

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 154 (2003)
Heft: 12

Artikel: Über die mechanische Bedeutung der Holzstrahlen
Autor: Bungert, Ingo
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098209>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 01.05.2026

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

Über die mechanische Bedeutung der Holzstrahlen¹

INGO BURGERT

Keywords: Wood rays; radial tensile strength; radial tensile modulus of elasticity; biomechanics. FDK 811 : 812

1. Einleitung

Im Zuge eines wachsenden Interesses an Möglichkeiten zur Nutzung natürlicher Bauprinzipien wird auch Holz vermehrt im Sinne eines Biomaterials wahrgenommen. Dabei stehen vor allem die hierarchischen Strukturebenen und der Charakter des Faserverbundwerkstoffs im Vordergrund (FRATZL 1999; LICHTENEGER *et al.* 1999). Aus der Analyse der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen der axialen Festigungsgewebe lassen sich bemerkenswerte Prinzipien des Materialdesigns ableiten (NIKLAS 1992; VINCENT 2002). Es ist jedoch unzweifelhaft, dass die Optimierung von Fasern bzw. Tracheiden zur Kompensation axialer Zug- und Druckbeanspruchungen (hauptsächlich durch Wind verursacht) bei anderen Belastungsfällen auch zu Schwachpunkten führt. Aus der Betrachtung der Fasergeometrie und der Mikrofibrillenorientierung in den sekundären Zellwandschichten lässt sich ableiten, dass die axialen Festigungsgewebe insbesondere bei transversalen Beanspruchungen versagensanfällig sind. Bei der Frage nach der vorbeugenden Kompensation dieser Spannungen in der optimierten Holzstruktur lohnt ein Blick auf die radial im Stamm verlaufenden Holzstrahlen. Da Holzstrahlen hauptsächlich aus Parenchymzellen bestehen, wurden sie bisher fast ausschliesslich mit physiologischen Funktionen in Verbindung gebracht. Jedoch haben bereits MATTHECK *et al.* (1994) sowie MATTHECK & KUBLER (1995) auf eine zusätzliche mechanische Bedeutung der Holzstrahlen hingewiesen.

Unter welchen Bedingungen und in welchem Umfang das parenchymatische Holzstrahlgewebe einen Beitrag zur Baummechanik leisten kann, soll im Folgenden anhand von drei Untersuchungsansätzen dargestellt werden. Vorab sollen in einer einleitenden Systematik Struktur und Eigenschaften der Holzstrahlen beschrieben werden.

2. Holzstrahlen

Die Holzstrahlen der Nadel- und Laubbäume nehmen im Gewebeverbund eines Baumes in vielerlei Hinsicht eine Sonderstellung ein. Sie gehen nicht wie das übrige Gewebe aus den Fusiforminitialen, sondern aus den Holzstrahlinitialen des Kambiums hervor. Daher orientieren sich im Gegensatz zum axial ausgerichteten Gewebe allein die Holzstrahlen in der radialen Richtung des Baumes. Nadelbäume besitzen fast ausschliesslich uniseriate Holzstrahlen, deren Anteil an der Holzsubstanz 5 bis 10% ausmacht. Laubbäume weisen eine wesentlich breitere Spannweite in den Holzstrahlanteilen (6 bis 40%) und in den Holzstrahlgrössen auf. Der Verbund des langlebigen Parenchyms in den Holzstrahlen führt zu einer grundsätzlich eigenen physiologischen und funktionellen Bedeutung dieses Gewebetyps im lebenden Baum. Mit Ausnahme des Axialparenchyms führt die Ausdifferenzierung der longitudinalen Zellelemente zu ihrem Absterben. Somit spielen die Holzstrahlen beim Ablauf physiologischer Prozesse im Baum eine entscheidende Rolle. In diesem Zusammenhang sind der radiale Stofftransport (BRAUN 1967; VAN BEL 1990), die Speicherfunktion (HARMS & SAUTER 1992; SAUTER & VAN CLEVE 1994) und die Bedeutung bei Verwundungsreaktionen (SHIGO

& SHIGO 1974; SCHMITT & LIESE 1993) und bei der Verkernung (FREY-WYSSLING & BOSSHARD 1959; FUKAZAWA & HIGUCHI 1966) zu nennen.

Aus der Betrachtung des Zellwandaufbaus lässt sich schliessen, dass Parenchymzellen strukturell zu einem Beitrag zur Mechanik des Gesamtverbunds befähigt sind. Wie Tracheiden oder Fasern besitzen auch Holzstrahl-Parenchymzellen drei Sekundärwandschichten, die in der Regel lignifiziert sind. Allerdings ist die S2-Schicht weniger dominant im Vergleich zum Festigungsgewebe (HARADA 1965).

Angeichts der Holzstrahlorientierung im Baum ist eine mechanische Bedeutung der Holzstrahlen in radialer Richtung zu erwarten. Eine Bestätigung der strukturellen Vorzugsrichtung findet sich in Untersuchungen von LINDSAY & CHALK (1954), MCINTOSH (1954; 1955), SCHNIEWIND (1959) sowie FUTO & BOSSHARD (1986). Diese konnten an Laubbaumarten mit grossen Holzstrahlen zeigen, dass die radiale Schwindung des Strahlparenchyms wesentlich geringer als die des axialen Gewebes ist. Allerdings ist eine direkte Messung mechanischer Eigenschaften von Holzstrahlen äusserst kompliziert. Daher werden zumeist Aussagen getroffen, die auf dem Verhalten des Gesamtverbunds in Abhängigkeit vom Holzstrahlanteil beruhen. So gehen auch Feststellungen zur radialen Festigkeit des Holzstrahlgewebes (SCHNIEWIND 1959; FUTO 1969; KELLER & THERCELIN 1975; BEERY *et al.* 1983) nicht aus direkten Messungen hervor. Lediglich KAWAMURA (1979, 1984a, b) führte mittels einer Schwingungsapparatur Untersuchungen zum Elastizitätsmodul von isoliertem Holzstrahlgewebe durch. Dabei stellte er für die grossen Holzstrahlen der Eiche einen etwa dreifach erhöhten (radialen) Elastizitätsmodul im Vergleich zum übrigen Holz fest.

3. Untersuchungsansatz 1: Natürliche Heterogenität der Baumarten

Der erste Untersuchungsansatz zur mechanischen Bedeutung der Holzstrahlen basiert auf der strukturellen Heterogenität der Baumarten. Die Variabilität der Holzstrahlanteile bei den Laubbäumen berücksichtigend, wurden für zwölf ausgewählte Baumarten mechanische und strukturelle Eigenschaften gegenübergestellt. In *Tabelle 1* sind einige strukturelle Charakteristika in einer einfachen Klassifizierung aufgeführt.

Pro Baumart wurde je eine Stammscheibe aus zwei Bäumen untersucht. Radiale und tangentielle Zugprüfungen zur Ermittlung von Zugfestigkeiten und Zug-Elastizitätsmoduln wurden an saftfrischen Proben durchgeführt. Nähere Angaben zur Probenform finden sich bei BURGERT *et al.* (1999) und BURGERT *et al.* (2001). Durch die Messung von Raumdichtezahlen, Holzstrahlanteilen und Holzstrahlgrössenverteilungen an den Prüfkörpern wurden die strukturellen Parameter

¹ Beim Aufsatz handelt es sich um eine zusammenfassende Darstellung der eigenen Arbeiten, wie sie der Autor im Rahmen des Montagskolloquiums präsentiert hat.

Baumart	Gefässverteilung	Dichte	Holzstrahlanteil	Holzstrahlstruktur
Weide (<i>Salix</i> sp.)	zerstreutporig	geringe	10%	einreihig-klein
Pappel (<i>Populus</i> sp.)	zerstreutporig	geringe	11%	einreihig-klein
Birke (<i>Betula</i> sp.)	zerstreutporig	mittlere	12%	mehreihig-klein
Linde (<i>Tilia</i> sp.)	zerstreutporig	mittlere	10%	mehreihig-mittel
Platane (<i>Platanus acerifolia</i> Willd.)	zerstreutporig	mittlere	35%	mehreihig-gross
Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	zerstreutporig	mittlere	23%	mehreihig-gross/mittel/klein
Ahorn (<i>Acer</i> sp.)	zerstreutporig	mittlere	16%	mehreihig-mittel
Esche (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)	ringporig	mittlere	18%	mehreihig-mittel
Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	ringporig	hohe	18%	mehreihig-mittel
Eiche (<i>Quercus robur</i> L.)	ringporig	mittlere	20%	mehr- einreihig-gross/klein
Kastanie (<i>Castanea sativa</i> Mill.)	ringporig	mittlere	10%	einreihig-klein
Ulme (<i>Ulmus</i> sp.)	ringporig	mittlere	19%	einreihig-klein

Tabelle 1: Einfache Klassifizierung der untersuchten Baumarten nach Gefässverteilung, Dichte, gemessenen Holzstrahlanteilen und Holzstrahlstruktur (aus BURGERT et al. 2001, modifiziert).

bestimmt. In *Abbildung 1* sind die tangentialen und radialen Zug-Elastizitätsmoduln der Dichte und dem Holzstrahlanteil gegenübergestellt.

Zunächst lässt sich festhalten, dass der radiale Elastizitätsmodul deutlich höher als der tangentielle Elastizitätsmodul ist. Aus den Korrelations-Koeffizienten wird ersichtlich, dass sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung der Zug-Elastizitätsmodul höher mit der Raumdichtezahl als mit dem Holzstrahlanteil korreliert ist. In der radialen Beanspruchungsrichtung ist der Unterschied zwischen den Korrelationskoeffizienten jedoch deutlich geringer. Die Gegenüberstellung des radialen und des tangentialen Zug-Elastizitätsmoduls mit den Holzstrahlanteilen zeigt, dass in beiden Plots die Werte von Platane 1 und 2 (Holzstrahlanteil zwischen 35 und 40%) den Korrelationskoeffizienten verringern. Eine Eliminierung dieser Wertepaare führt bei den Korrelationen mit den Raumdichtezahlen nur zu einer geringfügigen Erhöhung.

Bei der Korrelation des tangentialen Elastizitätsmoduls mit dem Holzstrahlanteil steigt der Koeffizient jedoch deutlich auf $r = 0,64$. Bei der Korrelation des radialen Zug-Elastizitätsmoduls mit dem zugehörigen Holzstrahlanteil ist ein Anstieg auf $0,72$ zu verzeichnen, so dass bei Ausschluss der Platane in radialer Richtung Raumdichtezahl und Holzstrahlanteil in gleicher Höhe mit dem Elastizitätsmodul korreliert sind. Zur Zeit ist nicht erklärbar, warum die Platane dem beschriebenen Trend nicht folgt. Es ist aber anzunehmen, dass weitere Strukturmerkmale eine Rolle spielen.

Die Korrelationen der radialen und tangentialen Zugfestigkeitswerte mit Raumdichtezahlen sowie Holzstrahlanteilen sind in *Abbildung 2* wiedergegeben.

Der Vergleich von radialer und tangentialer Zugfestigkeit zeigt auch für diesen mechanischen Parameter die radiale «Vorzugsrichtung» des Holzes deutlich auf.

Die tangentielle Zugfestigkeit ist mit der Raumdichtezahl

deutlich höher korreliert als mit dem Holzstrahlanteil. Im Bezug auf die radiale Zugfestigkeit zeigen Dichte und Holzstrahlanteil eine gleich hohe und gute Korrelation. Eine Nichtberücksichtigung der Platane würde auch in diesem Fall insbesondere die Korrelation von radialer Zugfestigkeit und Holzstrahlanteil deutlich verbessern. Die Aussagekraft der Raumdichtezahl ist im Bezug auf die radiale Zugfestigkeit zweifelhaft. Die radialen Proben ringporiger Baumarten zerreißen bei der Zugfestigkeitsprüfung so gut wie ausschliesslich im Frühholz bzw. am Frühholzrand, die Proben zerstreutporiger Baumarten auch an der Jahrringgrenze, häufiger jedoch ungefähr in der Jahrringmitte, was auch KOLLMANN (1956) feststellt und anhand von Bildmaterial belegt.

Da bei den Ringporern das Frühholz konstant ist und das Spätholz bei unterschiedlichem Zuwachs variiert, führen breitere Jahrringe zu höheren Raumdichtezahlen. Trotzdem tragen auch die ringporigen Baumarten zu der guten Korrelation von radialer Zugfestigkeit und Raumdichtezahl bei. Da auch Zuwachs und Holzstrahlanteil innerhalb einer Baumart korreliert werden können (GREGORY 1977), ist anzunehmen, dass sich auch dieser Zusammenhang auf die Korrelation auswirkt.

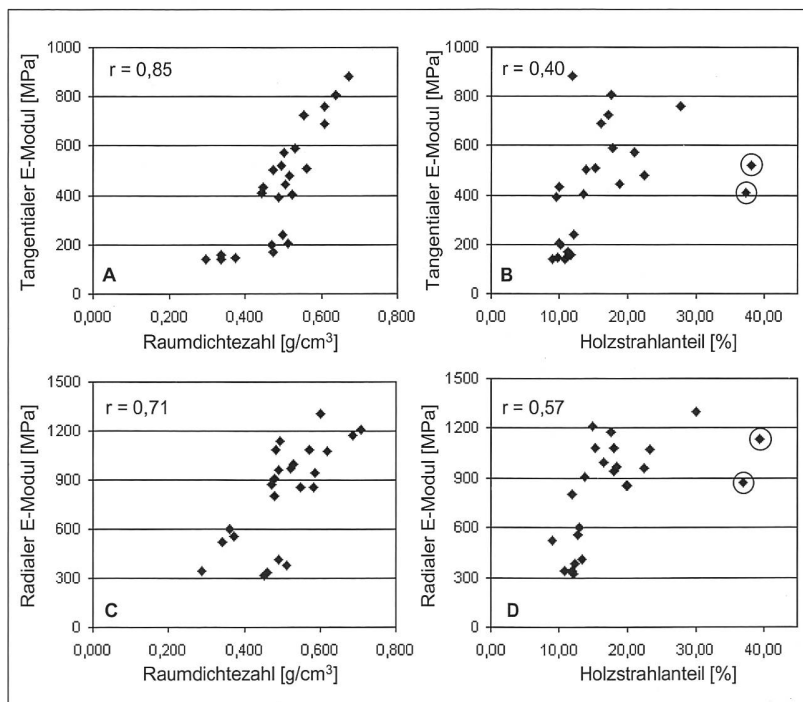


Abbildung 1: Gegenüberstellung von tangentialem Zug-Elastizitätsmodul und A) Dichte, B) Holzstrahlanteil sowie von radialem Zug-Elastizitätsmodul und C) Dichte, D) Holzstrahlanteil.

Mittelwerte aus 20 Einzelmessungen für 24 Bäume (12 Baumarten mit je 2 Bäumen); Wertepaare der Platane in B und D hervorgehoben (aus BURGERT et al. 2001, modifiziert).

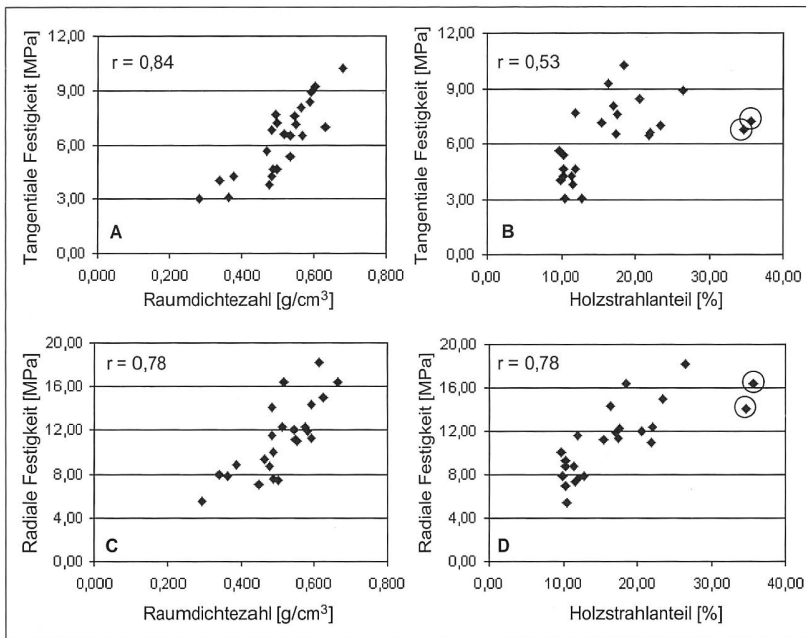


Abbildung 2: Gegenüberstellung von tangentialer Zugfestigkeit und A) Dichte, B) Holzstrahlanteil sowie von radialer Zugfestigkeit und C) Dichte, D) Holzstrahlanteil. Mittelwerte aus 50 Einzelmessungen für 24 Bäume (12 Baumarten mit je 2 Bäumen); Wertepaare der Platane in B und D hervorgehoben (aus BURGERT 2000, modifiziert).

Fazit

Die radialen Zugfestigkeiten und Zug-Elastizitätsmoduln sind bei allen Baumarten deutlich höher als die tangentialen Zugfestigkeiten und Zug-Elastizitätsmoduln. Ein Zusammenhang zwischen den radialen mechanischen Eigenschaften und dem Holzstrahlanteil ist gegeben, aber nicht eindeutig. Ursachen für die Uneindeutigkeit sind zum einen in der strukturellen Heterogenität der Baumarten zu suchen, welche über den Holzstrahlanteil hinausgeht. Beispielsweise sei hier der bereits diskutierte Einfluss der Gefäßverteilung auf die radiale Zugfestigkeit genannt. Darüber hinaus könnten Holzstrahlen auch baumartenspezifisch mechanische Eigenschaften aufweisen. Folglich kann eine detaillierte Erfassung des Einflusses der Holzstrahlen auf die radialen mechanischen Eigenschaften des Holzes nur innerhalb einer Baumart stattfinden.

4. Untersuchungsansatz 2: Heterogenität innerhalb einer Baumart

Wurzelanläufe können sich im Bereich des Übergangs vom Stamm zur Wurzel ausbilden. Im Sinne der Hypothese konstanter Spannungen von MATTHECK (1993) kann ihre Morphogenese als Adaption zur «weiche» Umlenkung von axialen Kräften im vertikalen Stamm in die horizontaleren Wurzelbereiche verstanden werden. Am Querschnitt eines Wurzelanlaufs wird die Analogie zur Wachstumsdynamik von Brettwurzeln, wie sie von STAHEL (1971) beschrieben wurde, deutlich. Eine erhöhte Kambialaktivität auf dem Scheitelpunkt des Wurzelanlaufs und eine Wachstumsdepression an den Seiten führen, da die Holzstrahlen stets senkrecht zur Jahrringgrenze verlaufen, zu einem typischen Holzstrahlmuster. In *Abbildung 3* ist für eine Buche neben der Wuchsform und des Querschnitts des Wurzelanlaufs auch eine schematische Darstellung der Jahrring-Holzstrahlstruktur abgebildet.

Da anzunehmen ist, dass im Wurzelanlauf radiale Zugspannungen auftreten, sind im Sinne des adaptiven Wachstums auch erhöhte radiale Zugfestigkeiten zu erwarten. Gleichzeitig weist die Auswertung des Querschnitts des Wurzelanlaufs darauf hin, dass sich aufgrund der Zuwachscharakteristik eine Häufung parallel orientierter Holzstrahlen im Inneren des Wurzelanlaufs einstellt. In diesem Sinne sollten sich aus einem Vergleich der radialen mechanischen Eigenschaften des Holzes aus Wurzelanläufen mit dem Referenzholz des Stammes weitere Rückschlüsse auf die mechanische Bedeutung der Holzstrahlen ziehen lassen (*Abbildung 4*). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich die Anatomie des Holzes und die Gestalt der Bäume aus mechanischen und physiologischen Funktionen ergibt.

Bei beiden Buchen liegen die radialen Zugfestigkeiten und Zug-Elastizitätsmoduln des Wurzelanlaufs deutlich über den Zugfestigkeiten und Zug-Elastizitätsmoduln des Stammes.

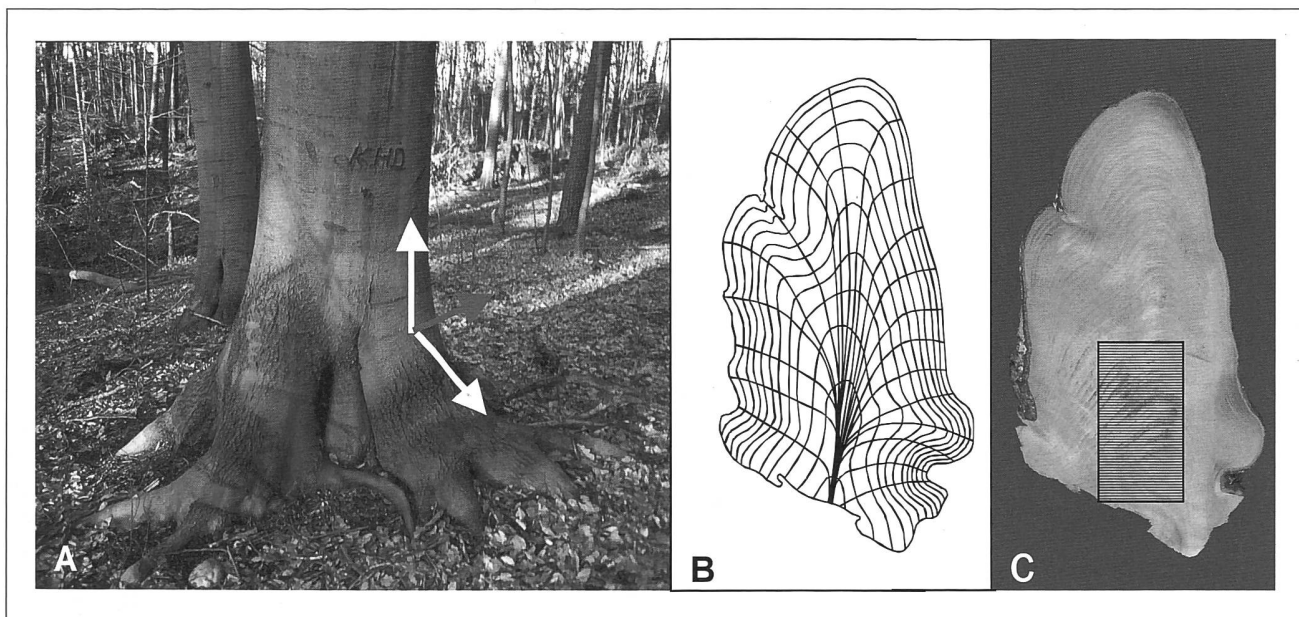


Abbildung 3: A) Wurzelanlauf einer Buche mit eingezeichnetem Kräfteparallelogramm zur Verdeutlichung der resultierenden radialen Zugkraft in Folge der Biegung des Stammes (vornehmlich Windlasten); B) schematische Darstellung der Jahrring-Holzstrahlstruktur im Querschnitt; C) Querschnitt durch einen Wurzelanlauf, Bereich der Probenentnahme markiert (aus BURGERT et al. 1999, modifiziert).

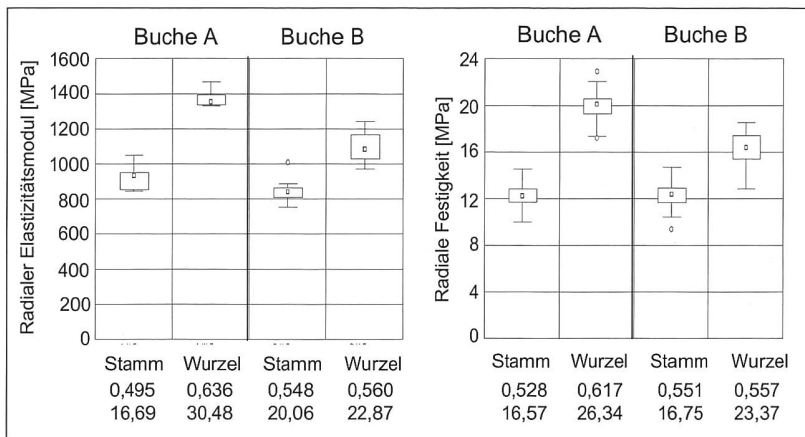


Abbildung 4: Radiale Festigkeiten und radiale Zug-Elastizitätsmodul des Holzes aus Wurzelanlauf und Stamm von zwei Buchen; Darstellung in Form von Box-and-Whisker-Plots; Basis je 10 Elastizitätsproben und 50 Festigkeitsproben (saftfrisch); zugehörige Raumdichtezahlen in g/cm³ und Holzstrahlanteile in % sind unterhalb der Plots angegeben (Radiale Festigkeiten aus BURGERT et al. 1999, modifiziert).

Beim Vergleich der Holzstrahlanteile von Wurzelanlauf und Stamm wird die Parallelität zu den mechanischen Parametern offensichtlich. Allerdings ist festzuhalten, dass auch die Raumdichtezahlen in Wurzelanlauf über den Vergleichswerten des Stammes liegen.

Fazit

Radiale Zugfestigkeit, radialer Zug-Elastizitätsmodul und der Holzstrahlanteil sind in querzugbeanspruchten Wurzelanläufen höher als in gewöhnlich beanspruchten Stämmen. Daraus lässt sich ein positiver Einfluss der Holzstrahlen auf die radialen mechanischen Eigenschaften des Holzes ableiten. Jedoch folgt die Dichte dem gleichen Trend, so dass ein überwiegender Einfluss des Axialgewebes weiterhin nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann.

5. Untersuchungsansatz 3: Zugfestigkeit isolierter Holzstrahlen

Eine präzise Behandlung der Thematik basierend auf den Ergebnissen der vorangehenden Untersuchungsansätze erfordert die mechanische Prüfung einzelner Holzstrahlen. Zu diesem Zweck wurden grosse Holzstrahlen der Buche mit einem Präzisionsbohrer aus dem Gewebeverbund isoliert. Detaillierte Angaben zur Methodik der Holzstrahl-Freilegung sind in

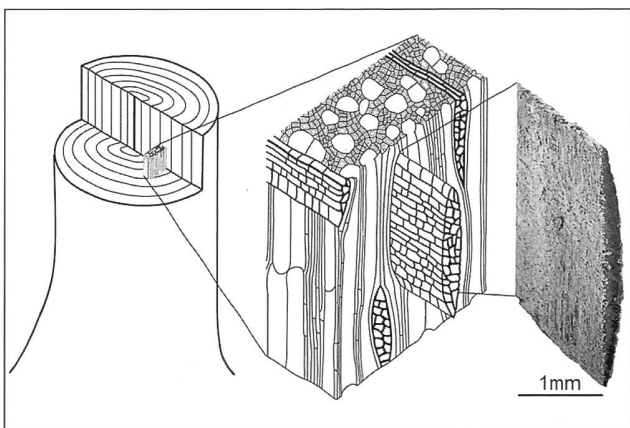


Abbildung 5: Der «Weg» eines Holzstrahls aus dem Gewebeverbund des Baumes. Schematische Darstellung der Holzstruktur der Buche und elektronenmikroskopisches Bild (SEM) des isolierten Holzstrahls (aus BURGERT & ECKSTEIN 2001).

BURGERT & ECKSTEIN (2001) zu finden. In *Abbildung 5* ist der «Weg» der Holzstrahlisolierung schematisch dargestellt.

Die isolierten Holzstrahlen wurden in Zugjoch gelehmt und auf ihre Zugfestigkeit in ihrer axialen Richtung (radiale Richtung im Baum) in getrocknetem Zustand geprüft. Dabei wurden von vier Bäumen je fünf Holzstrahlen getestet (*Tabelle 2*).

Die mittlere Zugfestigkeit der Holzstrahlen liegt bei 78,79 MPa und damit weit höher als die radiale Zugfestigkeit des Vollholzes der Buche. GOULET (1960) ermittelte für Buchenvollholz bei einer Holzfeuchte von 12% eine radiale Zugfestigkeit von 18,5 MPa. Da anzunehmen ist, dass die Holzstrahlen bei einem Anteil von etwa 20% massgeblich zu dieser Zugfestigkeit beitragen, muss der Unterschied zur radialen Zugfestigkeit des holzstrahlfreien Axialgewebes noch deutlich höher sein.

Tabelle 2: Kraft F, Querschnittsfläche A und resultierende Festigkeit σ der grossen Buchenholzstrahlen von vier Bäumen (aus BURGERT & ECKSTEIN 2001, modifiziert).

Holzstrahl	Buchel 1			Holzstrahl	Buchel 2		
	F [N]	A [mm ²]	σ [MPa]		F [N]	A [mm ²]	σ [MPa]
1	9,05	0,169	53,55	1	15,00	0,156	96,15
2	34,97	0,516	67,77	2	8,23	0,141	58,37
3	13,99	0,163	85,33	3	7,25	0,134	54,10
4	13,26	0,154	86,10	4	5,76	0,064	90,00
5	23,65	0,310	76,29	5	14,50	0,235	61,70
\bar{x}			73,91	\bar{x}			72,07
s			13,68	s			19,49
V			18,5%	V			27,0%

Holzstrahl	Buchel 3			Holzstrahl	Buchel 4		
	F [N]	A [mm ²]	σ [MPa]		F [N]	A [mm ²]	σ [MPa]
1	20,33	0,231	88,01	1	9,55	0,143	66,78
2	18,02	0,218	82,66	2	9,63	0,127	75,83
3	12,42	0,137	90,66	3	6,89	0,062	111,13
4	14,69	0,166	88,49	4	4,80	0,070	68,57
5	17,40	0,224	77,68	5	9,61	0,100	96,10
\bar{x}			85,50	\bar{x}			83,68
s			5,27	s			19,26
V			6,2%	V			23,0%

Fazit

Holzstrahlen besitzen eine deutlich höhere radiale (für den Holzstrahl axiale) Zugfestigkeit als das Axialgewebe. Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus den beiden vorangehenden Untersuchungsansätzen ist davon auszugehen, dass auch der radiale Zug-Elastizitätsmodul der Holzstrahlen grösser ist als der radiale Elastizitätsmodul des Axialgewebes. Daraus lässt sich folgern, dass Holzstrahlen neben ihren physiologischen Funktionen auch mechanische Funktionen im Baum wahrnehmen.

6. Interpretation und Perspektive

Unter mechanischen Gesichtspunkten ist der Baum und damit auch die Holzstruktur auf die Kompensation axialer Biegebeanspruchungen (vornehmlich durch Windlasten verursacht) ausgerichtet (McMAHON 1973, 1975). Im axialen Festigungsgewebe wird dies insbesondere durch die Zellgeometrie als auch durch die Mikrofibrillenorientierung in der Sekundärwand 2 dokumentiert. Folglich beanspruchen aber transver-

sale Kräfte das Festigungsgewebe in einer strukturell wenig optimierten Richtung. Entsprechend ihrer Orientierung im Baum ist anzunehmen, dass Holzstrahlen dafür Sorge tragen, dass das bei transversaler Beanspruchung anfällige Axialgewebe bei radialen Zugspannungen nicht separiert wird. Die im zweiten Untersuchungsansatz geprüften Wurzelanläufe zeigen zum einen, dass die radiale Zugfestigkeit im lebenden Baum sehr hoch sein kann und zum anderen, im Sinne eines adaptiven Wachstums, dass unter eben solchen Belastungen ein erhöhter Holzstrahlanteil vorliegt.

Die radiale Armierung des Axialgewebes basiert allerdings nicht allein auf den radialen elastomechanischen Eigenschaften der Holzstrahlen. BURGERT *et al.* (2003) konnten zeigen, dass Holzstrahlen in der radialen Richtung des Baumes Wachstumsspannungen generieren. Durch diese radialen Zugspannungen wird das Axialgewebe unter Druckbeanspruchung gesetzt. Damit ist das in der radialen Richtung wenig zugfeste Axialgewebe zusätzlich gegen ein Zugversagen geschützt.

Im Sinne einer biomechanischen Betrachtung lässt sich festhalten, dass insbesondere die aufgezeigte Multifunktionalität der Holzstrahlen bemerkenswert ist. Oftmals wurden bisher biologische Gewebe lediglich nach einem monofunktionalen Schema geordnet (physiologische Funktion oder mechanische Funktion). Der Preis für dieses vereinfachende Ordnungsprinzip ist allerdings hoch, denn die Vielfalt eines optimierten Designs in der Natur kann auf diese Weise nicht erfasst werden. Im skizzierten Belastungsfall profitiert der Baum insbesondere von der Diversifizierung seiner Gewebe. Die offensichtlichen Vorteile eines solchen Strukturdesigns sollten prinzipiell als Vorbild für technische Anwendungen dienen können.

Zusammenfassung

Der Aufsatz fasst drei Untersuchungsansätze bezüglich einer mechanischen Bedeutung der Holzstrahlen zusammen. Dabei soll aufgezeigt werden, dass Holzstrahlen neben ihren physiologischen Funktionen auch massgeblich zur radialen Zugfestigkeit beitragen. In der ersten Untersuchung wurden insgesamt zwölf Laubbaumarten mit unterschiedlichen Holzstrahlanteilen auf ihre transversalen Festigkeiten und Steifigkeiten geprüft. Der zweite Untersuchungsansatz basiert auf dem Vergleich der radialen mechanischen Eigenschaften von Holz mit sehr hohen Holzstrahlanteilen und Referenzholz mit normalen Gewebeanteilen innerhalb der Buche. Während sich aus den ersten beiden Untersuchungsansätzen eine mechanische Bedeutung der Holzstrahlen nur indirekt folgern lässt, wurde abschliessend mit der Isolierung von grossen Holzstrahlen der Buche und ihrer mechanischen Prüfung ein direkter Nachweis geführt. Die Ergebnisse werden auf Basis ihrer biomechanischen Bedeutung diskutiert. Dabei wird zum einen die Notwendigkeit einer radialen Armierung des Holzes im lebenden Baum unterstrichen. Darüber hinaus wird auf Basis der angeführten Ergebnisse das Prinzip der Multifunktionalität biologischer Gewebe betont und dessen Bedeutung bezüglich möglicher Übertragungen auf technische Anwendungen hervorgehoben.

Summary

The mechanical relevance of wood rays

Three investigations into the mechanical relevance of wood rays were combined for this article. The main objective was to show, that, apart from physiological functions, rays also signif-

icantly influence the radial strength and stiffness of wood. In the first approach twelve deciduous tree species with various proportions of fractions of rays were examined for their transverse tensile strength and stiffness. The second approach was based on the comparison of the radial mechanical properties of wood with a very high proportion of fraction of rays and beech wood with a normal volume. In these two investigations the mechanical relevance of rays could only be deduced indirectly. By isolating big rays of beech and carrying out tensile tests on the tissue, we found direct evidence for the mechanical relevance. The results are discussed with regard to their biomechanical relevance. The importance of a radial reinforcement for the wood is underlined. Moreover, the principle of multi-functionality in nature is emphasized in keeping with a possible transfer of biological design to technical solutions.

Résumé

De l'importance mécanique des rayons ligneux

Trois méthodes d'investigation de l'importance mécanique des rayons ligneux ont été combinées pour notre étude. L'objectif principal était de montrer que, leurs fonctions physiologiques mises à part, les rayons influencent de manière significative la résistance à la traction radiale. En premier lieu, les contraintes transversales et la rigidité de bois ayant des fractions volumiques des rayons variées ont été examinées dans le cas de 12 espèces différentes. La seconde approche s'est basée sur la comparaison des propriétés mécaniques radiales de bois de référence avec du bois ayant une importante fraction volumique des rayons, dans le cas du hêtre. Ces deux méthodes ne permettent de déduire qu'indirectement les fonctions mécaniques des rayons. Celles-ci pourront être directement déterminées en isolant de grands rayons de bois de hêtre et en réalisant des essais de traction sur ces tissus. Les résultats sont discutés du point de vue de leur signification biomécanique. L'importance d'un renforcement radial du bois a ainsi été mis en évidence. De plus, le principe de la multifonctionnalité des tissus biologiques a été souligné et ses applications techniques possibles, discutées.

Literatur

- BEERY, W.H.; IJFU, G.; MCLAIN, E. 1983: Quantitative wood anatomy – relating anatomy to transverse tensile strength. *Wood and Fiber Science* 15: 395–407.
- BEL, VAN, A.J.E. 1990: Xylem – phloem exchange via the rays: the undervalued route of transport. *Journal of Experimental Botany* 41: 631–644.
- BRAUN, H.J. 1967: Entwicklung und Bau der Holzstrahlen unter dem Aspekt der Kontakt-Isolations-Differenzierung gegenüber dem Hydrosystem. I. Das Prinzip der Kontakt-Isolations-Differenzierung. *Holzforschung* 21: 33–37.
- BURGERT, I. 2000: Die mechanische Bedeutung der Holzstrahlen im lebenden Baum. Dissertation im Fachbereich Biologie der Universität Hamburg, 173 S.
- BURGERT, I.; BERNASCONI, A.; ECKSTEIN, D. 1999: Evidence for the strength function of rays in living trees. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57: 397–399.
- BURGERT, I.; BERNASCONI, A.; NIKLAS, K.J.; ECKSTEIN, D. 2001: The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees. *Holzforschung* 55: 449–454.

- BURGERT, I.; ECKSTEIN, D. 2001: The tensile strength of isolated wood rays of beech (*Fagus sylvatica* L.) and its significance for the biomechanics of living trees. *Trees* 15: 168–170.
- BURGERT, I.; OKUYAMA, T.; YAMAMOTO, H. 2003: Generation of radial growth stresses in the big rays of konara oak trees. *Journal of Wood Science* 49: 131–134.
- FRATZL, P. 1999: Biologische Materialien – dem Bauplan natürlicher Hochleistungswerkstoffe auf der Spur. *Physik in unserer Zeit* 30: 196–200.
- FREY-WYSSLING, A.; BOSSHARD, H.H. 1959: Cytology of the ray cells in sapwood and heartwood. *Holzforschung* 13: 129–137.
- FUKAZAWA, K.; HIGUCHI, T. 1966: Studies on the mechanism of heartwood formation. IV. RNA content in the ray parenchyma cell. *Mokuzai Gakkaishi* 12: 221–225.
- FUTO, L.P. 1969: Qualitative und quantitative Ermittlung der Mikrozeigenschaften von Holz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 27: 192–201.
- FUTO, L.P.; BOSSHARD, H.H. 1986: Über die Schwindungsanisotropie von Buchenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 44: 459–463.
- GOULET, M. 1960: Die Abhängigkeit des Quersugfestigkeit von Eichen-, Buchen- und Fichtenholz von Feuchtigkeit und Temperatur im Bereich 0–100 °C. *Holz als Roh- und Werkstoff* 18: 325–331.
- GREGORY, R.A. 1977: Cambial activity and ray cell abundance in *Acer saccharum*. *Canadian Journal of Botany* 55: 2559–2564.
- HARADA, H. 1965: Ultrastructure of angiosperm vessels and ray parenchyma. In: Cote, W.A. (ed.), *Cellular ultrastructure of woody plants*. Syracuse University Press, New York, 235–249.
- HARMS, U.; SAUTER, J.J. 1992: Localization of a storage protein in the wood ray parenchyma cells of *Taxodium distichum* (L.) L.C. Rich. by immunogold labeling. *Trees* 6: 37–40.
- KAWAMURA, Y. 1979: Studies on the properties of rays (I): Influence of rays on anisotropic shrinkage of wood (1). *Mokuzai Gakkaishi* 25: 455–460.
- KAWAMURA, Y. 1984a: Studies on the properties of rays (II): Mean micelle angles and physical properties of broad rays. *Mokuzai Gakkaishi* 30: 201–206.
- KAWAMURA, Y. 1984b: Studies on the properties of rays (III): Influence of rays on anisotropic shrinkage of wood (2). *Mokuzai Gakkaishi* 30: 785–790.
- KELLER, R.; THIERCELIN, F. 1975: Influence des gros rayons ligneux sur quelques propriétés du bois de hêtre. *Annals of Forest Science* 32: 113–129.
- KOLLMANN, F. 1956: Untersuchungen über die Quersugfestigkeit der Hölzer. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 75: 304–318.
- LICHTENEGGER, H.; REITERER, A.; STANZL-TSCHEGG, S.E., FRATZL, P. 1999: Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods – A possible strategy of mechanical optimization. *Journal of Structural Biology* 128: 257–269.
- LINDSAY, F.W.; CHALK, L. 1954: The influence of rays on the shrinkage of wood. *Forestry* 27: 16–25.
- MATTHECK, C. 1993: *Design in der Natur*. 2. Aufl., Rombach Verlag, Freiburg, 242 S.
- MATTHECK, C., ALBRECHT, W., DIETRICH, F. 1994: Die Biomechanik der Holzstrahlen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 165: 143–147.
- MATTHECK, C.; KUBLER, H. 1995: *Wood – the internal optimization of trees*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 126 S.
- MCINTOSH, D.C. 1954: Some aspects of the influence of rays on the shrinkage of wood. *Forest Products Journal* 4: 39–42.
- MCINTOSH, D.C. 1955: Shrinkage of red oak and beech. *Forest Products Journal* 5: 355–359.
- MCMAHON, T.A. 1973: Size and shape in biology. *Science* 179: 1201–1204.
- MCMAHON, T.A. 1975: The mechanical design of trees. *Scientific American* 233: 93–102.
- NIKLAS, K.J. 1992: *Plant biomechanics*. Chicago Univ. Press, Chicago, 607 S.
- SAUTER, J.J.; VAN CLEVE, B. 1994: Storage, mobilization and interrelations of starch, sugars, protein and fat in the ray storage tissue of poplar trees. *Trees* 8: 297–304.
- SCHMITT, U.; LIESE, W. 1993: Response of xylem parenchyma by suberization in some hardwoods after mechanical injury. *Trees* 8: 23–30.
- SCHNIEWIND, A.P. 1959: Transverse anisotropy of wood: a function of gross anatomic structure. *Forest Products Journal* 9: 350–359.
- SHIGO, A.L.; SHIGO, A. 1974: Detection of discoloration and decay in living trees and utility poles. USDA Forest Service; Research Paper N.E.-294 Upper Darby, Pennsylvania, 11 S.
- STAHEL, J. 1971: Anatomische Untersuchungen an Brettwurzeln von *Khaya ivorensis* A. Chev. und *Piptadeniastrum africanum* (Hook f.) Brenan. *Holz als Roh- und Werkstoff* 29: 314–318.
- VINCENT, J.F.V. 2002: Survival of the cheapest. *Materials Today* 5: 28–41.

Dank

Die vorgestellten Arbeiten wurden in den Jahren 1996 bis 2000 am Ordinariat für Holzbiologie der Universität Hamburg durchgeführt. Mein Dank gilt Professor Dr. D. Eckstein und Dr. A. Bernasconi für ihre Unterstützung.

Autor

Dr. INGO BURGERT, Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Abteilung Biomaterialien, DE-14424 Potsdam.