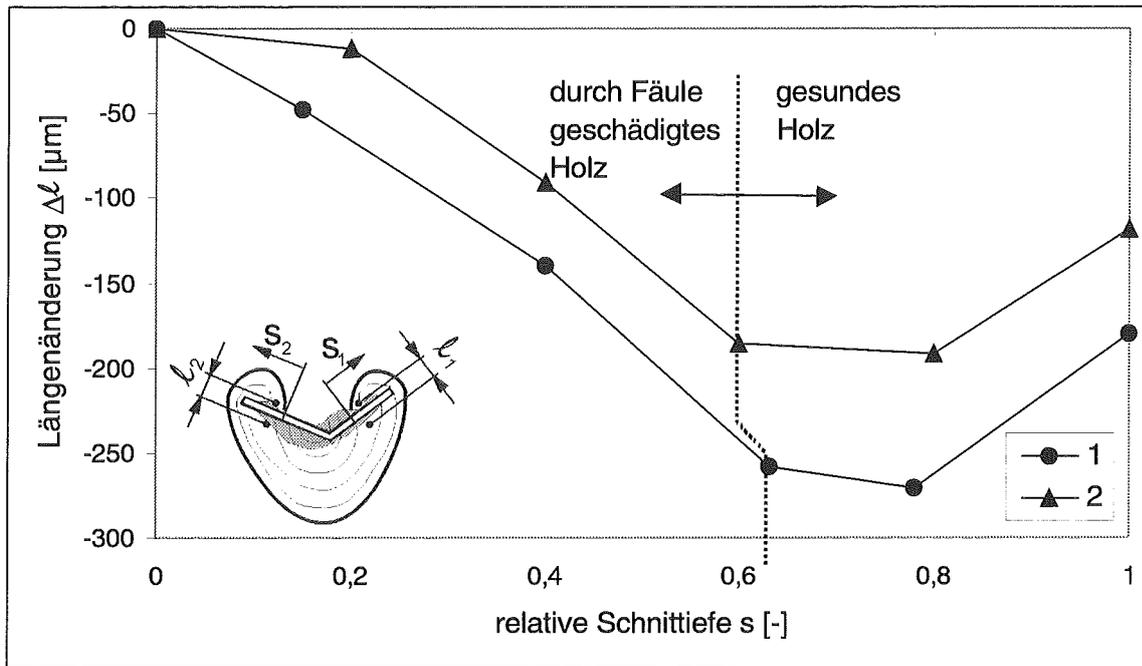


Abbildung 3.27: Beim schrittweisen Einsägen am Buchenquerschnitt (*Fagus sylvatica* L.) mit überwallter Faulstelle gemessene Abstandsänderungen jeweils zweier Meßmarkenpaare.

Solange der Sägeschnitt im Bereich der überwallten Faulstelle geführt wird, verringert sich der Abstand der Meßmarken. Wird der Schnitt bis in das gesunde Holz weitergeführt, so kehrt sich der Trend um, und der Abstand wird größer. Der Wechsel von Druck- zu Zugeigen- spannungen erfolgt im Bereich des ersten Zentimeters des gesunden Holzes. Im Ursprungszustand befindet sich der Spannungsnulldurchgang nicht notwendigerweise an derselben Stelle. Die Spannungen, die in einem Sägeschnitt freigesetzt werden sind das Resultat aus der Überlagerung der ursprünglichen Spannungsverteilung mit den durch die vorhergehenden Sägeschnitte bedingten Spannungsumlagerungen. Daher sind im ungesägten Zustand Zugspannungen näher am Übergang vom geschädigten zum gesunden Holz zu erwarten.

Die ersten Sägeschnitte am Rand der Überwallung zeigen, daß hier das neugebildete Kallusgewebe auf das darunterliegende Holz drückt.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Festigkeiten, Wachstumsspannungen und Elastizitätsmoduln im Bereich von Astanbindungen und Gabelungen von Bäumen zeigten Mechanismen auf, mit denen diese vermeintlichen Schwachstellen einem Materialversagen dennoch entgegenwirken.

An waagrecht ausladenden Laubholzästen wurden nahe der Astbasis die axialen Druckfestigkeiten des Holzes der Astoberseite und des Holzes der Astunterseite mit dem Fractometer III bestimmt. Die mittleren Festigkeiten des unterseitigen Astholzes sind bei allen untersuchten Ästen zwischen 15% und 54% höher als die des oberseitigen Astholzes. Vergleichende Messungen an den entsprechenden Stämmen zeigten, daß die mittlere Druckfestigkeit des Stammholzes bei allen untersuchten Bäumen kleiner als die mittlere Festigkeit des unterseitigen Astholzes und meist größer als die mittlere Festigkeit des oberseitigen Astholzes ist. Die ermittelten Festigkeitssteigerungen im Holz der Astunterseiten sind eine Reaktion auf die permanente Belastung der Äste durch ihr Eigengewicht und weitere, zeitweilig auftretende Lasten wie z. B. Schnee oder Belaubung. Diese Lasten induzieren an der Astbasis große Biegemomente, wodurch in den Unterseiten der Äste Druckspannungen und in den Oberseiten Zugspannungen resultieren. Berücksichtigt man die durchschnittlich zweifach höhere Zug- als Druckfestigkeit des Holzes, wird ersichtlich, daß jede Druckfestigkeitserhöhung im unterseitigen Astholz unmittelbar die Sicherheit des Astes vor dem Versagen steigert.

Bemerkenswert ist, daß die untersuchten Äste überwiegend in den Astoberseiten die größeren Zuwachsraten aufwiesen. Nach Literaturangaben nimmt die Druckfestigkeit von Laubholz mit der Jahrringbreite zu. Die Druckfestigkeit aller untersuchten Äste ist jedoch in den Unterseiten größer als in den Oberseiten, so daß bei Ästen der Einfluß der Jahrringbreite gegenüber der lastgesteuerten Festigkeitsanpassung nur von untergeordneter Bedeutung ist. Somit ist bei Laubholzästen ein Schluß von der Jahrringbreite auf die Holzqualität nicht möglich.

Weiterhin wurden an geraden Astabschnitten, nahe der Astanbindungen die Elastizitätsmoduln in Faserrichtung sowohl in vivo als auch im Labor an einer konventionellen Prüfmaschine bestimmt. Die ermittelten Elastizitätsmoduln des Holzes der Astoberseiten sind zwischen 8% und 114% höher als die Elastizitätsmoduln des Holzes der Astunterseiten. Die inhomogene Verteilung der Elastizitätsmoduln beeinflußt die Spannungsverteilung im Ast. Das Holz mit der höheren Steifigkeit trägt einen auf die Materialmenge bezogenen, überproportional großen Anteil der Lastspannungen. Der höhere Elastizitätsmodul zieht sozusagen den Kraftfluß an. Bei der durch Eigengewicht bedingten Biegebelastung bewirkt dies, daß die Randfasern der Astoberseite einer erhöhten Zugspannung ausgesetzt sind und die Druckspannungen in den Fasern der Astunterseite reduziert werden. Damit mindert der geringere Elastizitätsmodul die Druckspannungen in den Astunterseiten und ist eine weitere Maßnahme, um die im Vergleich zur Zugfestigkeit geringe Druckfestigkeit des Holzes zu kompensieren.

Daneben bedingt die gefundene Verteilung der Elastizitätsmoduln in funktioneller Hinsicht einen weiteren Nutzen. Die Gleichgewichtslagen der Äste sind nicht dauerhaft. Über die Jahre wechselnde Lichtverhältnisse oder ein durch Eigengewicht bedingtes Absinken der Äste können zu einer erforderlichen Korrektur der Astlage führen. Diese Korrekturen werden bei Laubbäumen in der Regel aktiv durch in der Astoberseite gebildetes Zugholz bewirkt. Dabei ist es von Vorteil, wenn das passive Holz der Astunterseite einer notwendigen Verbiegung möglichst wenig Widerstand entgegensetzt.

Die gemessenen Unterschiede bezüglich des Elastizitätsmodules und der Druckfestigkeit zwischen dem Holz der Astoberseite und dem der Astunterseite warfen die Frage nach den Mechanismen auf, mit denen der Baum dies realisiert. Zur Klärung dieser Frage wurden einige Äste und Stämme holzanatomisch untersucht. Die höheren Elastizitätsmoduln in den Astoberseiten resultieren aus den hohen Anteilen an Zellulose in den dort nachgewiesenen Zugholzzellen. In der G-Schicht ist die Zellulose in Form von Mikrofibrillen nahezu faserparallel ausgerichtet. Zellulose ist von den Hauptbestandteilen der Holzzellen das Material mit dem höchsten Elastizitätsmodul. Die faserparallele Orientierung der Mikrofibrillen ist strukturell steifer als die im Normalholz vorherrschende spiralförmige Anordnung. Die axiale Druckfestigkeit des Astholzes wird wesentlich von der Dicke der lignifizierten Zellwandschichten bestimmt. Das Holz mit den hohen gemessenen Druckfestigkeiten (Astunterseite) bestand im wesentlichen aus Holzfasern mit sehr dicken und vollständig lignifizierten Zellwänden. Das Holz mit den geringen Druckfestigkeiten (Astoberseite) enthielt Zugholzzellen mit zum Teil ebenfalls sehr dicken Zellwänden. Diese setzten sich aus der dicken, nicht lignifizierten G-Schicht und aus relativ dünnen, lignifizierten Zellwandschichten zusammen.

Der Einfluß der inhomogenen Verteilung der Elastizitätsmoduln auf das sekundäre Dickenwachstum wurde mittels der CAO-Methode analysiert. Die Ergebnisse der Simulation sind nicht mit den vorgefundenen Zuwächsen aller untersuchten Äste vereinbar. Dies führte zu dem Schluß, daß der lokale Elastizitätsmodul keinen dominanten Einfluß auf das sekundäre Dickenwachstum der Äste ausübt, daß also eher biologische Mechanismen wie Apicaldominanz, Photo- und Geotropismus die Zuwächse steuern.

Das Holz in der Astachsel ist durch Zugspannungen quer zu den Fasern gefährdet. Die Zugfestigkeit quer zur Faser beträgt im Normalholz nur ca. 3%-4% der Zugfestigkeit in Faserrichtung. Im Bereich der Astbasis werden die Astfasern nach unten in den Stamm umgelenkt. Die Biegespannungen werden hier vom Ast in den Stamm eingeleitet. Die Zugspannungen, die in der Astoberseite distal noch nahezu gänzlich in Faserrichtung wirken, werden aufgrund der Faseranordnung im Stamm und der Astfaserumlenkung an der Basis teilweise auch quer zu den Fasern übertragen. Hierdurch ist die Querspannung im Holz des zentralen Bereiches der Achseln wesentlich höher als im umliegenden Holz.

Die tangential Biegefestigkeit, als maßgeblich durch die Zugfestigkeit quer zur Faser bestimmte Größe, wurde mit dem Fractometer III entlang des Kontaktbereichs von Ast- und Stammfasern gemessen. Im zentralen Bereich der Achsel weist das Holz die höchsten tangentialen Biegefestigkeiten auf. Diese sind bis zu 350% höher als die im Stamm

gemessenen Festigkeiten. Zu den Seiten hin werden die Festigkeiten geringer und entsprechen im Rahmen der natürlichen Streuung den weiter unten im Stamm gemessenen.

Als Hauptursache für die hohen gemessenen tangentialen Biegefestigkeiten in den Astachsen zeigten holzanatomische Untersuchungen sehr verworrene und vom Normalholz abweichende Faserorientierungen auf. Die verworrene Faseranordnung charakterisiert eine weitere erstaunliche und bis dato unbekannte Strategie der Bäume: In Bereichen der Astanbindung, wo biologische Restriktionen eine Orientierung der Fasern exakt in Kraftflußrichtung verhindern, bedingt eine lokal ungeordnete Faseranordnung ein quasi-isotropes Materialverhalten. Damit meidet der Baum die Schwächen eines unidirektionalen Faserverbundes (geringe Festigkeiten bei Schubbelastungen zwischen den Fasern und Zugbelastungen quer zu der Faserrichtung) an einer Stelle, an der er die Stärke des unidirektionalen Faserverbundes (sehr hohe Festigkeiten bei Belastung in Faserrichtung) nicht nutzen kann. Zudem wirkt die verworrene Faseranordnung als Rißstopper und Stoßbremse. Die Rißausbreitung ist mit hohem Energieaufwand verbunden, da der Riß entweder entlang der Fasern verläuft und damit häufig umgelenkt werden muß, oder die Fasern bzw. das Holzstrahlparenchym durchtrennt werden müssen.

Weiterhin wurden die Wachstumsspannungen in den Astanbindungen und Gabelungen untersucht. Beim Einsägen in die Astachsel wurde die Abstandsänderung zwischen zwei an der Gabelung angebrachten Meßpunkten qualitativ ermittelt. Im oberflächennahen Holz der Astachsel bewirkten die Wachstumsspannungen immer eine Verringerung der Meßstrecke, was auf eine Druckvorspannung weist. Die Druckspannungen im Holz der Astachsen werden mit äußeren Lastspannungen, welche im Bereich der Astachsel vornehmlich durch Abwärts-Biegung bedingte Zugspannungen sind, überlagert. Damit werden die effektiven Spannungen reduziert und die Sicherheit der Astanbindungen und Gabelungen vor Versagen erhöht.

Als mögliche Ursache für den ungewöhnlichen Schadensfall des „Sommerbruchs grüner Äste“ wurde ein durch nachlassende Zugholzwirkung bedingtes Schubversagen untersucht. Ein Vergleich der Materialkennwerte von Holz mit Ergebnissen von durchgeführten FE-Berechnungen schloß Schubversagen als alleinige Ursache aus, deutet jedoch auf die Aktivierung der Rißeigenschaft der Holzstrahlen hin.

Zwiesel mit eingeschlossener Rinde sind durch Querkzugbelastung in besonderem Maße gefährdet, da der Rindeneinschluß analog einem Riß keine Zugspannungen übertragen kann. Die Zugspannungen wirken ausschließlich im Holz des Verschweißungsbereichs (Restligament) der beiden Stämmlinge. Mit dem Fractometer III wurde die tangentiale Biegefestigkeit an Zwieseln gemessen. Entlang des Zwieselumfangs vorgenommene Messungen belegten, daß in den Verschweißungsbereichen das Holz höhere Festigkeiten aufweist als in den umliegenden Bereichen. Holzanatomische Untersuchungen zeigten in diesen Bereichen ähnlich ungeordnete Faserverläufe auf, wie in den Achseln der Astanbindungen.

Zur Bestimmung der Verteilung der Wachstumsspannung in Zwieseln wurden Querschnitts-scheiben aus diesen herausgesägt. An den Zwieselscheiben wurden, ausgehend vom Scheibenrand, entlang der eingewachsenen Rinde bis zum gegenüberliegenden Scheibenrand die Spannungen mit einer Bohrlochmethode qualitativ ermittelt. An einigen Stellen war

zusätzlich eine quantitative Abschätzung möglich. Im zentralen Bereich der eingeschlossenen Rinde herrschen Druckspannungen vor. In den beiden Verschweißungsbereichen des Zwiesels, seitlich am Rindeneinschluß, steht das Holz unter einer Zugvorspannung. Nahe am Scheibenrand, zu beiden Seiten des Rindeneinschlusses, überwiegen wiederum Druckspannungen.

Die Zugvorspannung im Restligament, nahe der eingeschlossenen Rinde, erscheint als Gefährdung für den Zwiesel. Sie wird mit Lastzugspannungen überlagert, wodurch sich die effektive Spannung erhöht. Die Druckeigenstressungen am Umfang der Zwiesel schützen das oberflächennahe Holz vor Versagen durch Zugbelastungen. Insbesondere wirken sie der Reißinitiierung durch Holzstrahlen („schlafende Risse“) entgegen, die durch ihre Spindelform bei Querszugbelastung Risse zwischen den umgebenden Fasern auslösen können. Die am längeren radialen Hebelarm angreifenden tangentialen Druckspannungen mindern um den Preis innerer tangentialer Zugspannungen das Risiko des „Schranktürklappens“ im Zwieselbereich. Somit sind die Zugvorspannungen im Inneren ein notwendiges Übel, um das für Eigenspannungszustände notwendige Kräftegleichgewicht, und damit die risikomindernden Druckspannungen am Umfang, aufrecht erhalten zu können.

Zuletzt wurden im Bereich von überwallten Verwundungen, entlang der Grenzfläche zwischen dem Kallusgewebe und dem darunterliegenden Holz, die Wachstumsspannungen bestimmt. Qualitative Abschätzungen mit einer Lochbohrmethode und einem Einsägeverfahren zeigten, daß das Kallusgewebe das umwallte Holz unter Druckvorspannungen setzt, es wirkt gleichsam wie ein Druckverband.

Befinden sich reißartige Störungen wie eingeschlossene Rinde und überwallendes Kallusgewebe im Holzkörper, lautet das Fazit bezüglich der Wachstumsspannungen: Die oberflächennahe Druckvorspannung schützt das lebende Holz der Oberfläche vor Rissen, kann jedoch aus Gleichgewichtsgründen im Bereich der Reißspitze im Holz Zugspannungen bewirken.

Die neugewonnenen Erkenntnisse über Astanbindungen und Astgabelungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Festigkeiten sind lastgesteuert an auftretende tangentialer Querszugspannungen und axiale Druckspannungen angepaßt. Ein „wirrer“ Faserverlauf in den Astachseln und Verschweißungsstellen von Zwieseln erhöht die Quersfestigkeit, wirkt reißhemmend und wohl auch schockabsorbierend. Wachstumsspannungen wirken dem tangentialen Querszug entgegen.

5 Literatur

- [1] ALBERTS B., JAENICKE L. (1990) *Molekularbiologie der Zelle*. 2. Auflage, VCH-Verlag, Weinheim.
- [2] ALBRECHT W. (1995) *Untersuchung der Spannungssteuerung radialer Festigkeitsverteilung in Bäumen*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [3] ARCHER R. R. (1987) *Growth stresses and strains in trees*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [4] ASHBEE K. (1989) *Fundamental principles of fiber reinforced composites*. Technomic Publishing Company Inc., Lancaster, Pennsylvania.
- [5] ASTM (1987) *Standard methods of testing small clear specimens of timber*. ASTM D 143 - 83, Philadelphia.
- [6] ASTM (1995) *Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*. ASTM E 837 - 95, Philadelphia.
- [7] AUFSESS H. (1973) *Mikroskopische Darstellung des Verholzungsgrades durch Färbemethoden*. Holz als Roh- und Werkstoff 31, S. 24-33.
- [8] BAMBER R. K. (1987) *The origin of growth stresses: a rebuttal*. IAWA Bulletin 8, S. 80-84.
- [9] BAUMGARTNER A., HARZHEIM L., MATTHECK C. (1992) *SKO: Soft Kill Option – the biological way to find optimum structure topology*. Int. Journal Fatigue 14, S. 387-393.
- [10] BEIMGRABEN T. (1999) *Spannungen in Buchenwertholzabschnitten*. Internetseite: <http://www.uni-freiburg.de/fobawi/projekt-buche.htm> der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- [11] BEITZ W., KÜTTNER K. H. (1990) *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 17. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [12] BLH (1999) *DMS-Kleben auf Nichtmetalle*. Internetseite: <http://blh.de/german/applikation/NichtMetall.htm>, BLH, Heilbronn.
- [13] BODIG J. (1982) *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne.
- [14] BÖHLMANN D. (1970) *Anatomisch-histologische Untersuchungen im Bereich der Astabzweigung bei Nadel- und Laubbäumen (I-IV)*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 141/7, S. 134-40; 141/10, S. 189-193; 141/11, S. 224-230; 141/12, S. 245-250.
- [15] BOSSHARD H. H. (1984) *Holzkunde – Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*. 2. Auflage, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Stuttgart.

- [16] BOYD J. D. (1985) *The key factor in growth stress generation in trees: lignification or crystallisation?* IAWA Bulletin 6, S. 139-150.
- [17] BRAUN H. J. (1988) *Bau und Leben der Bäume*. 3. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg.
- [18] BRÖKER F. W. (1985) *Dehnungsmessungen an Holz mit direkt applizierten DMS*. Messtechnische Briefe 21/1, S. 18–23.
- [19] BROCKHAUS (1995) *Duden: Universal Wörterbuch*. PC-Bibliothek Version 1.1j, F.A. Brockhaus AG. Mannheim.
- [20] BRONSTEIN I. N., SEMENDJAJEW K. A. (1989) *Taschenbuch der Mathematik*. 24. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main.
- [21] BRUDER G. (1998) *Finite-Elemente-Simulationen und Festigkeitsanalysen von Wurzelverankerungen*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [22] DADSWELL H. E., WARDROP A. B. (1955) *The structure and properties of tension wood*. Holzforschung, 9/4, S. 97-104.
- [23] DIETRICH, F. (1995) *Wie der grüne Baum tangentielle Zugspannungen bewältigt*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [24] DINWOODIE (1981) *Timber: its nature and behaviour*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne.
- [25] DTV-ATLAS (1990) *dtv-Atlas zur Biologie*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München.
- [26] ENGELS, J., SCHWARZE, F. W. M. R. (1997) *Holzzersetzende Pilze als Werkzeug zur Erforschung von Zellwandstrukturen*. Seminarunterlagen zum 3. VTA-Spezialseminar: Messen und Beurteilen am Baum, 23.-24. April 1997, Karlsruhe.
- [27] ESAU, K. (1977) *Anatomy of seed plants*. 2. Auflage, Wiley Verlag, New York.
- [28] FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG (1976) *DIN 52185, Prüfung von Holz: Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- [29] FACHNORMENAUSSCHUSS MATERIALPRÜFUNG (1978) *DIN 52186, Prüfung von Holz: Biegeversuch*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- [30] FENGEL, D., WEGENER, G. (1984) *Wood-Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. W. De Gruyter, Berlin.
- [31] FETT T. (1987) *Bestimmung von Eigenspannungen mittels bruchmechanischer Beziehungen*. Zeitschrift für Materialprüfung 29, S. 92-94.
- [32] FETT T., THUN G. (1996) *Residual stresses in PVC-cylinders determined with the weight function method*. Engineering fracture mechanics 55, S. 859-863.
- [33] FOBO W. (1986) *Zum Tragverhalten der Bäume*. Sonderforschungsbereich 230, Heft 11, Universität Stuttgart.

-
- [34] FRAUNHOFER GESELLSCHAFT (1999) *Lignin – weltweite Ressource neu genutzt*. Internetseite: <http://www.ict.fhg.de/deutsch/lignin.html> des Fraunhofer Institutes Chemische Technologie, Pfinztal.
- [35] FREUND H. (1970) *Handbuch der Mikroskopie in der Technik*. Band V, Teil 2, Umschau Verlag Frankfurt a. M..
- [36] FREY-WYSSLING A. (1940) *Die Ursache der anisotropen Schwindung des Holzes*. Holz als Roh- und Werkstoff 3/11, S. 349-353.
- [37] FREY-WYSSLING A. (1959) *Die Pflanzliche Zellwand*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [38] GENENZ V., SPECK T., BRÜCHERT F. BECKER G. (1997) *Astbruch an Pappeln – biomechanische und morphologische Untersuchungen an Populus x canadensis*. Jahrbuch der Baumpflege 1997, Thalacker Verlag, Braunschweig.
- [39] GIBSON L., ASHBY F. (1988) *Cellular solids – structure and properties*. Pergamon Press Oxford.
- [40] GILLIS P. P., HSU C. H. (1979) *An elastic, plastic theory of longitudinal growth stresses*. Wood science and Technology 13, S. 97-115.
- [41] GORDON J. E. (1989) *Strukturen unter Stress*. Spektrum der Wissenschaft-Verlag, Heidelberg.
- [42] GÖTZ K. O., MATTHECK C. (1998) *Festigkeitsuntersuchungen an grünen Bäumen mit dem Fractometer III*. Seminarunterlagen zum 4. VTA-Spezialseminar: Messen und Beurteilen am Baum, 24.-25. März 1998, Karlsruhe.
- [43] HBM (1991) *Bedienungsanleitung DDI*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.
- [44] HIBBIT D., KARLSSON B., SORENSEN P. (1998) *Abaqus User's Manual, Version 5.8*. Pawtucket, USA.
- [45] JACCARD P., FREY A. (1928) *Einfluß von mechanischen Beanspruchungen auf die Micellarstruktur, Verholzung und Lebensdauer der Zug- und Druckholzelemente beim Dickenwachstum der Bäume*. Pflanzenphysiologisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- [46] JACOBS M. R. (1938) *The fiber tension of woody stems with special reference to the genus Eucalyptus*. Commonwealth Forestry Bureau, Bulletin No. 24, Canberra.
- [47] JACOBS M. R. (1939) *Further studies in fiber tension*. Commonwealth Forestry Bureau, Bulletin No. 28, Canberra.
- [48] JACOBS M. R. (1965) *Stresses and strains in tree trunks as they grow in length and width*. Leaflet, Forestry and Timber Bureau, No. 96, Australia.
- [49] JAYME G., HARDERS-STEINHÄUSER M. (1953) *Zugholz und seine Auswirkungen in Pappel- und Weidenholz*. Holzforschung, 2/3, S 39-43.

- [50] KAYA F., SMITH I. (1993) *Variation in crushing strength and some related properties of red pine*. Wood science and Technology, 27, S. 229-293.
- [51] KEYLWERTH R. (1951) *Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer*. VDI-Forschungsheft 430, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [52] KIRSCH J. G. (1898) *Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre*. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- [53] KLAUDITZ W. (1952) *Zur biologisch-mechanischen Wirkung des Lignins im Stammholz der Nadel- und Laubhölzer*. Holzforschung, 6/3, S. 70–82.
- [54] KÖHLER, W. (1996) *Biostatistik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [55] KOLLMANN F. (1956) *Untersuchung über die Querkzugfestigkeit der Hölzer*. Universität München.
- [56] KOLLMANN F. (1982) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [57] KOLLMANN F., COTÉ W. A. (1968) *Principles of wood science and technology. Solid wood I*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [58] KÖNIG E. (1958) *Fehler des Holzes*. Holzzentralblattsverlagsgesellschaft, Stuttgart.
- [59] KÖNIG G. (1991) *Ein Beitrag zur Weiterentwicklung teilzerstörender Eigenspannungsmessverfahren*. Dissertation an der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart.
- [60] KOPONEN S., TORATTI T., KANERVA P. (1989) *Modelling longitudinal elastic and shrinkage properties of wood*. Wood Science and Technologie 23, S. 55-63.
- [61] KRÄMER R. (1998) *Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls von Astholz verschiedener Laubbäume*. Studienarbeit am Institut für Zuverlässigkeit und Schadenskunde im Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH).
- [62] KRIECHBAUM R. (1994) *Ein Verfahren zur Optimierung der Faserverläufe in Verbundwerkstoffen durch Minimierung der Schubspannungen nach Vorbildern der Natur*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [63] KÜBLER H. (1959a) *Studien über Wachstumsspannungen – Erste Mitteilung: Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung*. Holz als Roh- und Werkstoff 17/1, S. 1-9.
- [64] KÜBLER H. (1959b) *Studien über Wachstumsspannungen – Zweite Mitteilung: Die Spannungen in Faserrichtung*. Holz als Roh- und Werkstoff 17/2, S. 44-54.
- [65] KÜBLER H. (1959c) *Studien über Wachstumsspannungen – Dritte Mitteilung: Längenänderungen bei der Wärmebehandlung frischen Holzes*. Holz als Roh- und Werkstoff 17/3, S. 77-86.
- [66] KUBLER H. (1987) *Growth stresses in trees and related wood properties*. Forestry Abstracts, 48/3, S. 131-189.

-
- [67] LAVERS G. M. (1983) *The strength properties of timber*. Building Research Establishment Report, 3rd Edition, Her Majesty's Stationery Office, London.
- [68] LEV-YADUN S., ALONI R. (1990) *Vascular differentiation in branch junctions of trees: circular patterns and functional significance*. *Trees: Structure and Function* 4, S. 49-54.
- [69] MATHAR J. (1933) *Ermittlung von Eigenspannungen durch Messung von Bohrloch-Verformungen*. *Archiv Eisenhüttenwesen* 7/6, S. 277-281.
- [70] MATTHECK C. (1990a) *Why they grow, how they grow: the mechanics of trees*. *Arboricultural Journal* 14, S. 1-17.
- [71] MATTHECK C. (1990b) *Engineering components grow like trees*. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 21, S. 143-168.
- [72] MATTHECK C. (1991) *Trees – The Mechanical Design*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [73] MATTHECK C. (1992) *Die Baumgestalt als Autobiographie. Eine Einführung in die Mechanik der Bäume und in ihre Körpersprache*. 2. Auflage, Thalacker Verlag Braunschweig
- [74] MATTHECK C. (1997) *Design in der Natur – der Baum als Lehrmeister*. 3. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg.
- [75] MATTHECK C., BRELOER H. (1993) *Bruch grüner Äste*. *Deutscher Gartenbau* 42, S. 2664-2668.
- [76] MATTHECK C., BRELOER H. (1994) *Handbuch der Schadenskunde von Bäumen*. 2. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg.
- [77] MATTHECK C., BURKHARDT S. (1990) *A new method of structural shape optimization based on biological growth*. *Int. Journal of Fatigue* 12, S. 185-190.
- [78] MATTHECK C., KUBLER H. (1995) *Wood – the internal optimization of trees*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [79] MATTHECK C., REUSCHEL D., GÖTZ K. O. (1998) *Technisches Holz im Automobilbau*. ATZ/MTZ-Sonderausgabe: Werkstoffe im Automobilbau, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden.
- [80] MATTHECK C., SCHWARZE F. W. M. R. (1994) *Die Holzstrahlen als getarnte I-Balken in einem mechanischen Ersatzmodell*. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 10/11, S. 197-201.
- [81] MATTHECK C., WALTHER F., KEILEN K. (1989) *Hirnrisse in Laubbäumen – ihre Entstehung und Wege zu ihrer Vermeidung*. Bericht des Kernforschungszentrums Karlsruhe, KFK 4557, Karlsruhe.
- [82] MENNIGER E. A. (1995) *Fantastic trees*. Timber Press, Portland.
- [83] METZGER C. (1893) *Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachstum der Bäume*. Mündener Forstliche Hefte, 3. Heft, Julius Springer- Verlag, Berlin.

- [84] MOSER K. (1992) *Faser-Kunststoff-Verbund: Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [85] MOTZFELD H. (1961) *Fehlerquellen beim Messen von Schweißeigenstressungen nach dem Trepanier- und Bohrlochverfahren*. Schweißen und Schneiden 13/10, S. 465-470.
- [86] MÜHLETHALER K. (1953) *Elektronenmikroskopische Untersuchungen an pflanzlichen Geweben*. Zeitschrift für Zellforschung, 38, S 299-327.
- [87] MÜNCH E. (1938) *Statik und Dynamik des schraubigen Baus der Zellwand*. Flora 32, Jena, S. 357-424.
- [88] MÜNKER J. (1995) *Untersuchung und Weiterentwicklung der Auswertungsmethoden für teilzerstörende Eigenspannungsmessverfahren*. Dissertation am Fachbereich Maschinentechnik der Universität-Gesamthochschule Siegen.
- [89] NICHOLSON J. E. (1971) *A rapid method for estimating longitudinal growth stresses in logs*. Wood science and Technology 5, S. 40-48.
- [90] NIEMZ P. (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen.
- [91] NIKLAS K. J. (1992) *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. The University of Chicago Press, Chicago.
- [92] PANSHIN A. J., DE ZEEUW C. (1980) *Textbook of wood technology*. 4. Auflage, Mc Graw Hill, New York.
- [93] PEITER A. (1966) *Eigenstressungen I. Art – Ermittlung und Bewertung*. Tritsch Verlag, Düsseldorf.
- [94] PEITER A. (1992) *Handbuch Spannungsmesspraxis – Experimentelle Ermittlung mechanischer Spannungen*. Vihweg Verlag, Braunschweig.
- [95] PERKITNY T., HELINSKA-RACZKOWSKA L. (1966) *Über den Einfluß von Wachstumsstressungen auf die durch Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung ausgelösten Verformungen des Holzes*. Holz als Roh- und Werkstoff 24/10, S. 481-486.
- [96] REUSCHEL D. (1999) *Untersuchung der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [97] SCHWARZ T., KOCKELMANN H. (1993) *Die Bohrlochmethode – ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenstressungen*. Messtechnische Briefe 29/2, S. 33-38.
- [98] SELL J., ZIMMERMANN T. (1993) *Die Gefüge der Zellwandschicht S2 – Untersuchungen mit dem Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop an Querbruchflächen von Fichten- und Tannenholz*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Forschungs- und Arbeitsbericht 115/28, Zürich.

-
- [99] SELL J., ZIMMERMANN T. (1997) *Das Feingefüge der Zellwand auf Querbruchflächen von längszugbeanspruchten Laubhölzern*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Forschungs- und Arbeitsbericht 115/35, Zürich.
- [100] SHIGO A. L. (1985) *How tree branches are attached to trunks*. Canadian Journal of Botany, 63/8, S. 1391-1401.
- [101] SHIGO A. L. (1990) *Die neue Baumbiologie*. Bernhard Thalacker Verlag, Braunschweig.
- [102] STEVENS W. C. (1938). *The shrinkage and expansion of Wood*. Forestry 12, S. 38-43.
- [103] STRASBURGER E. (1998) *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*. 34 Auflage, G. Fischer Verlag, Stuttgart.
- [104] TIMELL T. E. (1986) *Compression wood in gymnosperms*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [105] TAN D. M., STANZL-TSCHEGG S. E., TSCHEGG E. K. (1995) *Models of wood fracture in Mode I and Mode II*. Holz als Roh- und Werkstoff 53, S. 159-164.
- [106] TROLL W. (1973) *Allgemeine Botanik*. 4. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [107] U.S. FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987) *Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*. Agricultural Handbook Nr. 72, U. S. Department of Agriculture, Washington, USA.
- [108] WAGENFÜHR R. (1989) *Anatomie des Holzes: unter besonderer Berücksichtigung der Holztechnik*. 4. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- [109] WAGENFÜHR R. (1996) *Holzatlas*. 4. Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig.
- [110] WALTHER F. (1994) *Struktur- und Formoptimierung hochbelasteter Bauteile- ein geschlossenes Konzept auf der Basis des Axioms konstanter Spannung*. VDI Reihe 18, Nr. 146, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [111] WEBER K., TESARI I., MATTHECK C. (1999) *Druckfestigkeit und Holzanatomie von Laubholzästen*. Seminarunterlagen zum 5. VTA-Spezialseminar: Messen und Beurteilen am Baum, 20.-21. April 1999, Karlsruhe.
- [112] WEBER K., GÖTZ K. O., MATTHECK C. (1999) *Die Schiefe Buche: Holzanatomie und Festigkeiten*. Seminarunterlagen zum 5. VTA-Spezialseminar: Messen und Beurteilen am Baum, 20.-21. April 1999, Karlsruhe.
- [113] WEBER K. (1999c) *Persönliche Mitteilung*.
- [114] YLIEN A. (1952) *Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume*. Silva Fennica 76, Helsinki.
- [115] YOSHIDA M., OKUYAMA T., YAMAMOTO H. (1994) *Tree forms and growth stresses*. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, 35/114, S. 55-63.
- [116] ZIMMERMANN M. H. (1974) *Trees: Structure and function*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

- [117] ZIPSE A. (1997) *Untersuchungen zur lastgesteuerten Festigkeitsverteilung in Bäumen*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH).
- [118] ZWERGER K. (1997) *Das Holz und seine Verbindungen; traditionelle Bautechniken in Europa und Japan*. Birkhäuser Verlag, Basel, Berlin, Boston.