

Holz Roh Werkst (2004) 62:93–100
DOI 10.1007/s00107-003-0443-0

ORIGINALARBEITEN · ORIGINALS

M. Scheffler · P. Niemz · M. Diener · V. Lustig ·
H.-J. Hardtke

Untersuchungen zur Ermittlung der Bruchzähigkeit an Laubholz in den Rissöffnungsmodi I und II

Online veröffentlicht: 5 März 2004
© Springer-Verlag 2004

Zusammenfassung Es werden die Ergebnisse zur Bestimmung der Bruchzähigkeit an Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche (*Quercus Robur* L.) sowie Buche im Mode II vorgestellt. Verwendung fand die Kompaktzugprobe (CT-Probe) für Mode I und die CTS Probe für Mode II. Es werden Ergebnisse für den Einfluss von Holzfeuchte, Rohdichte und Jahrringlage vorgestellt. Zusätzlich wurden die Schallemissionen beim Bruch aufgezeichnet und REM-Aufnahmen angefertigt. Ergänzend zu den Bruchzähigkeiten werden verschiedenen Ansätze für Bruchgrenzkurven untersucht. Die Ergebnisse für Modus I stimmen gut mit denen aus der Untersuchung an der CT-Probe überein. Weiterhin werden verschiedene Ansätze zu Bruchgrenzkurven diskutiert und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

Fracture toughness from hardwood in mode I and II

Abstract The results of fracture toughness tests on oak and beech are presented. The results are divided into the parts: influence of moisture on fracture toughness, influence of density and annular rings. Moreover the acoustic

emissions during the cracking were measured and electron microscopic photos were taken. The results of fracture toughness tests on beech wood are presented. The specimen geometry was a CTS specimen, developed by Richard. The results of fracture toughness of modus I are similar to those of CT specimen experiments. Furthermore the mixed mode results are discussed and compared to theoretical fracture envelopes.

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen zum Bruchgeschehen bei ausgewählten Holzarten sowohl im Bruchmodus I als auch im Modus II (z.B. Stahlberg 1978; Logemann und Schelling 1992; Tschegg et al. 1996; Aicher 2002; Gustafson 2002) durchgeführt. Zudem gibt es immer mehr theoretische Untersuchungen zur Bruchentstehung und Anwendung linearer wie auch nicht-linearer Theorien.

Einen guten Überblick über bruchmechanische Theorien mit ihrer Anwendung auf den Werkstoff Holz geben Ranta-Maunus et al. (1991). Dort wird die Ansicht vertreten, dass bruchmechanische Theorien, insbesondere bei technologischen Prozessen wie der Holz Trocknung, breitere Anwendung finden sollten.

Die Rissentstehung als Untersuchungsgegenstand der Materialwissenschaft wird auf lokal inhomogenes Werkstoffverhalten zurückgeführt. Bei Annahme von Sprödbbruchverhalten wird im weiteren die linear elastische Bruchmechanik vorausgesetzt. Die linear elastische Bruchmechanik nimmt die Existenz von Defekten im Werkstoff an. Diese Defekte oder auch „Ungängen“ können durch die Bearbeitung, durch Wuchseinflüsse oder andere lokale Strukturabweichungen im Holz vorhanden sein. Die Vorgehensweise der Bruchmechanik zur Bewertung von Defekten besteht prinzipiell aus zwei aufeinanderfolgenden Schritten:

1. der Ermittlung charakteristischer Größen zur Rissbeurteilung aus Geometrie und Belastung für ein rissbehaftetes Bauteil und

M. Scheffler
Institut für Festkörpermechanik,
Lehrstuhl für Maschinendynamik und Schwingungslehre,
TU Dresden, Dresden, Deutschland

P. Niemz (✉)
Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion,
ETH Zürich, ETH Zentrum NO F47, 8092 Zürich, Schweiz
E-Mail: niemz@fowi.ethz.ch
Fax: +41-1-6321144

M. Diener
Institut für Metallforschung und Metallurgie,
Departement Werkstoffe, ETH Zürich, Zürich, Schweiz

V. Lustig
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik,
TU Dresden, Dresden, Deutschland

H.-J. Hardtke
Institut für Festkörpermechanik,
Lehrstuhl für Maschinendynamik und Schwingungslehre,
TU Dresden, Dresden, Deutschland

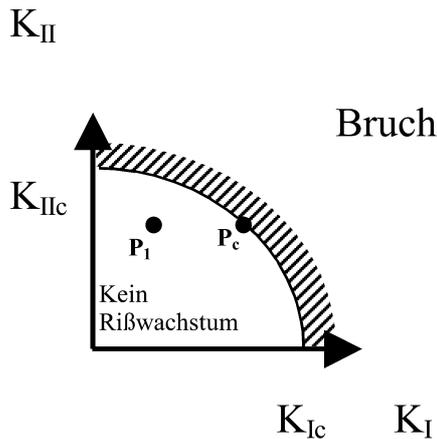


Abb. 1 Bruchgrenzkurve theoretisch (P_1 kein Bruch; P_c Bruch ist möglich)

Fig. 1 Mixed mode problematics (P_1 no crack; P_c cracking is possible)

2. anschließendem Vergleich mit einem Werkstoffkennwert (Bruchkriterium).

Das Bruchkriterium kann dann die Basis für die Bewertung kritischer Risslängen oder zulässiger Belastungen wie im Trocknungsprozess bilden.

Die vorliegenden Untersuchungen dienen als Basis für die Simulation der Entstehung von Trocknungsrissen mittels FEM Methoden.

Im Rahmen der Bruchmechanik unterscheidet man bei der Ermittlung des Beanspruchungszustandes an der Risspitze drei grundlegende Rissöffnungsarten oder Modi. Modus I bezeichnet eine Beanspruchung, die eine symmetrische Öffnung des Risses „Spaltungsriss“ bewirkt. Im Modus II gleiten die Rissflächen (Rissflanken) entgegengesetzt aufeinander, es entsteht der „Längsschubriss“. Modus III ist durch ein Gleiten der Flächen aus der Rissebene heraus—„Querschubriss“—gekennzeichnet. Mischformen der verschiedenen Modi werden auch mit „Mixed-Mode“ (Mischmodus) bezeichnet.

Die zunächst durchgeführten Arbeiten zu Modus I waren Basis für die Untersuchung des Bruchverhaltens unter kombinierter Zug- und Schubbeanspruchung in der RT - und TR -Ebene—Modus II. Diese Arbeiten wurden auf Rotbuche begrenzt. Zu Modus I wurden vergleichend die Kennwerte für Eiche bestimmt.

Das Spannungsfeld in der Nähe der Risspitze kann durch die Spannungsintensitätsfaktoren K_I und K_{II} mit den kritischen Werten K_{Ic} und K_{IIc} gekennzeichnet werden (Richard 1985). Sinnvoll ist es, die Mischmodus-Problematik in einem K_I - K_{II} -Diagramm darzustellen (Abb. 1). Im Diagramm ist eine materialabhängige Grenzkurve, die Bruchkurve, eingezeichnet. Außerhalb der durch die

Tabelle 1 Klimata und resultierende Holzfeuchten u
Table 1 Climates and resulting humidities u

Klima (Temperatur T , Luftfeuchte ϕ)	Feuchte ca. $u/\%$
$T=20^\circ\text{C}$, $\phi=35\%$	8
$T=20^\circ\text{C}$, $\phi=65\%$	14
$T=0^\circ\text{C}$, $\phi=95\%$	18
$T=20^\circ\text{C}$, $\phi=99\%$	28
Wasserlagerung	40..60

Kurve begrenzten Fläche ist der Beginn des instabilen Risswachstums zu erwarten.

2 Versuchsmaterial und -durchführung

2.1 Versuchsmaterial

Versuchsmaterial waren Rotbuche und Eiche. Ein Teil der Buche stammte aus dem Erzgebirge/Deutschland mit einer Dichte $\rho \approx 0,73 \text{ g/cm}^3$, ein anderer aus der Schweiz ($\rho \approx 0,61 \text{ g/cm}^3$). Weiterhin wurde aus Eiche ($\rho \approx 0,59 \text{ g/cm}^3$) untersucht. Die Holzfeuchte wurde über einen Klimaschrank eingestellt (Tabelle 1).

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Mode I

Die Versuche wurden an der ETH Zürich (Institut für Metallforschung und Metallurgie) an den für die Prüfung von metallischen Werkstoffen bekannten CT-Poben nach ASTM E 399 durchgeführt (siehe Niemz et al. 1997).

Eine 37 mm-Kerbe wurde in die Proben mittels Kreissäge während der Probenherstellung eingebracht, das Endmaß von ca. 38 mm wurde durch einen Messerzusschnitt direkt vor Versuchsbeginn erreicht.

Die Versuche wurden in einer servohydraulischen Prüfmaschine Bauart SCHENCK bei Abzugsgeschwindigkeiten von 0,1 mm/min...1,0 mm/min gefahren, der größte Teil der Proben bei 1,0 mm/min. Die minimale Prüflast P_{min} 100 N wurde als Vorlast aufgebracht, um mögliches Spiel in der Lagerung und damit Nichtlinearitäten zu vermeiden. Die Lasten wurden während der Versuche maschinenintern aufgezeichnet, die Kerbaufweitung („COD—crack opening displacement“) wurde mit einem Wegaufnehmer („clip on-gage“) gemessen. Die Steuerung der Versuche und die Auswertung der Messdaten erfolgte über die eigene Software des Institutes für Metallforschung und Metallurgie.

Der Winkel zwischen Jahrringen und Kraft Φ wurde entsprechend Abb. 2 gemessen, wobei die von einigen Autoren berücksichtigte unterschiedliche Krümmung der Jahrringe bezüglich des Risses und die daraus resultierende Unterscheidung in positiv („+“) und negativ („-“) gekrümmte Proben nicht angewandt wurde.

Nach ASTM E 399 wurde der Proportionalitätsbereich im Last-Kerbaufweitung-Verlauf bei 5%...95% ermittelt, dabei bei 95% die Last P_Q als Äquivalent der instabilen Rissausbildung bestimmt. Damit kann K_{Ic} berechnet werden:

$$K_{Ic} = \frac{P_Q}{d \cdot \sqrt{b}} \cdot Y(a, b) \quad (1)$$

$$Y = \frac{\left(2 + \frac{a}{b}\right) \cdot \left[0,886 + 4,64 \frac{a}{b} - 13,32 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{b}\right)^{1,5}} \quad (2)$$

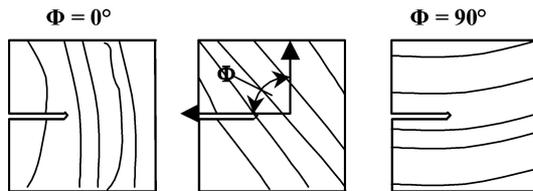


Abb. 2 Messung des Winkels Φ zwischen Jahrringen und Last (P)
Fig. 2 Measurement of angle Φ between grain and force (P)

Y Geometriefaktor
 d Probendicke
 a Risslänge
 b Probenweite (50 mm)

Die Gl. 1 und 2 geben die Ermittlung von K_{Ic} für einen isotropen Werkstoff an, können näherungsweise aber auch für orthotrope Werkstoffe wie Holz benutzt werden, eigene FEM-Rechnungen an einem Modell der CT-Probe belegen das. Die Streuung der Ergebnisse der Finite-Element-Analyse bei unterschiedlichen Auswertverfahren für K_{Ic} lag im Bereich der Abweichungen der Messergebnisse.

Zusätzlich zur Wegmessung wurden Schallemissionsmessungen mit einem direkt an der Risspitze angebrachten Aufnehmer und einem AE3-Messplatz des Fraunhofer-Institutes für zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Saarbrücken, Außenstelle Dresden angefertigt, um Aussagen zur Anwendung der Schallemission für die Trocknungsregelung bei Buche und Eiche machen zu können.

2.2.2 Mode II

Die Prüfung erfolgte an der CTS-Probe nach Richard. Es wurden für die RT -Ebene 45 Proben, die in Normalklima gelagert waren, untersucht. Für die Abschätzung einer Bruchgrenzkurve in der TR -Ebene wurden 23 Proben untersucht. Die mittlere Holzfeuchte aller Proben betrug 11,4%.

Die von Richard vorgeschlagenen Verhältnisse zwischen Probenweite w , -breite b und -dicke t der Probe wurden eingehalten.

Die Untersuchungen wurden an einer Prüfmaschine (System Zwick) durchgeführt. Die Abzugsgeschwindigkeit wurde auf 0,1 mm/min bis 1 mm/min eingestellt, die Vorlast P war 20 N.

Neben der maschinenintern gemessenen Kraft P wird die Kerbaufweitung u_1 und u_2 versetzt in zwei Richtungen im Winkel von $56,4^\circ$ zu den Rissflanken gemessen. Zur Messung von P wurde eine Kraftmessdose von 2 kN und zur Wegmessung der Verschiebungen der eigens konstruierte Wegaufnehmer genutzt. Sowohl Kraft- als auch Wegsignal wurden über ein Hottinger Baldwin Messgerät gespeichert.

Wie bei den Versuchen im Modus I wird bis zum Anriss belastet und die zugehörige Kraft P_Q gemessen.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Mode I

Typische Last-Kerbaufweitungs-Verläufe in Abhängigkeit von der Holzfeuchte zeigt Abb. 3. Dabei ist der Einbruch der Kurven kurz vor dem Bruch—“pop-in“-Effekt genannt—in sehr trockenem Holz ($u=8\%$) zu erkennen. Dieser ist nach Logemann et al. (1992) „typisch“ für Holz, aber bei Buche und Eiche nicht so gut sichtbar wie bei der durch Logemann untersuchten Fichte. Bei höheren Feuchten ist der Effekt gar nicht mehr sichtbar.

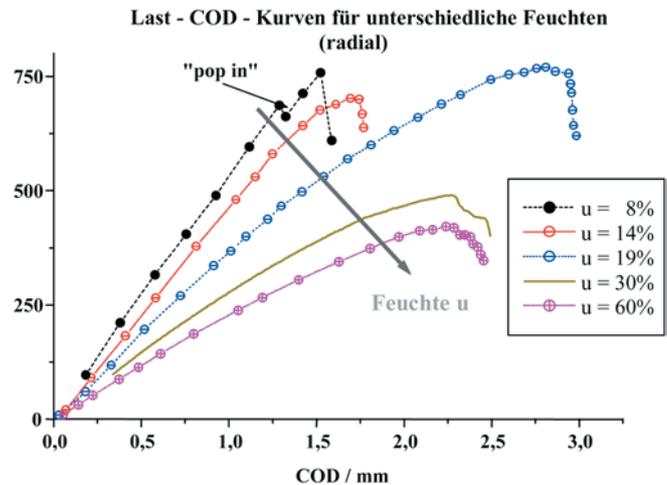


Abb. 3 Last-Rissaufweitungsverläufe in Abhängigkeit von der Holzfeuchte u

Fig. 3 Force versus crack opening displacement in dependence on moisture u

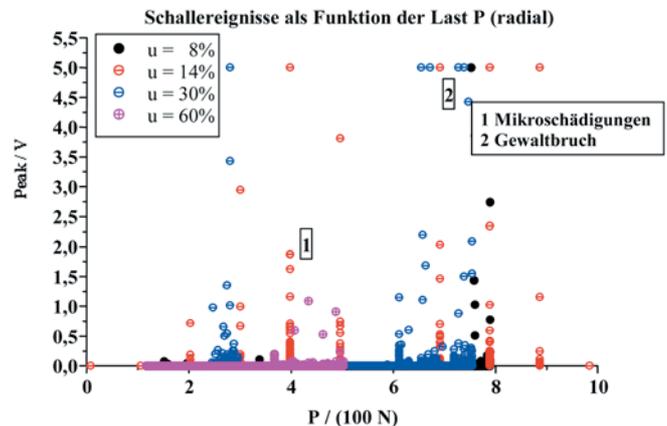


Abb. 4 Schallereignisse bei verschiedenen Holzfeuchten in Abhängigkeit von der Last P für Buche

Fig. 4 Acoustic emission vs. force P in dependence on moisture u for beech

Die Verläufe der Schallemissionsmessungen zeigen einen ähnlichen Befund (Abb. 4). Für die Kurven unterhalb des Fasersättigungsbereiches ($u \approx 28\%$) zeigen sich über den gesamten Kurvenverlauf Mikroschädigungen, die bereits im Vorfeld der instabilen Rissausbreitung den Gewaltbruch ankündigen (Bereich 1).

Bei Erreichen eines durch die unterschiedlichen Feuchten variierenden Lastniveaus werden Schallereignisse emittiert. Später kommen Ereignisse mit höherer Amplitude hinzu (Bereich 2), nach dem Spröbruch werden kaum noch Signale emittiert.

Bei Eiche ergab sich ein analoger Befund. Diese Auswertung zeigt, daß der Nutzung der Schallemission für die Überwachung der Holztrocknung von Eiche und Buche im Gegensatz zu Fichte sehr enge Grenzen gesetzt sind, denn gerade in dem Feuchtebereich, der bei der Trocknung für die Rissentstehung relevant ist, sind wenig

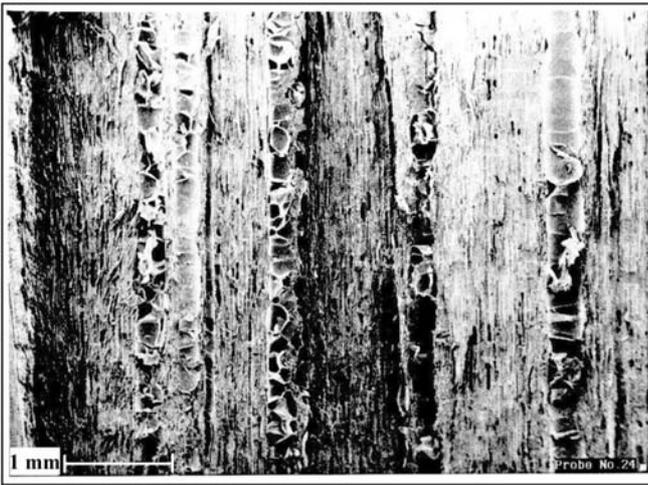


Abb. 5 „Sprödbbruch“ bei Eiche
Fig. 5 Brittle fracture in oak

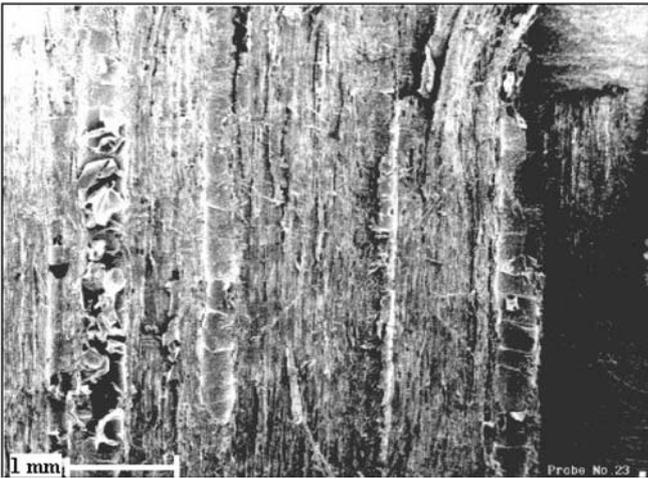


Abb. 6 „Zähbruch“ bei Eiche
Fig. 6 Tough fracture in oak

signifikante Schallereignisse messbar. „Die Fichte stöhnt bei Überdruck besonders laut, sagen die Bergleute; eine Warnung, die vielen von ihnen das Leben gerettet hat.“ (Deutscher Forstverein 2002)

Für Holz mit Feuchten oberhalb des Fasersättigungsbereiches werden auch beim Bruch kaum Signale emittiert, ähnlich wie beim Zähbruch von metallischen Werkstoffen. Die Abb. 5 und 6 zeigen REM-Aufnahmen—„Sprödbbruch“ und „Zähbruch“—von Eichenholz. Während beim Sprödbbruch eine glatte Bruchfläche mit parallelem Faserverlauf entsteht, sind beim Zähbruch zerfaserte Bruchflächen erkennbar.

Die Versuchsergebnisse weisen die für Holz typischen großen Streuungen auf, wobei die Streuungen bei höheren Holzfeuchten noch größer werden.

Die Holzfeuchte beeinflusst die Bruchzähigkeit stark (Abb. 7 und 8, Tabelle 2). Für Eiche konnte infolge der geringen Probenanzahl lediglich ein Graph für $\Phi=45^\circ$

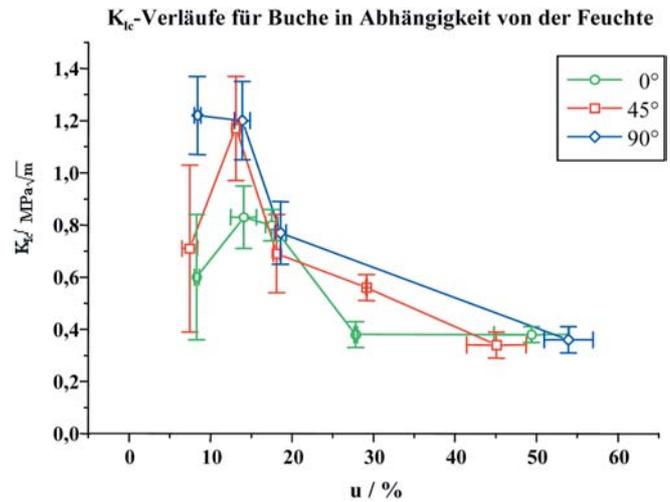


Abb. 7 K_{Ic} in Abhängigkeit von der Holzfeuchte u (Buche)
Fig. 7 K_{Ic} in dependence on moisture u (beech)

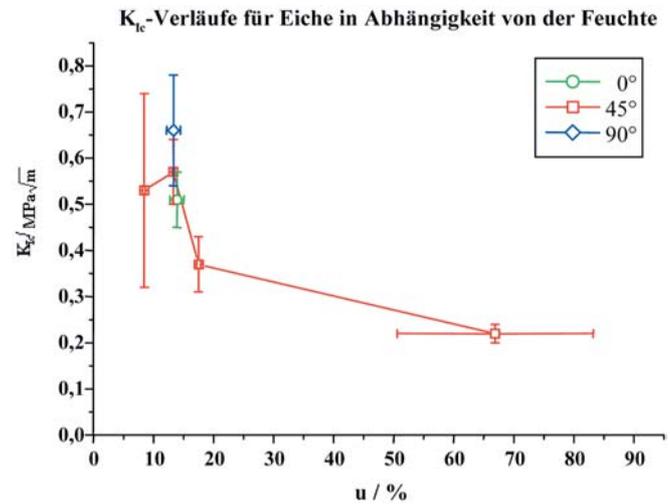


Abb. 8 K_{Ic} in Abhängigkeit von der Holzfeuchte u (Eiche)
Fig. 8 K_{Ic} in dependence on moisture u (oak)

Tabelle 2 Werte für die Bruchzähigkeiten K_{Ic} , Normalklima ($T=20^\circ\text{C}$, $\Phi=65\%$), $u\approx 14\%$

Table 2 Values of fracture toughness K_{Ic} , standard climate ($T=20^\circ\text{C}$, $\Phi=65\%$), $u\approx 14\%$

$\Phi/^\circ$	Eiche	Rotbuche
	$K_{Ic}/\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	$K_{Ic}/\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
0 (TR)	$0,51\pm 0,06$	$0,83\pm 0,12$
45	$0,57\pm 0,07$	$1,17\pm 0,20$
90 (RT)	$0,66\pm 0,12$	$1,20\pm 0,15$

angegeben werden. Das Maximum von K_{Ic} liegt bei einer Holzfeuchte u von ca. 12%. Der Effekt des leichten Abfalls der Bruchzähigkeit hin zum darrtrockenem Holz (hier bis $u=8\%$) deckt sich mit Ergebnissen aus dem Schrifttum für andere Holzarten. Es gibt in der Literatur

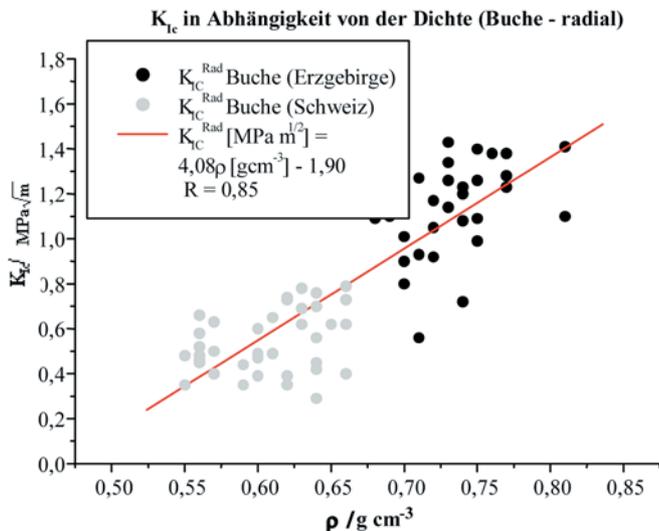


Abb. 9 K_{Ic} in Abhängigkeit von der Rohdichte ρ radial
 Fig. 9 K_{Ic} in dependence on density ρ radial

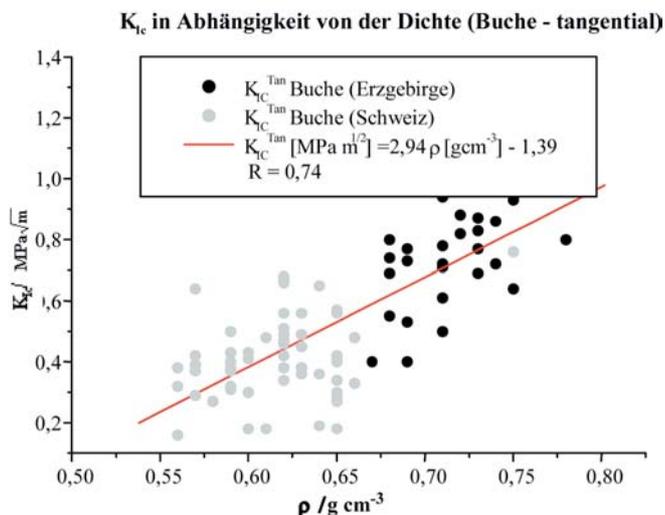


Abb. 10 K_{Ic} in Abhängigkeit von der Rohdichte ρ tangential
 Fig. 10 K_{Ic} in dependence on density ρ tangential

keine Begründung für diesen von Ranta-Maunus et al. (1991) als „more confusing“ charakterisierten Effekt, der aber z.B. auch beim Elastizitätsmodul zu beobachten ist. Oberhalb des Fasersättigungsbereiches ist K_{Ic} als konstant anzusehen, unterhalb als abhängig von der Holzfeuchte.

In den Abb. 9 und 10 wird der Einfluss der Rohdichte auf die Bruchzähigkeit verdeutlicht. Dabei ist die deutliche Differenzierung der Rohdichte nach dem Standort (Erzgebirge, Schweiz) gut erkennbar. Eine solche lineare Dichteabhängigkeit ergibt sich auch für andere mechanische Holzkennwerte z.B. den Elastizitätsmodul.

Den Verlauf der Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Winkel Φ zwischen den Jahrringen und der Last P zeigt Abb. 11. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Finite-Element-Analysen aufgetragen. Sie zeigen den gleichen

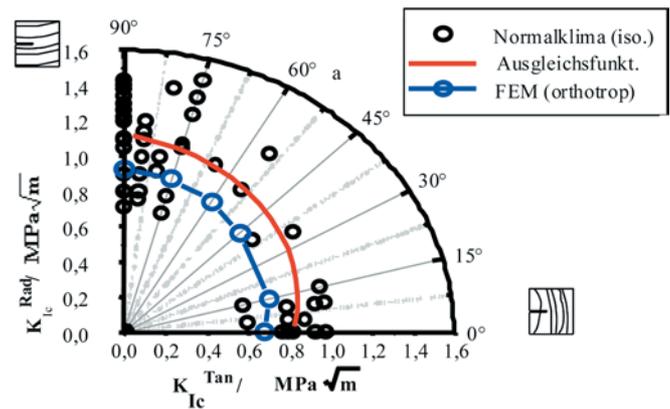


Abb. 11 Abhängigkeit der Bruchzähigkeit von der Jahrringlage (Winkel zwischen Jahrringen und der Last P) Φ
 Fig. 11 K_{Ic} dependence on the angle Φ between annular rings and force P

qualitativen Verlauf wie die Ergebnisse aus der isotropen Auswertung nach den Gl 1 und 2. In radialer Richtung—d.h. auch Kraftwirkung radial—ist die Bruchzähigkeit am größten, dies ist auf die Holzstrahlen zurückzuführen, wie aufgrund von lichtmikroskopischen Aufnahmen gezeigt werden konnte. Diese Aufnahmen bestätigen auch die Annahmen von Neumann (1998) und Burgert (1999) über den Einfluss der Holzstrahlen auf die Festigkeit von Holz. Bei niedrigen Holzfeuchten kommt es zu Delaminationen zwischen den Holzstrahlen und senkrecht zwischen Früh- und Spätholz. Exemplarisch dafür stehen die Abb. 12 und 13, die Radialriss und Schälrriss bei Buchenproben zeigen. Bei Holzfeuchte oberhalb des Fasersättigungsbereiches kommt es vielfach zu Brüchen, die sich nicht mehr so leicht einordnen lassen und Mischformen darstellen.

Eine visuelle Auswertung der im Rahmen dieser Untersuchung verwandten Proben erbrachte den Nachweis, dass ca. 80% aller Proben in der Ebene der Holzstrahlen rissen, auch wenn die Jahrringorientierung der CT-Probe nicht orthogonal zur Krafteinleitung war, also Kräfte in tangentialer Richtung vorhanden waren.

3.2 Mode II

Die Bestimmung von K_{IQ} und K_{IIQ} für den jeweiligen Winkel ξ erfolgt über die Gl. 3 und 4.

$$K_{IQ} = \frac{P_Q}{wt} \sqrt{\pi a c} \frac{\cos \xi}{1 - \frac{ac}{w}} \sqrt{\frac{0,26 + 2,56 \frac{ac}{w-ac}}{1 + 0,55 \frac{ac}{w-ac} - 0,08 \left(\frac{ac}{w-ac}\right)^2}} \quad (3)$$

$$K_{IIQ} = \frac{P_Q}{wt} \sqrt{\pi a c} \frac{\cos \xi}{1 - \frac{ac}{w}} \sqrt{\frac{-0,23 + 1,40 \frac{ac}{w-ac}}{1 - 0,67 \frac{ac}{w-ac} - 2,08 \left(\frac{ac}{w-ac}\right)^2}} \quad (4)$$

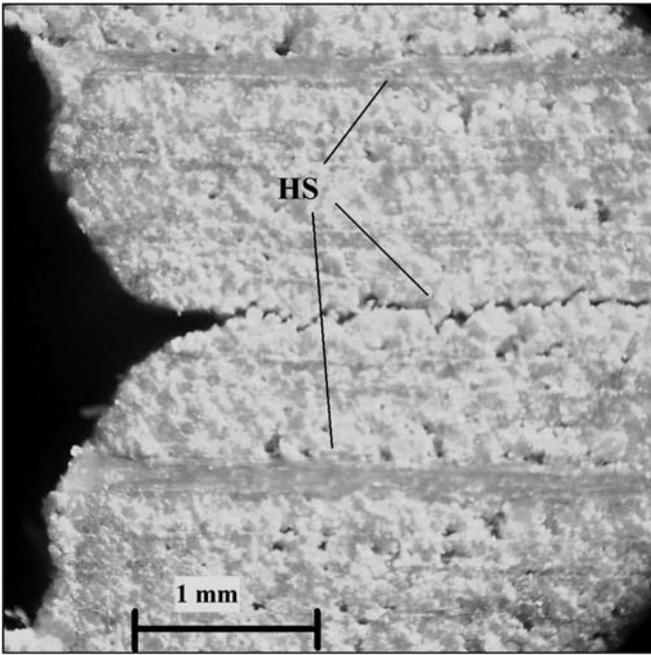


Abb. 12 Radialriss in der Ebene der Holzstrahlen
Fig. 12 Radial crack in medullary ray

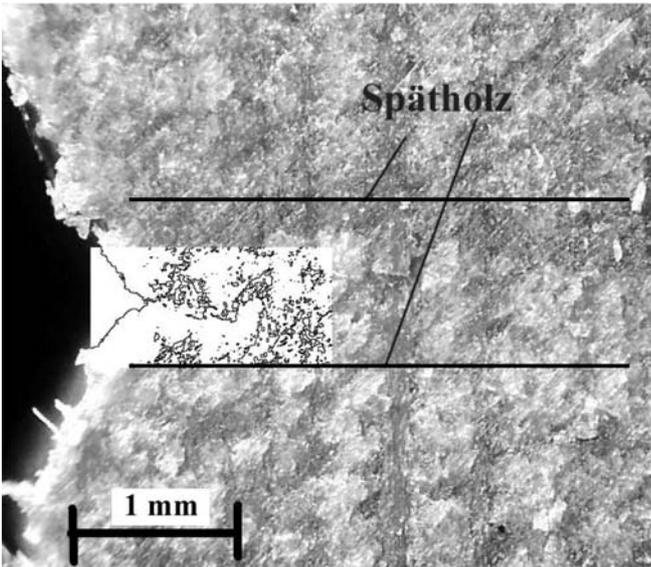


Abb. 13 Riss in tangentialer Richtung (Schälrriss)
Fig. 13 Tangential crack

Dabei sind w und t die Weite und die Dicke der Probe und a_c die kritische Risslänge.

Die Bruchzähigkeiten sind für Modus I:

$$\xi=0^\circ: K_{Ic} = 1,10 \pm 0,10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$\xi=90^\circ: K_{Ic} = 0,73 \pm 0,10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

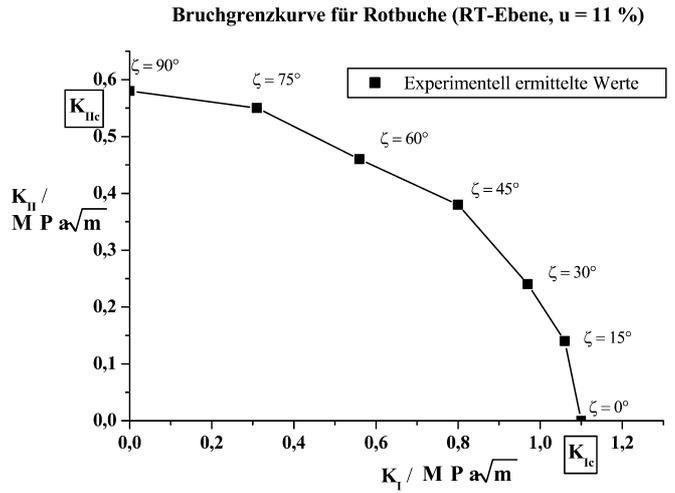


Abb. 14 Experimentell ermittelte Bruchgrenzkurve für Rotbuche in RT-Ebene
Fig. 14 Fracture envelope based on test results in RT plane (beech)

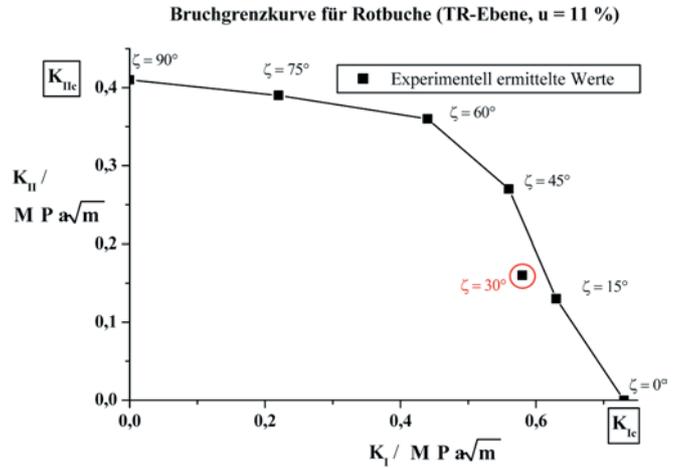


Abb. 15 Experimentell ermittelte Bruchgrenzkurve für Rotbuche in TR-Ebene
Fig. 15 Fracture envelope based on test results in TR plane (beech)

und liegen, verglichen mit den Werten aus der K_{Ic} -Untersuchung, in ähnlicher Größenordnung (die Differenz ist <10%).

Die Bruchzähigkeiten sind für Modus II:

$$\xi=0^\circ: K_{IIc} = 0,58 \pm 0,07 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$\xi=90^\circ: K_{IIc} = 0,41 \pm 0,05 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Bruchgrenzkurven für den Ansatz

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right) + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^q = 1 \tag{5}$$

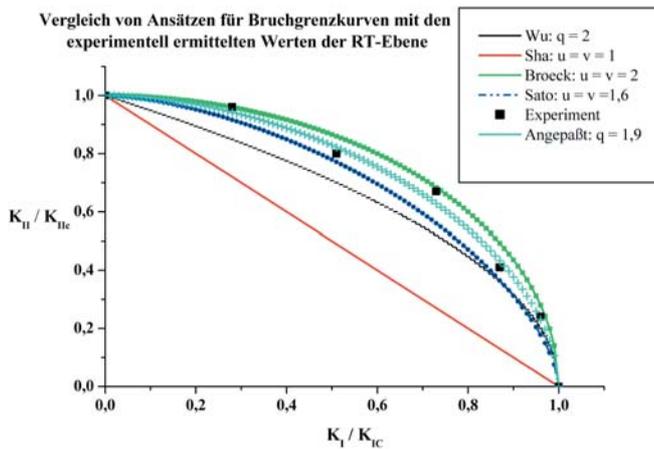


Abb. 16 Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit verschiedenen Ansätzen für Bruchgrenzkurven in RT-Ebene
Fig. 16 Comparison of test results with theoretical fracture envelopes in RT plane (beech)

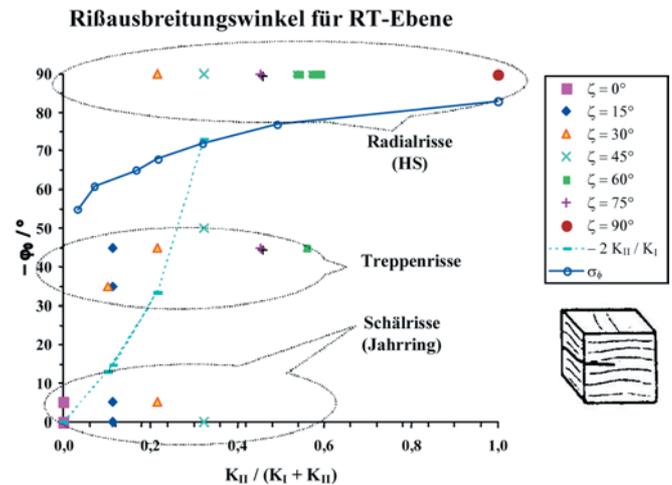


Abb. 18 Rissausbreitungswinkel in RT-Ebene
Fig. 18 Crack propagation angle in RT-plane

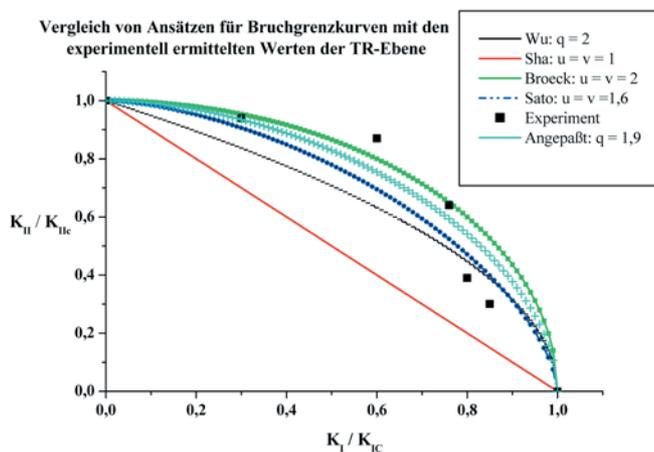


Abb. 17 Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit verschiedenen Ansätzen für Bruchgrenzkurven in TR-Ebene
Fig. 17 Comparison of test results with theoretical fracture envelopes in TR plane (beech)

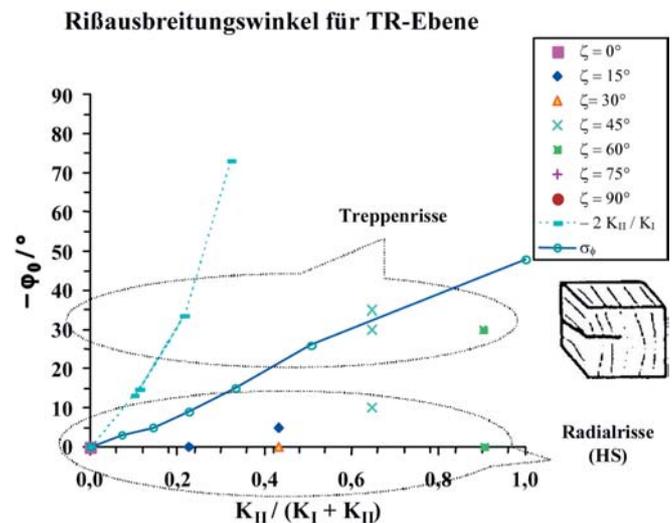


Abb. 19 Rissausbreitungswinkel in TR-Ebene
Fig. 19 Crack propagation angle in TR-plane

finden sich in den Abb. 14 und 15. Der normierte Vergleich der Messwerte mit Ansätzen aus der Literatur ist in den Abb. 16 und 17 dargestellt. Zu erkennen ist, dass alle Bruchgrenzkurven bis die nach Sha ($q=1,0$) eine gute Abschätzung des Bruchverhaltens liefern. Die beste Aussage liefert die speziell angepasste Bruchgrenzkurve mit $q=1,9$.

Die Abb. 18 und 19 zeigen den Rissausbreitungswinkel für die verschiedenen Mischmodusbeanspruchungen. Aufgetragen ist der Rissausbreitungswinkel über dem Verhältnis aus Modus I und II. Das negative Vorzeichen bei ξ_0 resultiert aus energetischen Überlegungen (Richard 1985). Deutlich ist der hohe Anteil Radial- und Treppenrisse in beiden Ebenen zu sehen, der auf den großen Anteil der Holzstrahlen bei Buche zurückzuführen ist. Dieser Befund korreliert mit den Aussagen der Untersuchungen bei reinem Modus I an den CT-Proben.

4 Abschließende Bemerkungen und Fehlerdiskussion

Bei den Untersuchungen zur Bruchzähigkeit K_{IC} wurde die von metallischen Werkstoffen bekannte CT-Probe benutzt. Es zeigte sich, daß K_{IC} von allen untersuchten Einflussfaktoren (Feuchte, Rohdichte und Faserorientierung) abhängt.

Das Maximum von K_{IC} bei $u=12\%$ stimmt mit den Ergebnissen anderer Autoren überein. Der Bruchmechanismus ändert sich grundlegend mit der Holzfeuchte von einem mehr duktilen bzw. Zähbruch-Verhalten bis hin zum Sprödbbruch bei geringen Holzfeuchten. Diese Aussagen können mit den Last-Kerbaufweitungskurven, Fotos und der Messung der Schallemission während des Bruchvorgangs belegt werden.

Weiterhin konnte eine direkte Abhängigkeit von K_{Ic} von der Rohdichte nachgewiesen werden. Die Herkunft des zur Probenherstellung verwendeten Holzes konnte anhand der Beziehung Bruchzähigkeit-Rohdichte gezeigt werden.

Auch die Aussagen zur Winkelabhängigkeit stimmen mit den Erfahrungen zur Spaltbarkeit überein. Der Einfluss der Holzstrahlen auf das Bruchgeschehen konnte gezeigt werden. Die Verwendung der Auswertungsgleichungen für isotrope Werkstoffe auch für Holz konnte anhand von Finite-Element-Analysen mit orthotropem Werkstoff und zugehöriger Auswertung des Spannungsintensitätsfaktors für ausgewählte Winkel motiviert werden.

Bei der Prüfung nach Mode II wurde die CTS-Probe nach Richard (1985) verwendet, die unterschiedliche Zug-Schubzustände in der Probe erlaubt. Trotz der Unterschiede der Probengeometrien von CT- und CTS-Probe konnten für Modus I kaum abweichende Werte ($<10\%$) für K_{Ic} ermittelt werden.

Der Vergleich mit den Bruchgrenzkurven aus der Literatur zeigt deren Anwendbarkeit für die Beschreibung des Mischmodusverhaltens bei Buche.

Es konnte—wie auch schon bei den Untersuchungen zu Modus I—der überragende Einfluss der Holzstrahlen auf das Bruchgeschehen dargestellt werden. Ein Großteil der Risse wächst auch bei Mischmodusbelastung im weiteren in einer durch die Struktur vorgegebenen Richtung. Diese Erkenntnis dient wesentlich auch dem Verständnis, der Beschreibung und der Simulation der Phänomene bei der Trocknung von Buche.

Literatur

- Aicher S (2002) Fracture mechanics for strength analysis of timber beams with a hole or notch. Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or notch—a report of RILEM TC-133, Lunds University
- Aicher S (2002) Stress intensity factor approach. Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or notch—a report of RILEM TC-133, Lunds University E399-90 Standard test method for plain-strain fracture toughness of metallic materials. Annual Book of ASTM Standards
- Burgert I (1999) Die mechanische Bedeutung der Holzstrahlen im lebenden Baum, Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Dissertation Deutscher Forstverein (2002) Im Auftrag des Holzabsatzfonds, Internetpublikation
- Ehard RJA, Stanzel-Tschegg SE, Tschegg E (1996) Fracture mechanism in particleboard-experiments and fe-simulation. In: 2. International Conference of the Development of Wood Science/Technology and Forestry, Sopron 10-11-4
- Gustafson PJ (2002) An overview of structure mechanic concepts. Fracture mechanics models for strength analysis of timber beams with a hole or notch—a report of RILEM TC-133, Lunds University
- Hardtke H-J, Militzer K-E, Fischer R, Hufenbach W (1997) Entwicklung und Identifikation eines kontinuumsmechanischen Modells für die numerische Simulation der Trocknung von Schnittholz. DFG-Thema Ha 2075/3-2, Forschungsbericht, TU Dresden
- King MJ, Sutherland J, Le-Ngoc L (1999) Fracture toughness of wet and dry *Pinus Radiata*. Holz Roh- Werkstoff 57:235–240
- Logemann M, Schelling W (1992) Die Bruchzähigkeit von Fichte und ihre wesentlichen Einflußparameter. Untersuchungen im Mode-I. Holz Roh- Werkstoff 50:47–52
- Logemann M, Schelling W (1992) Die Bruchzähigkeit von Fichte und ihre wesentlichen Einflußparameter. Untersuchungen im Mode-II. Holz Roh-Werkstoff 50:117–121
- Neumann AJ (1998) Ermittlung und Bewertung der elastischen Materialkennwerte von Vollholz in Abhängigkeit der Feuchte und Anisotropie. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden
- Niemz P, Diener M, Pöhler E (1997) Untersuchungen zur Ermittlung der Bruchzähigkeit an MDF-Platten. Holz Roh- Werkstoff 55:327–330
- Stahlberg R (1978) Untersuchungen von Bruchmechanismen an Eis und Holz. Materialprüfung 20(3):475–480
- Stanzl-Tschegg SE, Tan DM, Tschegg EK (1996) Mode II fracture tests on spruce wood. Mokuzai Gakkaishi 42(7):642–650
- Tschegg SE, Tschegg E, Teischinger A (1994) Fracture energy of spruce wood after different drying procedures. Wood Fiber Sci 26:467–478
- Valentin GH, Boström L, Gustafsson PJ, Ranta-Maunus A, Gowda S (Hrsg.) (1991) Application of fracture mechanics to timber structures. RILEM state-of-the-art report, Forschungsbericht, ISBN 951-38-3891-1