

ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Holzphysik
Schafmattstrasse 6
8093 Zürich

**Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und
Holzforschung Nr. 2012.10**

Ermittlung elastomechanischer Kennwerte von Eschenholz

Abschlussbericht

Bearbeitungszeitraum: 01.2012-03.2013

S. Clauß, D. Hänsch, F. Michel, P. Niemz

Gesuchsteller: Prof. Peter Niemz, ETH Zürich, IfB

Zürich, 25. März 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Motivation und Zielstellung	5
1.2	Kenntnisstand	7
1.2.1	Charakterisierung von Eschenholz	7
1.2.2	Feuchteverhalten von Holz	9
1.2.3	Bruchverhalten von Holz	10
1.2.4	Grundlagen der Linear-Elastischen Bruchmechanik	12
1.2.5	Bruchschlagarbeit	14
1.2.6	Druckscherfestigkeit	15
1.2.7	Bruchzähigkeit	17
2	Material und Methodik	19
2.1	Material	19
2.2	Methoden	20
2.2.1	Kerbschlagbiegeversuch	20
2.2.2	Druckscherversuch	20
2.2.3	Kompaktzugversuch	22
2.2.4	Ultraschallmessung	25
2.2.5	Eigenfrequenzmessung	29
2.2.6	Biegeversuch	30
2.2.7	Zug- und Druckversuch	30
2.2.8	Rohdichtebestimmung	31
2.2.9	Holzfeuchtebestimmung	32
2.2.10	Datenanalyse	33
3	Ergebnisse	35
3.1	Festigkeitskenngrößen	35
3.1.1	Bruchschlagarbeit	35
3.1.2	Druckscherfestigkeit	40
3.1.3	Bruchzähigkeit	48
3.2	Elastische Kenngrößen	58
3.2.1	E-Modul (statische und dynamische Prüfungen)	59
3.2.2	Zug- und Druckmodul	62
3.2.3	Querkontraktionszahlen	65
3.2.4	Schubmodul	67
3.3	Rohdichte	68
4	Schlussfolgerungen	71

Literatur

72

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielstellung

In der Schweiz ist rund ein Drittel der Landesfläche mit Wald bewachsen. In Abb. 1.1 ist zu sehen, dass diese Fläche seit 1945 kontinuierlich zunimmt. Im gesamten Schweizer Wald ergibt das gemäss dem Jahrbuch Wald und Holz (BAFU, 2012) momentan Holzvorräte von 422 Millionen Kubikmeter, wovon rund 30 % Laubholz sind. Bei zunehmend höheren Preisen bei Rohstoffen wie Eisen und diesen grossen Holzvorräten wird damit die Verwendung von Laubholz im Bauwesen immer attraktiver.

Neben Lärche und Ahorn nimmt der Bestand an Eschenholz in der Schweiz gegenüber den hier bisher dominierenden Baumarten Fichte, Tanne und Buche immer mehr zu. Laut dem dritten Schweizer Forstinventar (LFI3: 2004-2006) werden 3,7 % des schweizerischen Waldbestandes durch Eschenholz (*Fraxinus excelsior* L.) gebildet (Brändli, 2010). Der Eschenvorrat ist im Vergleich zu 1995 um 24.4 % gestiegen. Obwohl die Vorräte an Laubhölzern in der Schweiz wie auch

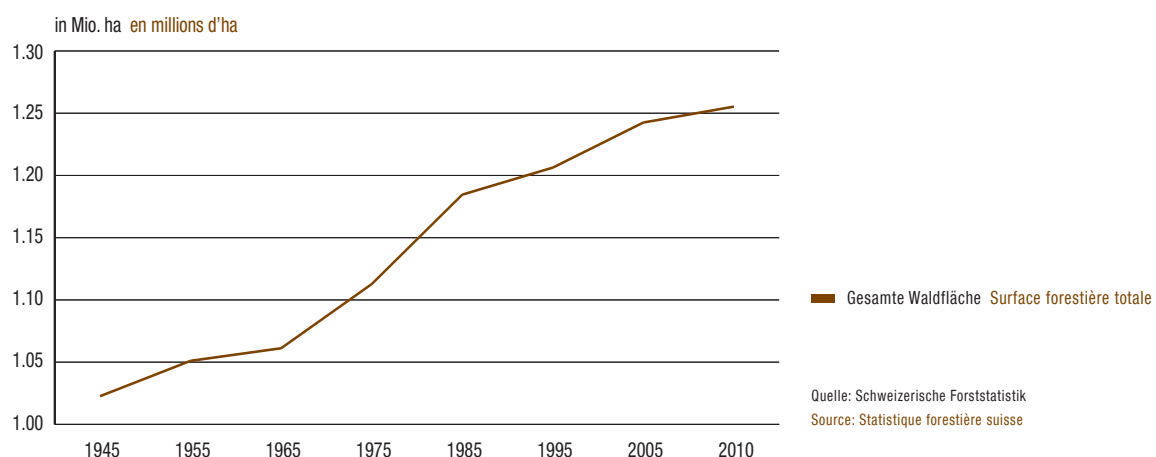


Abb. 1.1 Entwicklung der Waldfläche in der Schweiz 1945-2010 (BAFU, 2011)

anderen europäischen Ländern ansteigen, werden ca. 60 % dieser Ressourcen nur energetisch verwertet (Krackler, Keunecke und Niemz (2010)).

Aufgrund der guten Festigkeitseigenschaften bei hoher Zähigkeit liegen die Verwendungsgebiete von Eschenholz bisher vor allem bei mechanisch stark belasteten Produkten wie Werkzeugstielen, Sportgeräten oder Fahrzeugteilen. U.a. Laubhölzer wie Buche, Eiche und Esche eignen sich aber aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften auch für den Einsatz in einigen Bereichen der bisher von Nadelhölzern wie der Fichte dominierten Holzbraubranche.

Auch wenn das generelle Materialverhalten der Laubhölzer bekannt ist, fehlt es an konkreten Daten zu herstellungsrelevanten Festigkeits- und Verklebungseigenschaften. Diese Lücke wird derzeit von einigen Instituten europaweit bearbeitet, die in Forschungsprojekten das Anwendungspotential von Laubhölzern für lastabtragende Bauteile im Holzbau untersuchen. So hat sich auch ein Forschungsprojekt der ETH Zürich (Holzphysik) zum Ziel gesetzt vollständige Datensätze für ausgesuchte Holzarten zu erfassen, um diese in Finite Elemente Berechnungen zur Bemessung von Bauteilen nutzen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Daten zum Materialverhalten von Eschenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte, welche in der Literatur nur teilweise vorhanden sind, durch ausgewählte Untersuchungen ergänzt werden. Zu den zu ermittelnden Materialeigenschaften zählen:

- Elastizitäts- und Schubmoduln
- Poissonsche Konstanten
- Festigkeitswerte
- Sorptionsverhalten
- Diffusionsverhalten
- Quell- und Schwindverhalten

Obwohl in der ingenieurtechnischen Praxis zulässige Spannungen meist weit unter der Bruchlast definiert werden, ist zum Verständnis und zur sicheren Dimensionierung von Bauteilen die Kenntnis der Grenzspannung bei Materialversagen von Bedeutung. Dazu ist aufgrund der anisotropen und hygroskopischen Beschaffenheit von Holz und der Tatsache, dass Holzprodukte häufig jahreszeitlich bedingten Klimaschwankungen ausgesetzt sind u.a. eine Untersuchung der feuchtigkeitsabhängigen Eigenschaften in den drei prinzipiellen Belastungsrichtungen notwendig.

1.2 Kenntnisstand

1.2.1 Charakterisierung von Eschenholz

Holz als inhomogenes, anisotropes Naturprodukt weist richtungsabhängiges Materialverhalten auf und wird deshalb in den drei Hauptrichtungen Longitudinal, Radial und Tangential untersucht. Im Querschnitt ist der grundsätzliche Aufbau von aussen nach innen mit Rinde, Bast, Kambium, Splintholz, Kernholz und der Markröhre gut zu erkennen. Es kann grundsätzlich zwischen Nadel- und Laubholz unterschieden werden, wobei Laubholz entwicklungsgeschichtlich jünger und der Aufbau differenzierter ist. Eine ausführliche Beschreibung des Laubholzes Esche ist u.a. bei Kollmann (1941) zu finden.

Die weitleumigen und dünnwandigen zu Beginn der Vegetationsperiode gebildeten Frühholzzellen und die am Ende der Vegetationsperiode wachsenden englumigen und dickwandigen Spätholzzellen bilden zusammen die jährlichen, ringförmigen Zuwachszonen des Baums - die Jahrringe. Die Jahrringgrenze zwischen dem als Wasserleitung im Baum dienenden Frühholz und dem vor allem für Stabilität sorgenden Spätholz ist bei Esche im Querschnitt makroskopisch erkennbar. Spätholz hat eine höhere Rohdichte und Festigkeit als das Frühholz. Kollmann (1941) verweist auf einen relativ geringen Rohdichtegradient bei ringporigen Laubhölzern wie der Esche. Auch wenn die Rohdichte bei ringporigen Laubhölzern mit steigender Jahrringbreite zunimmt, können auch bei gleich breiten Jahrringen die Früh- und Spätholzanteile deutlich variieren. Die in radialer Richtung verlaufenden Holzstrahlen sind bei Esche unregelmässig, stellenweise stockwerkartig angeordnet. Breite und Höhe der Holzstrahlen sind allerdings deutlich geringer als bei Hölzern wie Buche oder Eiche. Esche gehört zu den Hölzern mit fakultativer Farbkernbildung. Wie u.a. Kühne (1951a) nachgewiesen hat, ist dieser als Braunkern bezeichnete Bereich des Eschenholzes dem hellen Eschenholz qualitativ ebenbürtig. Die folgenden Angaben zur Charakteristik des Eschenholzes sind aus Kucera und Gfeller (1994) entnommen:

Vorkommen:

- Europa, Vorderasien
- Charakterbaum der Schachenwälder, der Flussauen und längs von Bächen

Aufbau:

- Ringporige Gefässanordnung
- Frühholzgefässe einzeln und paarig, mehrreihig

- Spätholzgefäße einzeln, paarig und in kurzen radialen Gruppen, spärlich verstreut, dickwandig
- Markstrahlen homogen, hauptsächlich zwei bis dreireihig, Höhe durchschnittlich 10 bis 15 Zellen

Beschreibung:

- Splint hell, sehr breit
- Kern in der Regel ähnlich dem Splint, gelblich oder blassrötlich
- Splint/Kerngrenze nicht immer deutlich, da der Farbkern fakultativ ist, Textur durch breiten Frühholzgefässring prägnant hervortretend, meist grob
- Spätholzgefäße als helle Einzelgruppen, gelegentlich in schräger oder kurzer tangentialer Anordnung
- Holz mit leichtem Seidenglanz, ohne speziellen Geruch

Anwendung:

- Konstruktionsholz für mittlere Beanspruchungen, vornehmlich im Innenbau
- Spezialholz für Sportgeräte, Stiele, Sprossen, etc.
- Traditionelles Wagnerholz: Fuhrwerke, Kutschen, Waggonbau
- Eschen mit breiten Jahrringen sind besonders fest und elastisch, deshalb werden sie für die Herstellung von Sportgeräten bevorzugt

Eine ausführliche Zusammenstellung ausgewählter Eigenschaften von Esche ist u.a. bei Bonoli, Niemz und Mannes (2005) zu finden. Im Vergleich zu anderen Laubhölzern liegen die Werte für Zug-, Biege-, und Druckfestigkeit von Esche im Bereich von Buche oder Eiche.

Neben dem Einsatz als Material für schlagartig beanspruchte Produkte (z.B. Werkzeugstiele) wird Eschenholz auch im Möbel- und Innenausbau als Furnier oder Massivholz eingesetzt, wobei dort momentan die Nachfrage an Esche sinkt. Bonoli, Niemz und Mannes (2005), die Versuche an Eschenholz zu Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul (E-Modul) und Brucharbeit in Abhängigkeit von der Holzfeuchte und der Jahrringbreite durchgeführt haben, sehen „ein Potential für die Verwendung der Esche im Bereich des Brettschichtholzes, aber auch im Bereich anderer hochbeanspruchter konstruktiver Teile aus Holz“. Unter anderem wird dies bereits seit einigen Jahren durch die Firma „neue Holzbau“ in der Schweiz erfolgreich umgesetzt. Brettschichtholz aus Esche wird hierbei zumeist in den Knotenpunkten von Tragwerken und für grosse Tragweiten als Ersatz für Fichte eingesetzt.

Zur Verwendung im Aussenbereich ist aufgrund der schlechten Dauerhaftigkeit von Eschenholz eine Imprägnierung oder Modifikation notwendig. Die häufig zur Steigerung der Dauerhaftigkeit

eingesetzte thermische Behandlung bedingt eine Abnahme von Rohdichte, Härte und Festigkeit besonders bei intensiver Behandlung. Verwendungsmöglichkeiten für modifiziertes Eschenholz sind u.a. Spielplätze, Lärmschutzwände oder Fassaden (Krackler, Keunecke und Niemz, 2010).

1.2.2 Feuchteverhalten von Holz

Viele Eigenschaften des Werkstoffs Holz werden durch Veränderung des Feuchtegehaltes unterhalb des Fasersättigungsbereichs (FSB) stark beeinflusst. Dabei ist die Holzfeuchte ω der prozentuale Wert aus der Masse des Wassers im Holz bezogen auf die vorhandene Holzmasse (ohne Wasser).

In dem kapillarporösen System mit Mikro- und Makroporen können sich Wassermoleküle einlagern, wobei die drei Grenzzustände Darrtrocken, Fasersättigung und Wassersättigung unterschieden werden. Der Fasersättigungsbereich liegt meist zwischen 28-32%. Bei ringporigen Holzarten wie der Esche kann er bereits bei 23-25 % Holzfeuchte erreicht sein.

Holz als hygroskopischer Werkstoff nimmt in Abhängigkeit des Umgebungsklimas bis zum Erreichen des FSB Wasser aus der Luft auf (Absorption) oder gibt Wasser ab (Desorption). Das auf diese Weise aufgenommene Wasser wird als gebundenes Wasser bezeichnet. Den Anteil des Wassers, der oberhalb des FSB eingelagert wird nennt man freies Wasser. Die sich einstellende Ausgleichsfeuchte hängt neben der relativen Luftfeuchte u.a. von der Temperatur, dem Luftdruck und der Holzart ab.

Feuchtetransport im Holz erfolgt unterhalb des FSB durch Diffusion, oberhalb durch Kapillarkwirkung. Dabei kommt es bei Feuchteaufnahme bis zum Erreichen des FSB zum Aufquellen der Zellstruktur, sodass die Zellwände gedehnt werden und sich so das Volumen erhöht. Feuchteabgabe hat Volumenverkleinerung im Zuge von Schwindprozessen zur Folge. Die Schwindmasse sind in radialer ($\beta_r = 5.3\%$) und tangentialer Richtung ($\beta_t = 8.7\%$) stärker als longitudinal.

Nach Niemz (1993) kommt es bei der Absorption zur Überlagerung folgender drei Phasen: Chemisorption, Adsorption und Kapillarkondensation. Die Einlagerung von Wassermolekülen während der Chemisorption ($0\% \dots 6\%$) als eine monomolekulare Schicht zwischen den Zelluloseketten hat für manche Belastungsfälle eine festigkeitssteigernde Wirkung. So kann bei Zug- und Scherfestigkeit zunächst ein Anstieg der Werte beobachtet werden. Mit steigender Holzfeuchte nehmen u.a. Biege-, Druck-, Zugfestigkeit und der E-Modul bis zum Erreichen des FSB ab. Während

der Adsorption (6%..15%) werden weitere Wassermoleküle eingelagert, sodass sich eine polymolekulare Schicht ausbildet. Bei fortschreitender Wasseraufnahme werden Wassermoleküle an freie OH-Gruppen in der Molekülstruktur der Zellulose gebunden, wodurch die direkten Bindungen zwischen den Mikrofibrillen unterbrochen sind (Kapillarkondensation (15%..FSB)). Der Kraftaufwand um die Fibrillen gegeneinander zu verschieben ist nun am geringsten. Oberhalb des FSB verändern sich Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften nur noch geringfügig. Gerhards (1982) berichtet ausführlich über den Einfluss der Holzfeuchte auf mechanische Eigenschaften bei verschiedenen Holzarten.

Die Erkenntnis, dass der E-Modul mit zunehmender Holzfeuchte sinkt, impliziert, dass bei höherem Feuchtegehalt die Dehnung des Materials bei gleicher Beanspruchung grösser ist als bei einer niedrigen Holzfeuchte. Mit Zunahme der Holzfeuchte nimmt zudem der Anteil an plastischer und viskoelastischer deutlich Verformung zu.

Bei der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Festigkeitseigenschaften und der Holzfeuchte ist ebenfalls der Einfluss der Rohdichte ρ als Quotient aus der Masse des Holzes einschliesslich des in der Holzstruktur befindlichen Wassers und dem Volumen inklusive der vorhandenen Hohlräume zu berücksichtigen. Grundsätzlich steigt die Rohdichte mit zunehmender Holzfeuchte. Die Rohdichte von Esche liegt bei einer Holzfeuchte von 12 – 15% im Bereich von $0,45 \dots 0,69 \dots 0,86 \text{ g/cm}^3$ (Wagenführ, 2000).

1.2.3 Bruchverhalten von Holz

Wird Holz einer Belastung ausgesetzt, kann zwischen elastischem und plastischem Materialverhalten unterschieden werden. Im Gegensatz zum plastischen Verhalten wird bei ideal elastischen Eigenschaften, beschrieben durch das HOOKEsche Gesetz, die durch Belastung eingebrachte Deformation bei Entlastung wieder vollständig rückgängig gemacht.

Um das Bruchverhalten von Holz verstehen zu können, ist eine Betrachtung des gesamten Spannungs-Dehnungsverlaufs mit linearer und nicht-linearer Region inklusive des Versagensbereichs notwendig. Die Zusammenhänge sind u.a. bei Bodig und Jayne (1982) beschrieben. Der als Grenzspannung bezeichnete höchste Spannungswert im nichtlinearen Teil der Spannungs-Dehnungskurve steht für die Festigkeit einer Probe bezogen auf die jeweilige Belastungsart (Druck-, Zug-, Scherbelastung u.a.) bei Materialversagen.

Ist die Bruchspannung bei Zugbeanspruchung erreicht, kommt es zum Sprödbbruch ohne vorausgehende starke plastische Verformung. Der Beginn des Risswachstums ist deutlich an einem plötzlichen Spannungsabfall zu erkennen. In Abhängigkeit der Holzfeuchte und der Belastungsrichtung können im Bereich vor der Maximalspannung zähigkeitsverstärkende Mechanismen dazu führen, dass dem abrupten Sprödbbruch plastische Deformationen vorausgehen. Man spricht von quasi-sprödem Materialverhalten. Bei Druckbeanspruchung quer zur Faser tritt duktiles Versagensverhalten auf. Das druckbelastete Element erfährt deutliche plastische Verformungen. Dabei steigt die Dehnung mit zunehmender Druckbelastung stark an. Neben dem Erreichen der Bruchspannung ist auch eine übermässige Dehnung des Materials als Materialversagen anzusehen.

Wird Holz in ausreichend grossem Abstand von der Stammmitte eingeschnitten, sodass die Krümmungen der Jahrringe vernachlässigbar sind, können dessen Eigenschaften als orthotrop angesehen werden. Die Festigkeitseigenschaften variieren stark mit der Richtung der Lasteinwirkung in Relation zur radialen (R), tangentialen (T) bzw. longitudinalen (L) Achse, sodass bei Laubholz die Festigkeit in radialer Richtung höher ist als in tangentialer Richtung und beide Festigkeiten jeweils nur 10-30 % der Festigkeit in longitudinaler Richtung betragen. Der Unterschied zwischen radialer und tangentialer Richtung wird auf die versteifende Wirkung der Holzstrahlen bei Laubholz zurückgeführt (Reiterer et al., 2002). Neben der Belastungsrichtung wird das Materialverhalten u.a. durch den naturgegebenen Aufbau und durch klimatische Gegebenheiten beeinflusst, wie anhand des Feuchteverhaltens in Abschnitt 1.2.2 näher erläutert ist.

Da sich Holz viskoelastisch verhält, hängen die ermittelten Festigkeitswerte auch von der Prüfungsgeschwindigkeit ab. Je nachdem ob die Belastung abrupt, wie in diesem Fall bei Ermittlung der Schlagzähigkeit oder langsam erhöht wird, wie bei der Untersuchung von Scherfestigkeit und Bruchzähigkeit, spricht man von dynamischer bzw. statischer Festigkeit.

Im Gegensatz zur reinen Festigkeitsbetrachtung wird bei bruchmechanischen Untersuchungen die Existenz von Rissen im Material berücksichtigt. Dabei sind Risse grundsätzlich als „lokale Trennungen des Materials in einer Struktur“ zu verstehen (Richard und Sander, 2012). Rissentstehung findet aufgrund von variierenden Spannungskonzentrationen statt, die in inhomogenen Werkstoffen wie Holz auftreten. Klima und Standort haben neben den generell im Holz auftretenden inhomogenen Strukturen wie u.a. Fasern, Poren und Ästen bereits am stehenden Baum Einfluss auf die für die Spannungsverteilung massgebenden Wuchseigenschaften (Variation von Jahrringbreiten, Anteilen von Früh- und Spätholz u.a.). Überhöhte Spannungen können aber

auch durch Fehler bei der Holz Trocknung eingebracht werden. Somit befinden sich schon im ingenieurtechnisch einsetzbaren Holz Risse bevor es Nutzlasten ausgesetzt wird.

Publikationen von Debaise, Porter und Pentoney (1966); Jeronimidis (1980) sowie Smith und Vasic (2002) beschäftigen sich deshalb vor allem mit den beiden Phasen Risswachstum und dem letztendlichen Materialversagen, wobei untersucht wird, in welchen Bereichen der Holzstruktur auf mikroskopischer Ebene der Riss verläuft. Dem plötzlichen, instabilen Bruch eines Bauteils geht eine Phase des kontrollierten stabilen Risswachstums voraus. Erreicht der Riss eine kritische Länge oder erhöht sich die Belastung schlagartig, kommt es zum instabilen Risswachstum bis hin zum Bruch. Der makroskopische Riss ist dabei das Resultat vieler Mikrorisse. Hier sind Rissverläufe zwischen Zellen (intercell), innerhalb der Zellwände (intracell) oder durch die Zellstruktur quer hindurch (transwall) zu beobachten.

Wurde das Bruchverhalten von Holz traditionell vor allem mit Messungen der Bruchlast in statischen und dynamischen Biegeversuchen untersucht, werden heute oft Versuche auf Basis bruchmechanischer Modelle durchgeführt, da die während Rissentstehung und Risswachstum ablaufenden Prozesse mit dem Dehnungs-Spannungs-Ansatz nicht ausreichend erklärbar sind.

1.2.4 Grundlagen der Linear-Elastischen Bruchmechanik

Um ein besseres Verständnis über den Einfluss von Rissen und Defekten in Materialien zu erhalten, werden bruchmechanische Modelle entwickelt. Beginnend in den 1960er Jahren ist dabei meist das kontinuumsmechanische Konzept der Linear-Elastischen Bruchmechanik (LEBM) zu Grunde gelegt worden (Schniewind und Pozniak, 1971; Debaise, Porter und Pentoney, 1966). Der aktuelle Erkenntnisstand ist u.a. bei Smith, Landis und Gong (2003) zusammengefasst. In Abbildung 1.2 sind einige grundlegende Begriffe der LEBM zur Beschreibung des Risses dargestellt.

Eine der ersten oft zitierten Arbeiten in der Bruchmechanik stammt von Griffith (1921). Es wird davon ausgegangen, dass der Riss in einem Körper mit elastischem Materialverhalten verläuft, wobei in dem Körper eine elastische Energie gespeichert ist. Oberflächenenergie verhindert das Risswachstum aber nur, wenn die unter Belastung freigesetzte elastische Energie den Bedarf an Oberflächenenergie decken kann. Eine Rissverlängerung erfolgt dann, wenn die Energiefreisetzungsrate G einen kritischen Wert G_C erreicht.

Dieser traditionelle Ansatz zur Bestimmung der Bruchzähigkeit bildet die Grundlage für einen zweiten Ansatz: der Ermittlung des Spannungsintensitätsfaktors. Verglichen mit der Energiefrei-

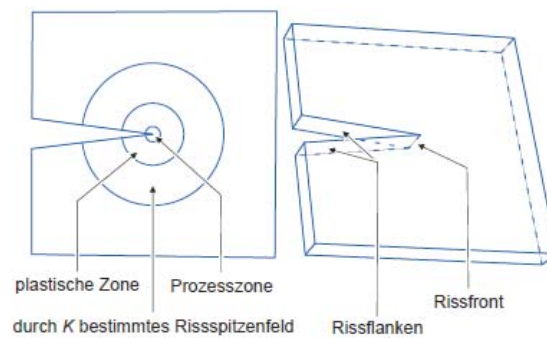


Abb. 1.2 Grundbegriffe der LEBM (Quelle: (Ammann 2011), S. 9)

setzungsrate wird hier nicht die Gesamtenergiebilanz, sondern nur das im Bereich der Rissfront auftretende Spannungsfeld betrachtet, welches als singulär und mit theoretisch unendlich hohen Spannungen angenommen wird.

Um das Phänomen besser beschreiben zu können, wird eine Prozesszone in der Umgebung der Risspitze definiert. In dieser Zone findet bei Holz, wie auch bei anderen Materialien, plastische Verformung statt und kann somit nicht als linear-elastisch angesehen werden. Um trotzdem von linear-elastischem Bruchverhalten ausgehen zu können, müssen unelastische Vorgänge auf eine, bezogen auf die Probengeometrie,³ kleine Region beschränkt sein. Kommt es zu plastischen Erscheinungen ausserhalb einer kleinen Zone, müssen Konzepte der erweiterten Elasto-Plastischen Bruchmechanik (EPBM) zu Grunde gelegt werden .

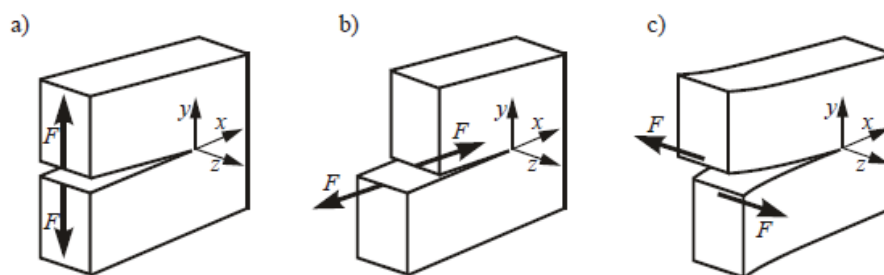


Abb. 1.3 Die drei grundlegenden Rissbeanspruchungsarten der Bruchmechanik (Richard und Sander, 2012): a) Mode I: Umfasst alle Normalbeanspruchungen, die ein Öffnen des Risses bewirken, b) Mode II: Gilt für alle Schubbeanspruchungen, die ein entgegengesetztes Gleiten der Rissoberflächen in Rissrichtung hervorrufen, c) Mode III: Entsteht bei nichtebenem Schubspannungszustand, der ein Gleiten der Rissoberfläche quer zur Rissrichtung bewirkt.

Prinzipiell können drei Rissöffnungsmodi unterschieden werden (Abb. 1.3). Hinsichtlich der Variablen des Koordinatensystems mit Ursprung in der Risspitze steht x für die Richtung des

Risswachstums, z für die Ebene der Rissfront, y für die Ebene senkrecht zur Rissfront. Bezogen auf die drei orthogonal zueinander stehenden Richtungen longitudinal, radial, tangential können sechs Systeme der Bruchausbreitung definiert werden (Valentin, 1991; Smith, Landis und Gong, 2003).

Der Spannungsintensitätsfaktor K_I ist ein Kennwert für die Bruchzähigkeit, dem Widerstand eines Materials gegen Rissausbreitung im Rissmodus I. Abgeleitet vom Griffith-Kriterium (Gleichung 1.1) wächst ein Riss wenn K_I einen kritischen Wert erreicht (Griffith, 1921).

$$K_I = K_{IC} \quad (1.1)$$

K_I : Spannungsintensitätsfaktor im Rissmodus I [$MPa\sqrt{m}$]

K_{IC} : kritischer Spannungsintensitätsfaktor für Rissmodus I [$MPa\sqrt{m}$]

K_{IC} ist abhängig von der Risslänge a , der Geometrie des Probekörpers und von der einwirkenden Last. Die LEBM setzt ein instabiles Risswachstum - die abrupte Verlängerung des Risses - voraus. Stabiles Risswachstum tritt dann ein, wenn der Risswiderstand in Abhängigkeit von der Risslänge nicht konstant ist. Durch zähigkeitsverstärkende Mechanismen wird die Rissausbreitung verlangsamt. Dabei bilden Effekte wie das „Fibre Bridging“ (sich während des Risswachstums einstellende Überbrückungen zwischen den entstandenen Rissfronten durch einzelne Fasern oder Faserbündel), im Bereich des Hauptrisses auftretende Mikrorisse und eine der Rissfront vorausgehende plastische Deformation einen zusätzlichen Widerstand.

1.2.5 Bruchschlagarbeit

Die zu den dynamischen Festigkeitseigenschaften zählende Bruchschlagarbeit ist eine Kenngrösse für die Schlagzähigkeit, dem Widerstand des Holzes gegen abrupte Beanspruchung. Im Besonderen wurden bisher die Abhängigkeit der Schlagzähigkeit zur Rohdichte, zur Faserlänge und zur Jahrringstruktur untersucht (Clarke, 1935; Kollmann, 1951). Kollmann (1941), der ausführliche Untersuchungen bei Eschenholz durchgeführt hat, zeigt eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf, analysiert anhand von Bruchbildern und piezoelektrischen Messungen den Bruchprozess und berichtet über eine starke Streuung der Messwerte.

Tabelle 1.1 Literaturwerte - Schlagzähigkeit der Esche

Holzfeuchte [%]	Bruchschlagarbeit [kJ/m^2]	Quelle
-	10...68...80	(Kollmann, 1951)
12	9,8...68,6...176,5	(Baumann, 1922)
12	67...88	(Sell, 1997)

Nach Niemz (1993) kann ein deutlicher Einfluss von Rohdichte und Feuchtigkeit festgestellt werden, wobei die Schlagzähigkeit bei geringer Feuchte und hoher Rohdichte am höchsten ist. Kollmann (1951) konnte keinen Zusammenhang zwischen Feuchte und der Schlagzähigkeit herausarbeiten. Der erwähnte Einfluss der Rohdichte ist aber auch hier zu erkennen. Bei Kühne (1951b) wird die Schlagzähigkeit an Esche-Werkzeugstielen untersucht. Die Ergebnisse zeigen einen leichten Anstieg der Werte mit steigender Holzfeuchte auch oberhalb des FSB. Seine Ergebnisse liegen im Mittel deutlich höher als die Mittelwerte für Esche, die in der Literatur (Tab. 1.1) zu finden sind, befinden sich aber innerhalb der generell starken Streuung.

1.2.6 Druckscherfestigkeit

Die Scherfestigkeit ist ein Materialkennwert, der den Widerstand kennzeichnet, den ein Körper der Verschiebung zweier aneinander liegender Flächen entgegensetzt. Abhängig von der Beanspruchungsrichtung kann die Scherfestigkeit eine der geringsten Festigkeiten sein, sodass der Bruch bei Holzkonstruktionen häufig auf Versagen infolge überhöhter Schubbeanspruchung zurückgeführt werden kann. Neben der durch die Belastung des Körpers durch ein Kräftepaar hervorgerufenen Schubspannung treten bei Scherbeanspruchung auch Biege-, Zug-, und Druckspannungen als Nebenbeanspruchungen auf. Diese Problematik hat eine Reihe von Versuchsmethoden hervorgebracht, deren Ergebnisse aufgrund der bisher teilweise nicht qualifizierbaren Nebeneinflüsse teilweise stark variieren. Hilbrand (1964), der die Druckscherfestigkeit in Faserrichtung an Kiefer (southern yellow pine) und Eiche (overcup oak) mit einigen standardisierten und nicht-standardisierten Methoden gemessen hat, erhält z.T. signifikante Unterschiede in den Ergebnissen. Die in der vorliegenden Arbeit angewandte Methode nach DIN 52187 (1979) ähnelt in Probengeometrie und Versuchsdurchführung dem von Hilbrand (1964) durchgeführten „Standard British cube shear test“. Die Variationskoeffizienten der Ergebnisse dieses Tests liegen zwischen 10-20%, sodass bei der Bestimmung der Scherfestigkeit nach DIN 52187 (1979) ebenfalls aussagekräftige Ergebnisse zu erwarten sind.

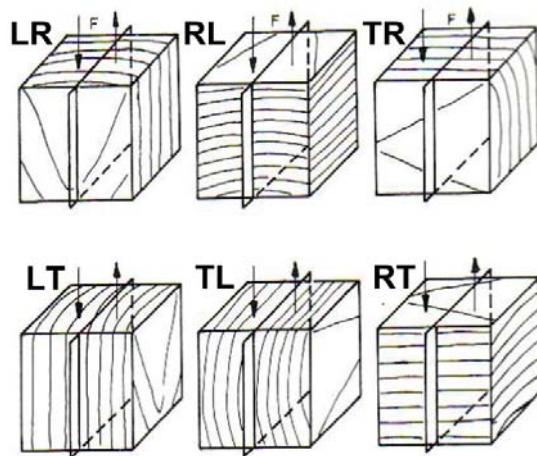


Abb. 1.4 Scherfestigkeit-Beanspruchungsebenen, 1. Buchstabe: Belastungsrichtung, 2. Buchstabe: Richtung der Scherebene (in Anlehnung an Wagenführ und Scholz (2008), S.123)

Die für diese Arbeit relevanten Beanspruchungsebenen sind in Abbildung 1.4 veranschaulicht. In den Scherebenen quer zur Faserrichtung kommt es besonders bei RT- und TR-Beanspruchung zur starken Verdichtung der Fasern. Ein Scherbruch wie er in den übrigen Ebenen zu beobachten ist, findet nicht statt. Häufig wird die Ermittlung der Scherfestigkeit in diesen Richtungen deshalb nicht durchgeführt. Nach Niemz (1993) und Kollmann (1951) ist die Scherfestigkeit in LT-Ebene grösser als bei Belastung in der LR-Ebene. Diese Feststellung kann durch die Ergebnisse von Horvath, Molnar und Niemz (2008) für die Laubhölzer Eiche und Rotbuche bestätigt werden. Bei Fichte liegt allerdings der gegensätzliche Trend vor. Die Tendenz kleinerer Scherfestigkeiten in der LT-Ebene als in der LR-Ebene bei Nadelhölzern und der umgekehrte Befund bei Laubhölzern werden auch durch die Ergebnisse von Hilbrand (1964) bestätigt.

Hinsichtlich eines Zusammenhangs zwischen Holzfeuchte und Scherfestigkeit stellt Kollmann (1951) fest, dass die Scherfestigkeit bei etwa 8 % Holzfeuchte maximal ist, dann absinkt, oberhalb des FSB am geringsten ist und sich dort auch nur noch geringfügig ändert. Bei den Ergebnissen von Hering (2011), der entsprechende Untersuchungen an Buche durchgeführt hat, ist zu beobachten, dass der Einfluss der Holzfeuchte in Faserrichtung deutlicher ist als quer zur Faserrichtung.

Nach Niemz (1993) erhöht sich die Scherfestigkeit mit steigender Rohdichte. Bei den geprüften Laubhölzern führen Horvath, Molnar und Niemz (2008) die, verglichen zur Fichte, höhere Scherfestigkeit auf die höhere Rohdichte, den geringeren Dichtegradienten zwischen Früh- und Spätholz

und auf die versteifende Wirkung der in den Laubhölzern Buche und Eiche grossen und, bezogen auf das Gesamtvolumen, häufig vorkommenden Holzstrahlen zurück.

1.2.7 Bruchzähigkeit

Die LEBM bildet die theoretische Grundlage für die Bruchzähigkeitsuntersuchungen im ebenen Dehnungszustand (Mode I). Der Spannungsintensitätsfaktor K_{IC} ist eine Kenngrösse für die Bruchzähigkeit - dem Widerstand eines Bauteils gegen Rissausweitung. Gegenstand der Betrachtung ist das Einsetzen instabiler Rissausweitung bei einem zunächst ruhenden Riss. Die Kenntnis der Bruchzähigkeit ermöglicht den qualitativen Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe und kann u.a. zur Beurteilung kritischer Risslängen in Bauwerken genutzt werden.

Zur Bestimmung der Bruchzähigkeit werden Probekörpergeometrien verwendet, für die Lösungsansätze für den Spannungsintensitätsfaktor K_{IC} bekannt sind. Stanzl-Tschegg, Tan und Tschegg (1995) berichten über den Einfluss der Probekörpergeometrie auf den Bruchverlauf. Mit dem Hintergrund der komplexen Theorie der Bruchmechanik werden in zahlreichen Publikationen bestehende Prüfverfahren und die Interpretation der Ergebnisse diskutiert (Valentin, 1991; Smith, Landis und Gong, 2003). Für Holz gibt es bisher kein standardisiertes Prüfverfahren. Eine der häufig verwendeten Probekörpergeometrien ist die „Compact-Tension“-Probe (CT-Probe) gemäss der für metallische Werkstoffe konzipierten Norm ASTM E 399 (2009). Bei der Prüfung wird die CT-Probe auf Zug beansprucht, bis sich der vor der Prüfung eingebrachte Rissansatz verlängert. K_{IC} wird anhand der Probenkörpergeometrie und einer massgebenden Kraft ermittelt (vgl. Abs. 1.2.4).

Abbildung 1.5 zeigt die in dieser Arbeit betrachteten Rissausbreitungssysteme. Da er für viele Anwendungsfälle den kritischen Rissmodus darstellt, wurden die meisten Messungen bisher in Mode I bei Zug senkrecht zur Faserrichtung, besonders in den Systemen mit Rissausbreitung in longitudinaler Richtung (RL und TL) durchgeführt (vgl. Scheffler (2002) (Buche, Eiche), Logemann und Schelling (1992) (Fichte), Majano-Majano, Hughes und Fernandez-Cabo (2012) (Buche, Esche)).

Ozyhar, Hering und Niemz (2012) bzw. Tollert (2010), die die Bruchzähigkeit in Abhängigkeit von der Holzfeuchte zusätzlich in den Rissausbreitungssystemen RT und TR bestimmt haben, erhalten für diese Systeme Werte, die höher liegen als bei TL- aber niedriger als bei RL-Beanspruchung. Ozyhar, Hering und Niemz (2012) berichten für Buche, dass die Bruchzähigkeit bei Mode I

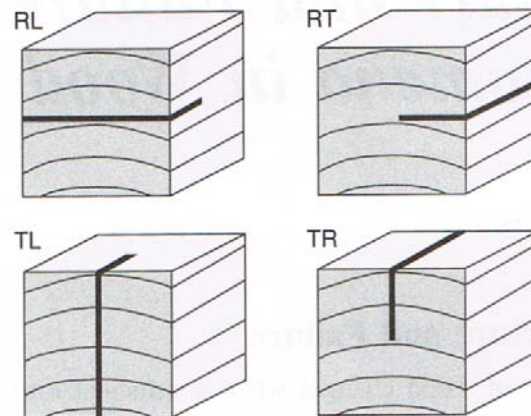


Abb. 1.5 Bruchzähigkeit-Rissausbreitungssysteme, 1.Buchstabe: Beanspruchungsrichtung, 2.Buchstabe: Rissausbreitungsrichtung (Smith, Landis und Gong (2003), S.100)

in radialer Richtung (RL und RT) dabei ungefähr doppelt so hoch ist als bei den Rissausbreitungssystemen TR und TL, was auf die versteifende Wirkung der Holzstrahlen bei RL- und RT-Beanspruchung zurückgeführt werden könne.

Neben den Einflussgrößen Holzfeuchte und Rissausbreitungssystem besteht ein Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Bruchzähigkeit, wobei nach Niemz (1993) mit steigender Rohdichte die Bruchzähigkeit zunimmt.

2 Material und Methodik

2.1 Material

Das untersuchte Probenmaterial stammt aus einem Stamm der Gattung *Fraxinus exelsior* L. aus der Ostschweiz. Die Klimatisierung gemäss den in Tabelle 2.1 aufgeführten Klimastufen bis hin zur Massenkonzanz erfolgt vor dem Zuschnitt, um Dimensionsänderungen durch Quellen und Schwinden der Probekörper zu vermeiden. Der Probenzuschnitt erfolgte gemäss normativer Vorgaben unter Berücksichtigung der geforderten Probekörpergeometrien (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.1 Verwendete Klimata in den entsprechenden Klimaräumen

rLF [%]	T [°C]	Klimastufe
35...55	20 ± 2	20/50
65 ± 5	20 ± 2	20/65
80 ± 5	20 ± 2	20/85
90 ± 5	20 ± 2	20/90

Tabelle 2.2 Versuchsübersicht

Zielgösse	Norm	Probenmasse	Ebene/Richtung	Stichprobe
Kerbschlagbiegeversuch	DIN 52189-1	20 × 20 × 300	TL	25/100
Druckscherversuch	DIN 52187	50 × 50 × 50	LR/RL/LT/TL/TR/RT	10/240
Kompaktzugversuch	ASTM E 399	80 × 80 × 20	TL/TR/RT/RL	15/240
Biegeversuch	DIN 52186	20 × 20 × 360	L	20/80
Druckversuch	DIN 52185	15 × 15 × 45	L/R/T	10/120
Zugversuch	DIN 52188	50 × 6 × 470	L	20/80
	-	28 × 28 × 95	L/R/T	10/120
Frequenzanalyse	-	20 × 20 × 360	L	20/80
	-	10 × 10 × 10	L/R/T	20/80
Durchschallung	-	20 × 20 × 360	L	20/80

2.2 Methoden

2.2.1 Kerbschlagbiegeversuch

Der Probenzuschnitt und die Prüfung der Schlagzähigkeit erfolgen gemäss DIN 52189-1 (1981). Die Schlagarbeit wird durch ein Pendelschlagwerk (Abb. 2.1) der Firma Mohr & Federhaff AG (Mannheim) mit einer Ausgangsschlagarbeit von 10 m kg eingebracht und anschliessend nach Gleichung 2.1 berechnet:

$$W_b = (1000 * W) / (b * h) * g \quad (2.1)$$

W_b : Bruchschlagarbeit [kJ/m^2]

W : Arbeit zum Durchschlagen der Probe [m kg]

b, h : Kantenlängen der Proben in radialer, tangentialer Richtung der Probe [mm]

g : Fallbeschleunigung - Ortsfaktor: 9.81 m/s^2

Die Bestimmung von Probengeometrie und -masse wurde im Voraus der Prüfung durchgeführt. Der Schlag erfolgt auf die Radialfläche der Proben mit einem Krafteintrag in tangentialer Richtung. Geprüft wurde in Abhängigkeit der in Tabelle 2.1 erwähnten Klimastufen. Zusätzlich wurden die Bruchbilder ausgewertet.

2.2.2 Druckscherversuch

Das klimatisierte Probenmaterial wurde in Anlehnung an DIN 52187 (1979) zu würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 50 mm zugeschnitten und anschliessend geprüft. Neben dem Ausschluss von offensichtlichen Wuchsfehlern wurde bei der Probekörperauswahl darauf geachtet, dass die Jahrringbreiten bei den Proben im Querschnitt möglichst gering variieren und die Jahrringe in der Querschnittebene möglichst parallel zu den Probenkanten verlaufen.

Die Prüfung wurde in den in Abbildung 1.4 dargestellten Scherebenen in den vier Klimastufen (Tab. 2.1) mit einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick/Roell Z100, durchgeführt. Die Wegmessung erfolgte mittels Videoextensometer und an der Prüfvorrichtung angebrachten Messstreifen. Die Kraftmessung wurde mittels maschineninterner 100 kN Kraftmessdose vorgenommen.

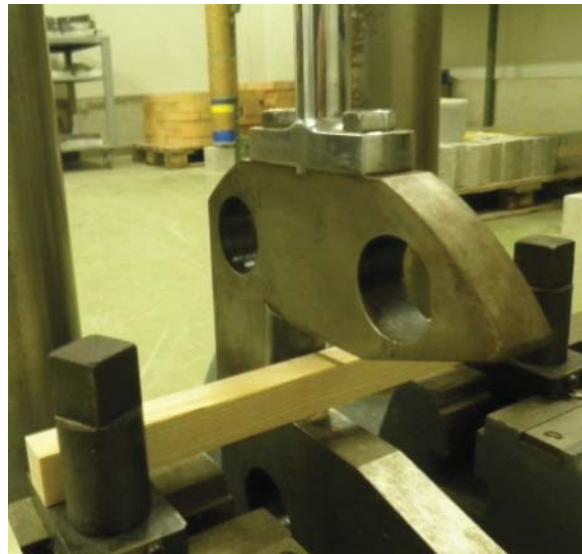


Abb. 2.1 Bruchschlagarbeitsprobe vor der Prüfung, Schlagarm des Pendelschlagwerks

Die ermittelten Daten wurden mit Software „testXpert II“ ausgewertet. Probengeometrie und -masse wurden direkt vor der Prüfung aufgenommen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.2(a) dargestellt. Um ein Verkanten der Probe aufgrund leichter Abweichungen der Probengeometrie zu vermeiden, wurden mögliche Luftspalte zwischen Probe und der Messvorrichtung mit Distanzscheiben ausgeglichen (Abb. 2.2(b)). Der Schervorgang findet statt, indem der Metallstempel eine Kraft auf die in der Vorrichtung fixierte Probe ausübt.

Die Scherfestigkeit als die maximal aufzubringende Kraft bezogen auf die Scherfläche ist nach Gleichung 2.2 zu berechnen:

$$\tau = F_{max} / (b * h) \quad (2.2)$$

τ : Scherfestigkeit [N/mm^2]

F_{max} : maximale Kraft [N]

b, h : Breite, Höhe der Probe in der Scherfläche [mm]

In einem Vorversuch wurden Prüfungsgeschwindigkeit und Abbruchkriterien variiert und anschliessend so festgelegt, dass die Prüfung in einem zeitlichen Rahmen von $90 \pm 30 \text{ s}$ bei allen Belastungsrichtungen und Klimastufen abläuft. Geprüft wurde mit einer Vorkraft von 100 N und einer

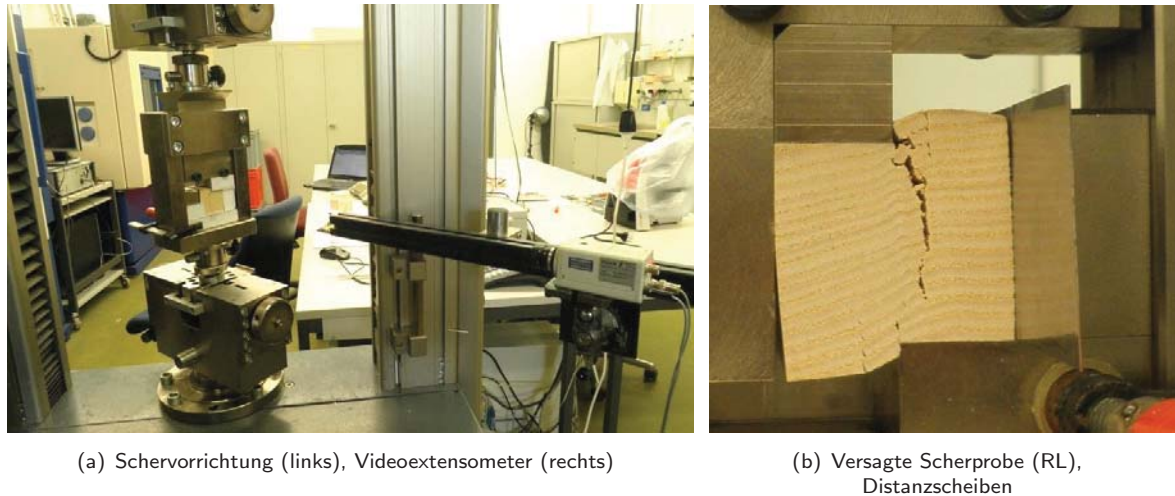


Abb. 2.2 Druckscherversuch

Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min . Die maximale Dehnung der Proben wurde auf 20%, die maximale Versuchsdauer auf 4 min festgelegt.

Da F_{max} in den Beanspruchungsrichtungen RT und TR innerhalb der Abbruchkriterien (Prüfzeit, Dehnung) nicht bestimmt werden kann, wurde zusätzlich die zum Erreichen der 0.2 % Dehngrenze notwendige Kraft ermittelt und daraus analog zu Gleichung 2.2 die Scherfestigkeit $\tau_{0.2}$ bestimmt. Dabei ist die 0.2%-Dehngrenze ein häufig in der Metallurgie verwendeter Kennwert, der die Spannung beschreibt, bei der sich eine plastische Verformung von 0.2 % einstellt.

2.2.3 Kompaktzugversuch

Die Ermittlung der Bruchzähigkeit wird in Anlehnung an ASTM E 399 (2009) durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Bestimmung des Spannungsintensitätsfaktors K_{IC} in Abhängigkeit von Holzfeuchte und Rissausbreitungssystem.

Nach der Klimatisierung der Probekörper erfolgte der Zuschnitt der Proben und die Bohrung der Löcher gemäß der normativen Vorgabe (Abb. 2.3(a)).

Zur Anwendung der LEBM muss die Rissfront so gestaltet sein, dass sich unter Zugbelastung ein singuläres Spannungsfeld mit der höchsten Spannung in der Rissspitze aufbaut. Die Rissinitiierung erfolgte per Einschnitt mit einem Einweg-Mikrotommesser am Ende eines mit der Kreissäge eingebrachten flachen Grundes. Um einen Anriss mit definierter Länge vorzugeben, wurde die Probe manuell von oben auf ein fixiertes Mikrotom mit begrenztem Anschlag gedrückt.

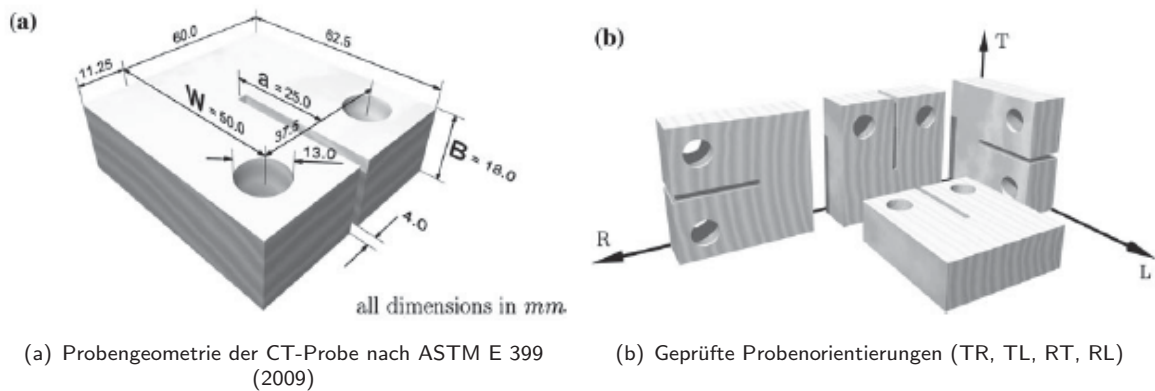


Abb. 2.3 CT-Proben zur Ermittlung der Bruchzähigkeit (Ozyhar, Hering und Niemz, 2012)

Die Prüfung wurde an einer Universalprüfmaschine der Zwick/Roell Z010, durchgeführt. Die erfassten Daten wurden mit der Software „testXpert II“ ausgewertet.

Gemessen werden der Kraftanstieg mittels maschineninterner Kraftmessdose und die Rissaufweitung per Videoextensometer und an den Proben angebrachten Messstreifen. Die Probe ist über zwei Bolzen fest in der Prüfeinrichtung eingespannt (Abb. 2.4).



Abb. 2.4 Eingespannte CT-Probe (links), Videoextensometer (rechts)

Die instabile Rissausbreitung soll innerhalb einer Prüfzeit von $90 \pm 30 \text{ s}$ erreicht werden. Die Prüfgeschwindigkeit wurde mit 1 mm/min für die Rissausbreitungssysteme RT bzw. TR und mit 0.5 mm/min für die Systeme RL bzw. TL festgelegt. Durch einen Vorversuch wurde festgestellt, dass die Prüfgeschwindigkeit im Bereich von $0.5 - 1.5 \text{ mm/min}$ keinen signifikanten Einfluss auf K_{IC} hat.

K_{IC} ist gemäß Gleichung 2.3 zu berechnen.

$$K_{IC} = F_Q / (B_W) * f(a/W) \quad (2.3)$$

Wobei:

$$f(a/W) = (2+a/W)(0.866+4.64(a/W)-13.32(a/W)^2+14.72(a/W)^3-5.6(a/W)^4)/((1-(a/W)^{3/2})) \quad (2.4)$$

K_{IC} : Spannungsintensitätsfaktor [$MPa \cdot m^{1/2}$]

F_Q : massgebende Kraft [N]

a : Risslänge [mm]

B : Probendicke [mm]

W : effektive Probenbreite [mm]

$f(a/W)$: Geometriefaktor

Nach ASTM E 399 (2009) sind drei typische Verläufe im Kraft-Rissaufweitungs-Diagramm und daraus abgeleitet drei Fälle zur Bestimmung der massgebenden Kraft F_Q zu unterscheiden (Abb. 2.4). Dabei entspricht F_Q der maximalen Kraft, die in einem Bereich zwischen der Tangente im elastischen Bereich der Kraft-Rissaufweitungs-Beziehung und einer 5 % geringer ansteigenden Sekante erreicht wird. In vielen Fällen wird diese Fallunterscheidung nicht durchgeführt, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist. So wählten u.a. Logemann und Schelling (1992), welche die feuchteabhängige Bruchzähigkeit an Fichte im Mode I untersucht haben, grundsätzlich den Ansatz $F_Q = F_{max}$ (Typ III) zur Bestimmung der massgebenden Kraft.

Da ein Einfluss der Länge des Anrisses (bei gleicher Risslänge a) auf K_{IC} vermutet wird, wurde dies in einem Vorversuch an CT-Proben mit verhältnismässig homogenem Materialverhalten aus MDF untersucht. Dafür wurden drei verschiedene Anrisslängen (6.5 mm , 3.5 mm und 2 mm) bei gleicher Risslänge a in jeweils fünf CT-Proben aus MDF eingebracht und diese anschliessend geprüft. Innerhalb des betrachteten Bereichs war kein signifikanter Einfluss der Anrisslänge auf K_{IC} festzustellen. Daher wurde der 37.5 mm lange Kreissägeeinschnitt mittels Mikrotommesser um einen 2 mm langen Anriss verlängert.

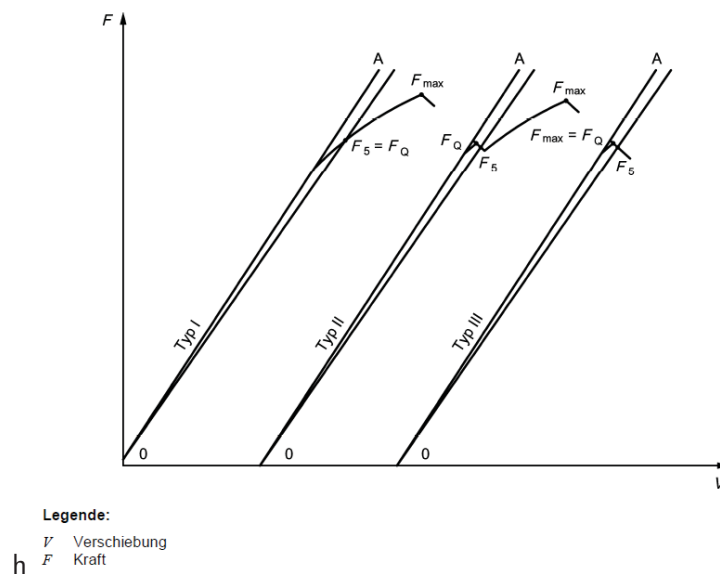


Abb. 2.5 Fallunterscheidung zur Bestimmung von F_Q (DIN EN ISO 12737, 2011)

2.2.4 Ultraschallmessung

Schall ist die mechanische Schwingung eines elastischen Mediums. Es wird unterschieden zwischen nicht hörbarem Schall (Frequenz kleiner als 20 kHz) und Ultraschall mit einer Frequenz über 20 kHz. Beim Messen von Holz und Holzwerkstoffen mit Ultraschall liegt die Frequenz zwischen 100 kHz und 50 MHz. Allerdings führen hohe Frequenzen zu starker Absorption und sind daher nur mehr für Messungen an sehr kleinen Proben zu verwenden. Schwingen die Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle, handelt es sich um Longitudinalwellen. Mit den gemessenen Durchlaufzeiten von Longitudinalwellen kann der Elastizitätsmodul bestimmt werden. Um den Schubmodul zu bestimmen, werden Transversalwellen benötigt, welche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen.

Die so bestimmten Steifigkeiten entsprechen nicht den statisch bestimmten Werten und liegen etwa 10 bis 20 % höher. Die Abweichung kann durch Einbeziehung der statisch ermittelten Querkontraktionszahlen korrigiert werden (Gleichung 2.5).



Abb. 2.6 Prüfkörper der Ultraschallmessung

$$E_L = C_{LL}k_L = \rho v_{LL}^2 \frac{1 - \nu_{LR}\nu_{RL} - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{LT}\nu_{TL} - 2\nu_{RL}\nu_{TR}\nu_{TL}}{1 - \nu_{RT}\nu_{TR}} \quad (2.5a)$$

$$E_R = C_{RR}k_R = \rho v_{RR}^2 \frac{1 - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{TL}\nu_{LT} - \nu_{RL}\nu_{LR} - 2\nu_{TR}\nu_{LT}\nu_{LR}}{1 - \nu_{TL}\nu_{LT}} \quad (2.5b)$$

$$E_T = C_{TT}k_T = \rho v_{TT}^2 \frac{1 - \nu_{TL}\nu_{LT} - \nu_{LR}\nu_{RL} - \nu_{TR}\nu_{RT} - 2\nu_{LT}\nu_{RL}\nu_{RT}}{1 - \nu_{LR}\nu_{RL}} \quad (2.5c)$$

Zur Bestimmung des E-Moduls mittels zerstörungsfreier Methodik kamen zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die jeweils für eine spezifische Prüfkörpergeometrie anwendbar sind. Zum einen wurde an den Würfeln mit einer Kantenlänge von 10 mm eine Ultraschallmessung durchgeführt. Die Durchlaufzeit wurde hierbei mit dem tragbaren Ultraschallprüfgerät Epoch XT von der Firma Olympus (Abb. 2.7(a)) bestimmt. Dieses Gerät führt eine zerstörungsfreie Messung gemäss DIN EN 12668-1 durch. Für die Messungen wurden je zwei Messköpfe (für Longitudinal- und Transversalwellen) von Parametrics verwendet. Die Longitudinalwelle wurde mit einer Frequenz von 2.27 MHz und die Transversalwelle mit 1.00 MHz durch die Probe gesendet. Die Messköpfe (Sender und Empfänger) wurden an einer Einspannvorrichtung (Abb. 2.7(b)) angebracht und gegeneinander ausgerichtet. Dies führt zu einem gleichmässigen Anpressdruck für jede Holzprobe.

Um Zwischenräume und somit Messverfälschungen zwischen den Messköpfen und der Holzprobe zu vermeiden, wurde als Kopplungsmittel Ultraschallgel II verwendet. Dieses wurde beidseitig auf den Prüfkörper aufgetragen. Die Durchlaufzeit wurde bei einem Schwellenwert von 30 %

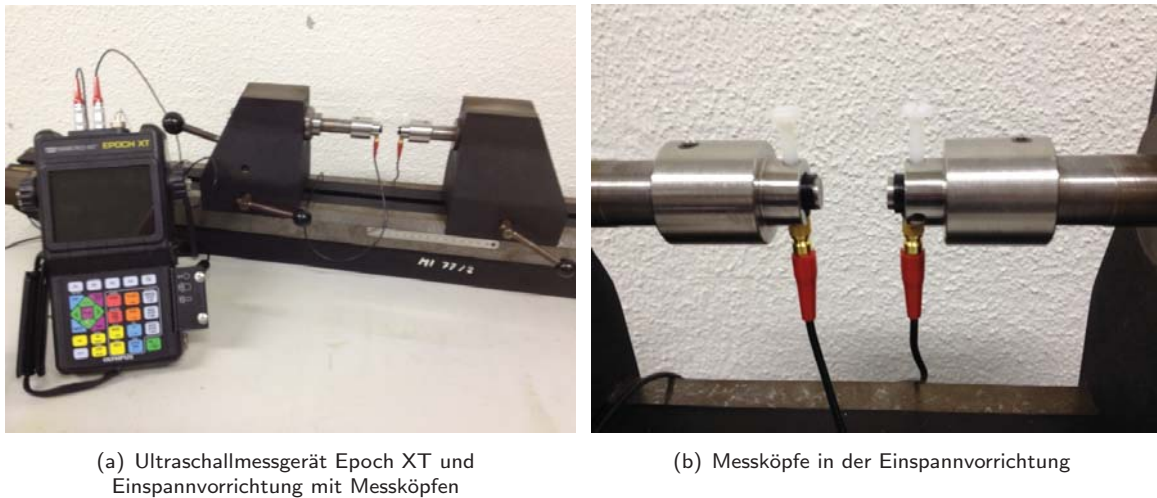


Abb. 2.7 Ultraschallmessung mit dem System Epoch XT)

der maximalen Amplitude gemessen. Aus der Durchlaufzeit kann die Schallgeschwindigkeit mit Gleichung 2.6 berechnet werden. Da bei der Longitudinalwelle die Fortpflanzungsrichtung gleich der Schwingungsrichtung ist, gilt dort $i = j$.

$$c_{ij} = s_i / t \quad (2.6)$$

c_{ij} : Schallgeschwindigkeit [m/s]

s_i : Abmessung in der Hauptschnitttrichtung i [mm]

t : Durchlaufzeit [s]

i : Fortpflanzungsrichtung der Schallwelle

j : Schwingungsrichtung der Schallwelle

Gemäss Niemz (1993) erreicht die Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung des Holzes 3 bis 4 mal höhere Werte als senkrecht zur Faserrichtung, in tangentialer Richtung erhält man tendenziell etwas kleinere Werte als in radialer Richtung. Neben der Faserrichtung des Holzes haben noch andere Parameter einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit. Dazu zählen insbesondere die Faserlänge, die Rohdichte, der Anteil von Früh- und Spätholz, Holzfehler, der Feuchtegehalt sowie der Faserwinkel. Wie Niemz, Kucera und Bernatowicz (1999) gezeigt haben, steigt die Schallgeschwindigkeit zudem mit zunehmender Frequenz.

An Stäben mit einer Länge von 300 mm wurde die Schallgeschwindigkeit mit einem Ultraschallmessgerät BP5 der Firma Steinkamp mit konischen Sensoren bestimmt. Es wurde die Durchlaufzeit gemessen und mittels Gleichung 2.6 die Schallgeschwindigkeit berechnet. Durch die Einspannvorrichtung konnte ein gleicher Anpressdruck für alle Proben erreicht werden. Die Messfrequenz der Longitudinalwellen betrug 25 kHz.

Um genaue und einwandfreie Resultate zu erhalten, muss die Messeinrichtung im Vorhinein kalibriert werden. Da die Schallwelle auch einen Teil der Messköpfe durchläuft, wird zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit eine korrigierte Durchlaufzeit t verwendet, wobei von der mit dem EPOCH XT gemessenen Durchlaufzeit eine Vorlaufzeit abgezogen wird.

Um die Vorlaufzeit zu bestimmen, werden drei bis fünf Proben verschiedener Dicke benötigt. Die an diesen Proben gemessenen Durchlaufzeiten (auf der y-Achse) und deren Dicke (auf der x-Achse) werden in einem Diagramm aufgezeichnet. Verbindet man diese drei bis fünf Punkte zu einer Geraden ergibt der Schnittpunkt dieser Geraden mit der y-Achse die Vorlaufzeit.

Wie Merz (2009) gezeigt hat, ist die Bestimmung der Vorlaufzeit mit Aluminium relativ einfach und genau. Darum wurden für die entsprechenden Messköpfe im Fall von Longitudinalwellen $0.89 \mu s$ und im Fall von Transversalwellen $1.06 \mu s$ verwendet. Beim Ultraschallmessgerät BP5 konnte die Vorlaufzeit im Gerät eingestellt werden, damit erübrigt sich ein nachträgliches Korrigieren der abgelesenen Durchlaufzeit.

Aus der Schallgeschwindigkeit und der Dichte kann anhand Gleichung 2.7 der Elastizitätsmodul berechnet werden:

$$E_i = c_i^2 * \rho \quad (2.7)$$

E_i : Elastizitätsmodul [N/mm^2]

c_i : Schallgeschwindigkeit [m/s]

ρ : Dichte [g/mm^3]

i: Fortpflanzungs- und Schwingungsrichtung der Longitudinalwelle

Gemessen wurde in allen Hauptschnitttrichtungen: longitudinal (L), radial (R) und tangential (T) um die drei richtungsabhängigen E-Moduln je Probe zu erhalten.

Zur Bestimmung des Schubmoduls wurden pro Holzprobe Messungen in sechs Ebenen durchgeführt: längs-radial (LR), längs-tangential (LT), radial-tangential (RT), radial-längs (RL), tangential-längs (TL) sowie tangential-radial (TR). Da näherungsweise gilt: $G_{ij} = G_{ji}$ wurde daraus der Mittelwert gebildet. Mit folgender Gleichung 2.8 wird der Schubmodul berechnet:

$$G_{ij} = c_{ij}^2 * \rho \quad (2.8)$$

G_{ij} : Schubmodul [N/mm^2]

c_{ij} : Schallgeschwindigkeit [m/s]

ρ : Dichte [g/mm^3]

i : Fortpflanzungsrichtung der Transversalwelle

j : Schwingungsrichtung der Transversalwelle

2.2.5 Eigenfrequenzmessung

An Stäben mit einer Länge von 300 mm wurde eine Eigenfrequenzmessung durchgeführt. Das verwendete Eigenfrequenzmessgerät Grindo Sonic (Mk5 Industrial) der Firma Lemmer wurde in Kombination mit einem A/D Wandler von Velleman (PCS32) betrieben. Mittels PC und der Software WinDSO FG32 (Version 1.0) von Magnova Components wurden die Abklingkurven der Welle dargestellt und anschliessend der E-Modul nach Gleichung 2.9 aus der Eigenfrequenz berechnet.

$$E = (4\pi * l^4 * f^2 * \rho) / (m_n^4 * i^2) * (1 + i^2 / l^2 * K_1) \quad (2.9)$$

E : Elastizitätsmodul [N/mm^2]

l : Stablänge [mm]

f : Resonanzfrequenz [s^{-1}]

ρ : Rohdichte [kg/m^3]

i : Trägheitsradius in Richtung der Biegeschwingung [mm^2]

K_1, m_n^4 : Konstanten, abhängig von der Ordnung der Schwingung [N/mm^2]

für Schwingungen 1.Ordnung gilt: $K_1=49.48$; $m_n^4=500.6$

2.2.6 Biegeversuch

Der Biege E-Modul und die Biegefestigkeit wurden anhand DIN 52186 bestimmt. Der Dreipunkt-Biegeversuch (Abb. 2.8) wurde mit einer Universalprüfmaschine von Zwick/Roell vom Typ Z100 durchgeführt. Es wurden hierfür die gleichen Proben verwendet, die vorgängig mittels Ultraschall und Frequenzanalyse geprüft wurden.

Aus Abschnitten dieser Proben wurde des Weiteren die Rohdichte, Darrdichte und die Materialfeuchte bestimmt.

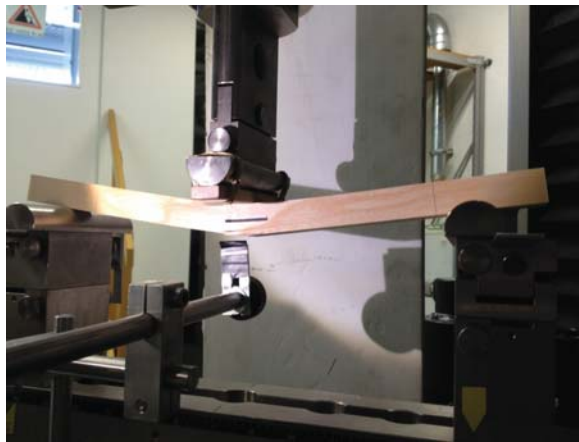


Abb. 2.8 Prüfkörper mit Messstreifen im Dreipunkt-Biegeversuch

2.2.7 Zug- und Druckversuch

Zur Prüfung der elastischen Eigenschaften und der Festigkeitseigenschaften von Eschenholz wurden im Druckversuch quaderförmige Proben nach DIN 52185 (1976) verwendet. Im Zugversuch wurden hantelförmige Proben mit einer Länge von 95 mm und einer Querschnittfläche am Rand von $25 \times 25\text{ mm}$ und in der Mitte der Probe von $14 \times 14\text{ mm}$ verwendet, um die Bruchzone im Zentrum der Probe zu konzentrieren (Abb. 2.9). Zur Bestimmung der Zugfestigkeit in longitudinaler Richtung wurden zusätzlich Proben gemäss DIN 52188 (1979) verwendet.

Die Versuche wurden mit der Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z010 mit einer Maximalkraft von 10 kN durchgeführt. Zuerst wurde an 3-5 Proben die Last bei einer plastischen Verformung von 0.2% bestimmt. Für die Prüfung der elastischen Eigenschaften wurden die Proben anschliessend bis auf 40% der ermittelten Grenzlast belastet, um eine elastische Dehnung zu sicher zu

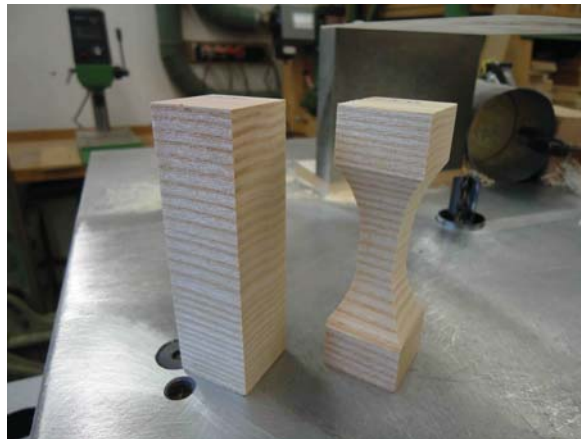


Abb. 2.9 Prüfkörper für Druck- (links) und Zugversuch (rechts)

stellen. Die Prüfung wurde zwei mal durchgeführt, um beide Richtungen quer zur Belastungsrichtung mittels Video Image Correlation aufzunehmen. Die Ansteuerung der LCD-Kamera und die Aufnahme der Bilder wurde über das Programm „VIC Snap“ durchgeführt. Dabei wurde eine Samplerate von $1/s$ gewählt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 0.2 mm/min eingestellt. Somit ergaben sich zwischen 50-100 Bilder je Versuch. Die maximale Kraft in longitudinaler Richtung ergab 4500 N und in radialer sowie tangentialer Richtung jeweils 760 N .

Um keine Einspannmomente zu erzeugen wurden die Druckproben unten auf eine fixe horizontale Platte aufgelegt und oben über eine gelenkige Kopfplatte belastet. Beim Zugversuch wurden die Proben mittels konischer Klemmbacken seitlich eingespannt und die Zugkraft wurde über Haftreibung auf die Probe übertragen. Die durch die Einspannung entstehenden Momente und Zwängungen verursachten eine Vorkraft auf die Probe bzw. auf die Maschine. Um im entlastetem Zustand messen zu können, wurde daher vor der Prüfung die Kraft 0 N angefahren. Der E-Modul wurde in einem Bereich von 100 N bis 40% der Grenzlastermittlung ermittelt.

Nach der Bestimmung der elastischen Eigenschaften wurden die Proben bis zum Materialversagen belastet um die Zug- und Druckfestigkeit zu bestimmen.

2.2.8 Rohdichtebestimmung

In Anlehnung an DIN 52182 (1976) wird die Rohdichte der Prüfkörper gemäss Gleichung 2.10 ermittelt.

$$\rho_{\omega} = m_{\omega}/V \quad (2.10)$$

Wobei:

$$V = s_l * s_r * s_t \quad (2.11)$$

ρ_{ω} : Rohdichte [g/cm^3]

m_{ω} : Masse des Holzes im feuchten Zustand [g]

V : Volumen [cm^3]

s_i : Abmessung longitudinal, radial, tangential [cm]

Mit einer elektronischen Messwaage der Firma Mettler-Toledo wurde die Masse (Genauigkeit 0.001 g) und mit einem Messschieber der Firma Mituyo die Abmessungen (Genauigkeit 0.01 mm) der klimatisierten Probekörper ermittelt.

2.2.9 Holzfeuchtebestimmung

Die Bestimmung der Holzfeuchte wurde nach dem Darrverfahren gemäss DIN EN 13183-1 (2002) durchgeführt. Nachdem die Masse, der im jeweiligen Klima konditionierten Prüfkörper ermittelt worden ist, werden diese bis zum Erreichen der Darrmasse in einem Trockenschrank bei 103°C gelagert. Hat sich Massenkonzanz eingestellt, werden die Proben in einem Exsikkator abgekühlt und anschliessend gewogen. Die Berechnung der Holzfeuchte erfolgt nach Gleichung 2.12.

$$\omega = (m_{\omega} - m_t)/m_t * 100 \% \quad (2.12)$$

ω : Holzfeuchte [%]

m_t : Masse des Holzes im darrtrockenen Zustand [g]

m_{ω} : Masse des Holzes im feuchten Zustand [g]

2.2.10 Datenanalyse

Die untersuchten Zielgrößen sind, wie auch die Einflussgrößen Feuchte und Rohdichte, stetige Größen. Im Vergleich zu stetigen Merkmalen, die beliebig viele Werte annehmen können, sind diskrete Merkmale in ihrer Anzahl begrenzt (z.B. Klimastufe, Beanspruchungsrichtung). Die entscheidenden Zusammenhänge werden durch Plots veranschaulicht und durch Angabe des arithmetischen Mittelwerts ($\bar{x}$) und dem Variationskoeffizienten (v) unterlegt. Die grafische Darstellung von Lage und Streuung einer stetigen Größe bezogen auf eine diskrete Einflussgröße erfolgt mittels Box-Plots. Dabei werden neben dem arithmetischem Mittelwert und dem Median (50 % Quantil) die 25 % bzw. 75 % Quantile als Box und Maximalwerte als Whisker veranschaulicht.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse wurden die Zusammenhänge zwischen stetigen Einfluss- und stetigen Zielgrößen untersucht. Die Anpassung der Modellfunktionen erfolgte nach der „Methode der kleinsten Quadrate“. Zur Bewertung des ermittelten Zusammenhangs dient das Bestimmtheitsmass R^2 . Es beschreibt den Anteil der Variation von y , die durch das Regressionsmodell beschrieben wird, im Verhältnis zu der in Realität vorliegenden Streuung. Durch eine Analyse der Residuen wurde geprüft, ob der gewählte Ansatz notwendige Voraussetzungen erfüllt. Bei linearer Regression sollten die Residuen voneinander unabhängig sein, also keinen Trend in der Reihenfolge ihrer Messung aufweisen, annähernd normalverteilt sein und einen Erwartungswert von „0“ haben. Der sogenannte „Q-Q-Plot“ (Abb. 3.2(a)) zeigt eine Möglichkeit, die Normalverteilung qualitativ zu bewerten. Die Forderung einer gleichmässigen Streuung der Residuen um den Mittelwert der Zielgröße und um den Erwartungswert „0“ kann mit einem „Tukey-Anscombe-Plot“ (Abb. 3.2(b)) überprüft werden.

3 Ergebnisse

3.1 Festigkeitskenngrößen

3.1.1 Bruchschlagarbeit

Abbildung 3.1 zeigt die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse mit den berücksichtigten Haupteffekten Holzfeuchte und Rohdichte auf die Zielgröße Bruchschlagarbeit. Neben Erwartungswert („Estimate“) und Standardabweichung („Std. Error“) der Koeffizienten sind in der letzten Spalte p-Werte zu sehen. Diese indizieren, ob der entsprechende Koeffizient einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße hat. Eine Analyse der Residuenplots - (näher erläutert in Abs. 2.2.10) zeigt, dass die Voraussetzungen zur Regressionsanalyse gegeben sind (Abb. 3.2(a) und 3.2(b)).

Das Bestimmtheitsmass R^2 von 0.57 zeigt an, dass es neben den betrachteten Faktoren noch weitere wesentliche Einflussgrößen geben muss, die in dem Versuch nicht betrachtet worden sind.

```
Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -67.2367    43.1629  -1.558  0.12265
Feuchte      -0.5257     3.2384  -0.162  0.87140
Dichte       211.4867    72.5421   2.915  0.00444 **
Feuchte:Dichte  1.4085     5.4203   0.260  0.79554
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.419 on 94 degrees of freedom
(29 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.5753,    Adjusted R-squared:  0.5618
F-statistic: 42.45 on 3 and 94 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Abb. 3.1 Ergebnis der Regressionsanalyse - Bruchschlagarbeit, Holzfeuchte und Rohdichte
(Software: „R“)

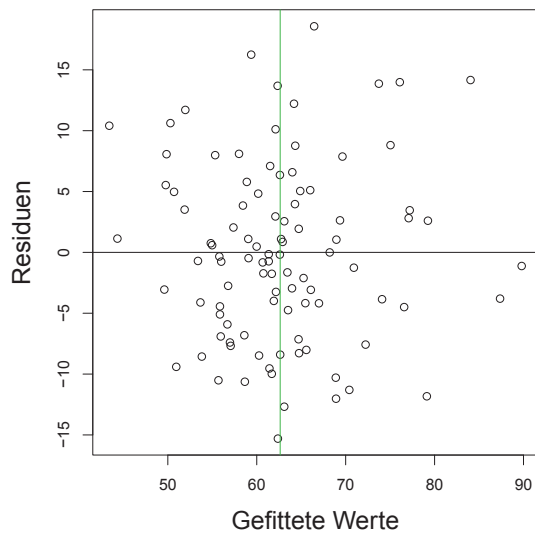
Es wird deutlich, dass der Koeffizient der Dichte innerhalb eines Konfidenzintervalls von 95 % einen signifikanten Einfluss auf die Zielgrösse hat. Der Feuchteinfluss und die Wechselwirkung zwischen Feuchte und Dichte werden als nicht signifikant eingestuft.

In Abbildung 3.2(c) ist die starke Streuung der Bruchschlagarbeitswerte in Abhängigkeit der mittleren Holzfeuchte zu erkennen. Abbildung 3.2(d) zeigt die Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktion (engl. „Probability-Density-Function“ - PDF) der Holzfeuchte, wobei eine geringe Streuung der Feuchte in den einzelnen Klimastufen vorhanden ist. Ein Zusammenhang zwischen Feuchte und Bruchschlagarbeit ist anhand der Ergebnisse nicht festzustellen.

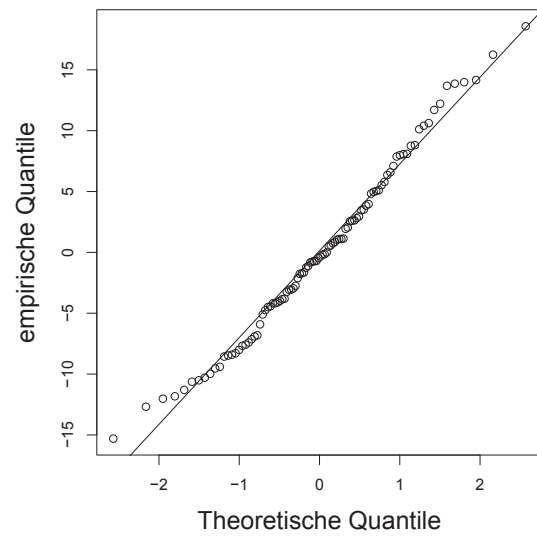
In Abbildung 3.3 ist die Verteilung der Bruchbilder in Abhängigkeit von der mittleren Holzfeuchte je Klimastufe veranschaulicht. Die Legende wird durch Abbildung 3.4 näher erläutert. Neben komplett stumpfen bzw. fasrigen Brüchen treten häufig auch gemischte Bruchbilder auf, wobei ein eher stumpfer Bruch an der zugbelasteten, ein deutlich fasrigerer Bruch an der druckbelasteten Seite der Probe zu erkennen ist. Je nachdem ob fasriger oder stumpfer Anteil im Bruchbild überwiegt, ist zwischen tendenziell stumpfen und tendenziell fasrigen Bruchbildern zu unterscheiden. Einige Proben werden vom Pendelschlagwerk durch einen Schlag vollständig durchtrennt, bei anderen ist noch eine Verbindung der Fasern an der druckbelasteten Seite vorhanden. Es kann vom Trocken- bis zum Nassklima ein Trend vom eher stumpfen Bruch mit Durchtrennung zum überwiegend fasrigen, nicht vollständig durchtrennten Bruch ausgemacht werden.

Die in Tabelle 3.1 zusammengefassten Ergebnisse des Schlagzähigkeitsversuchs in Abhängigkeit von der Holzfeuchte zeigen, dass die Werte der Bruchschlagarbeit in den Klimastufen 20/50 und 20/65 stärker streuen als in den Klimastufen 20/85 und 20/90. Deutliche Ausreiser wurden per Residuenanalyse detektiert und der Messreihe entnommen. Generell fällt die Streuung geringer aus als bei den in Tabelle 1.1 angegebenen Literaturwerten. Der Mittelwert bei ca. 12 % Holzfeuchte liegt im Bereich der Literaturwerte aber deutlich unter den Schlagzähigkeitswerten von Kühne (1951b). Die grossen Unterschiede könnten u.a. auf unterschiedliche Prüfinstrumente zurückzuführen sein, wobei Kühne (1951b) ein Pendelschlagwerk mit nur 5 m kg Ausgangsschlagarbeit verwendet hat.

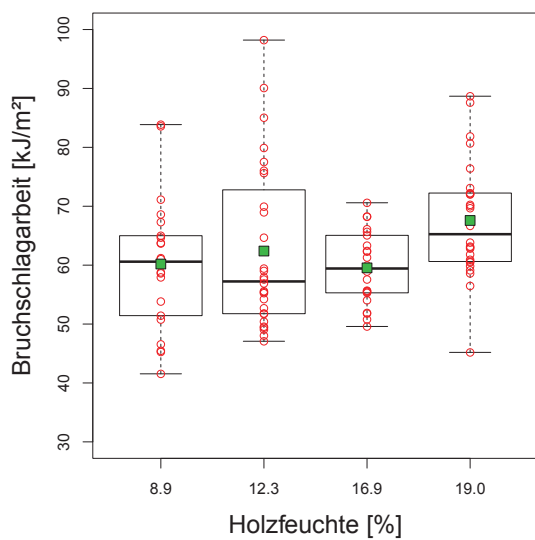
Die Betrachtung der Bruchbilder zeigt, dass mit zunehmender Feuchte häufiger stark zerfaserte, duktile Brüche zu beobachten sind, wobei die Proben durch einen Schlag häufig nicht komplett durchtrennt werden. Mit steigender Feuchte sinkt der Elastizitätsmodul bei Biegung und Druck quer zu Faser. Die plastische Verformung an der Bruchstelle nimmt daher zu. Findet ein stumpfer Bruch statt, steht die aufgebrachte Schlagenergie fast vollständig der Durchtrennung der Fasern



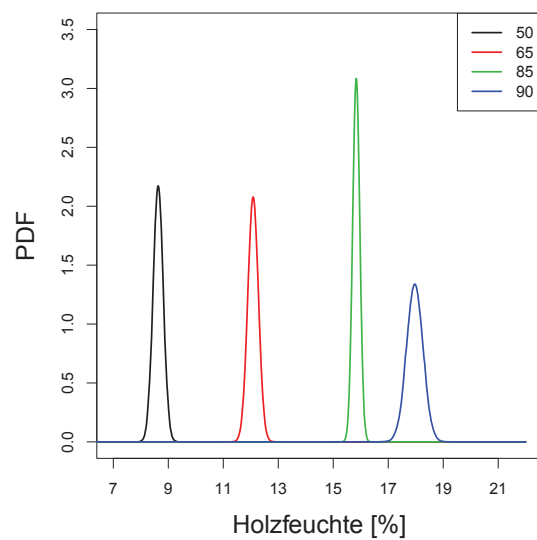
(a) Q-Q-Plot, Regression:
Feuchte-Dichte-Bruchschlagarbeit



(b) Tukey-Anscombe Plot, Regression:
Feuchte-Dichte-Bruchschlagarbeit, Mittelwert durch
Linien veranschaulicht



(c) Bruchschlagarbeit in den vier Klimastufen,
Mittelwerte durch Punkte gekennzeichnet



(d) Dichtefunktion der Holzfeuchte in den vier
Klimastufen (Bruchschlagarbeit)

Abb. 3.2 Ergebnisse zur Bruchschlagarbeit

zur Verfügung. Bei eher duktilem Versagen fließt ein Teil der Energie in die Deformation der Probe, sodass zum tatsächlichen Durchschlagen der Probe eine geringere Schlagenergie vorhanden ist.

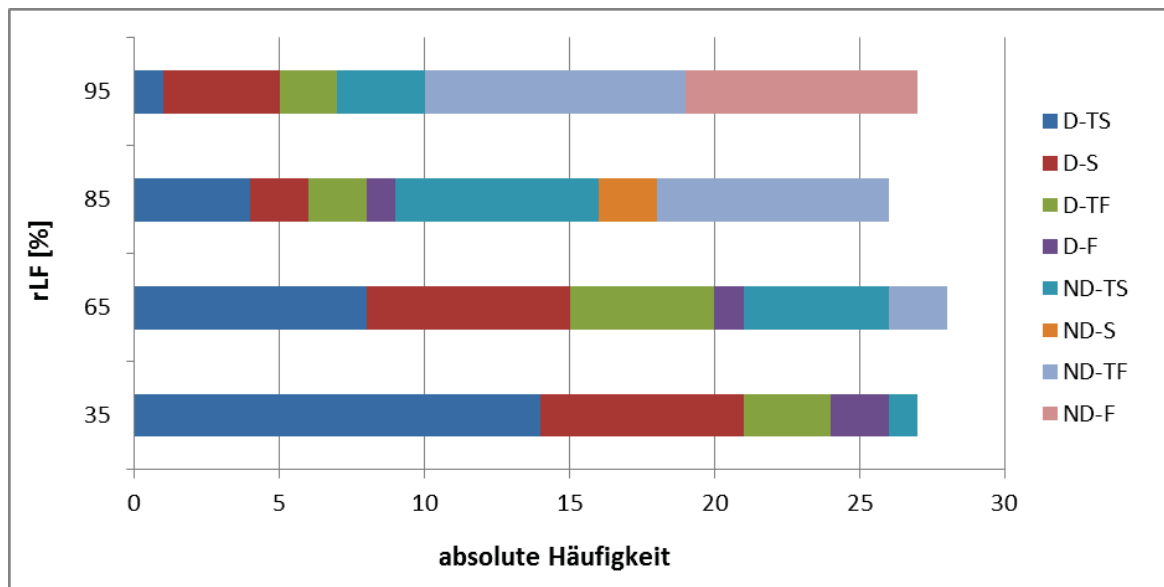
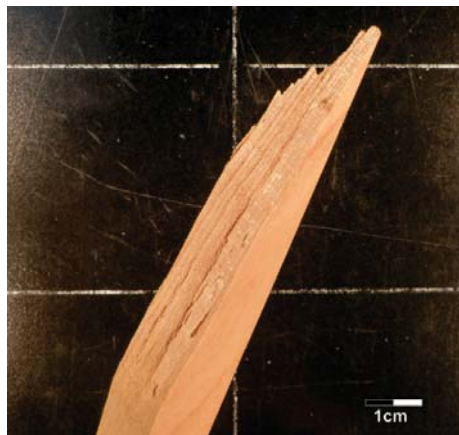


Abb. 3.3 Verteilung der Bruchbilder je Klimastufe bei der Bestimmung der Bruchschlagarbeit (zur Erläuterung der Legende, siehe 3.4)

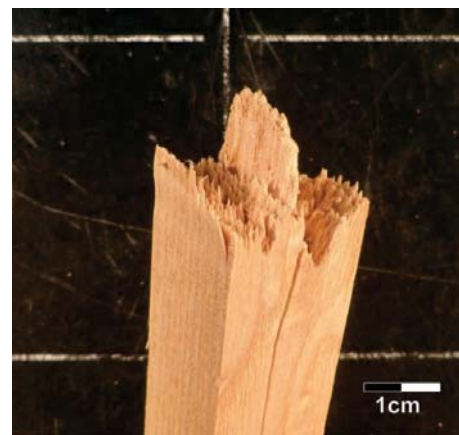
Tabelle 3.1 Ergebnisse des Schlagzähigkeitsversuchs (n=Anzahl der Probekörper)

Klimastufe	n		ω [%]	ρ [g/cm^3]	W_b [kJ/m^2]
20/50	22	$\bar{x}$	8.65	0.595	63.87
		v [%]	1.9	8.2	22.8
20/65	28	$\bar{x}$	12.09	0.597	62.4
		v [%]	1.6	5.5	22.4
20/85	22	$\bar{x}$	15.83	0.579	59.53
		v [%]	0.75	3.5	10.4
20/90	26	$\bar{x}$	17.96	0.608	67.58
		v [%]	1.7	6.4	14.8

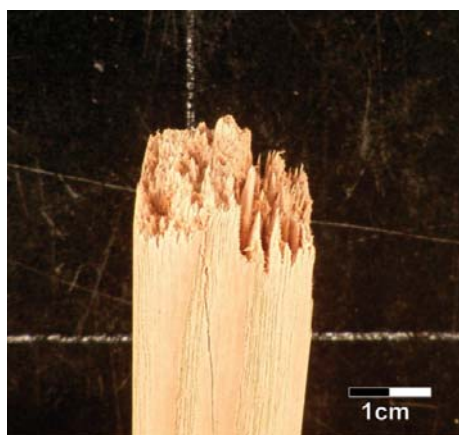
Obwohl die Festigkeit von Holz grundsätzlich mit zunehmender Holzfeuchte sinkt, ist bei dynamischer Biegebeanspruchung aufgrund zunehmender Dämpfung des Schlags bei höheren Holzfeuchten anhand der vorliegenden Messdaten kein Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Schlagzähigkeit festzustellen. Tsoumis (1991), der wie auch Kühne (1951b) einen leichten Anstieg der Schlagzähigkeit mit zunehmender Feuchte bei der Untersuchung nordamerikanischer Holzarten feststellen konnte, trifft ähnliche Aussagen. Auch Kollmann (1951) berichtet von Untersuchungen an Kiefer, Buche und Eiche, bei denen einige Ergebnisse einen Anstieg der Schlagzähigkeit mit steigender Feuchte vermuten lassen.



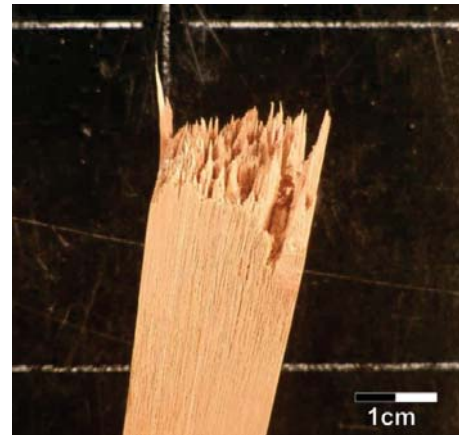
(a) Stumpfer Bruch (S), entlang der Fasern



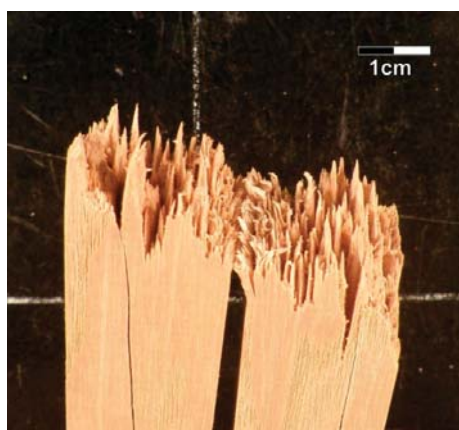
(b) Stumpfer Bruch (S), senkrecht zu den Fasern



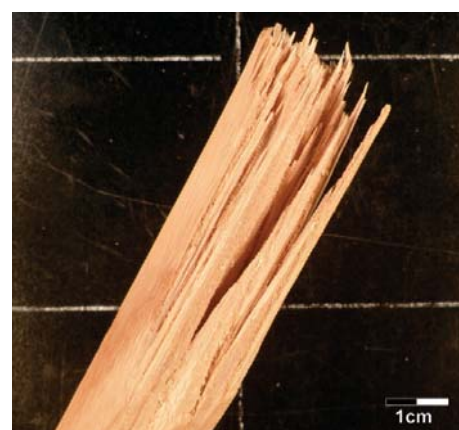
(c) Tendenziell stumpfer Bruch (TS)



(d) Tendenziell fasriger Bruch (TF)



(e) Fasriger Bruch (F), Probe nicht vollständig durchtrennt (ND), (Bruchschlagarbeit)



(f) Fasriger Bruch (F), stark zersplittert

Abb. 3.4 Bruchbilder nach Prüfung der Bruchschlagarbeit

Die Schlagzähigkeitswerte dieser Arbeit weichen im Mittel in den vier Klimastufen weniger als 15 % voneinander ab und sind bei den Proben der Klimastufe 20/90 am höchsten. Ein Zusammenhang zunehmender Bruchschlagarbeit bei zunehmender Normalrohddichte kann anhand des vorliegenden Zusammenhangs zwischen Bruchschlagarbeit und Rohddichte vermutet werden. Bei Kollmann (1941) wird für Esche über einen linearen Zusammenhang berichtet.

Das grosse Streuverhalten der Messwerte und die komplexe Theorie während des Schlags machen die Erklärung dynamischer Festigkeitseigenschaften wie der Schlagzähigkeit schwierig. Quer et al. (1995) untersuchten, inwiefern das bestehende Verfahren durch eine zerstörungsfreie Methode ersetzt werden kann. Als zerstörungsfrei ermittelbare Einflussgrössen wurden Eigenfrequenz und Rohddichte identifiziert, durch die die Streuung der Schlagzähigkeitswerte zu ca. 60 % signifikant geklärt werden konnte.

3.1.2 Druckscherfestigkeit

Die Ergebnisse des Scherfestigkeitsversuchs sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Das Resultat der Regressionsanalyse (Abb. 3.5) bringt zum Ausdruck, dass der Einfluss der betrachteten Faktoren Feuchte, Rohddichte und Belastungsebene auf die Zielgrösse hochsignifikant ist. Der hohe Wert für R^2 zeigt, dass sich die Streuung von $\tau_{0.2}$ durch die ermittelte Modellgleichung 3.1 gut beschreiben lässt.

$$\tau_{0.2} = 0.0095\rho_w - 0.2047\omega + 5.741 + e_i \quad (3.1)$$

e_i : Koeffizienten der Ebenen geäuss Abb. 3.5, wobei $i=(LT, RL, \dots)$ und $e_{LR} = 0$

Unter Einbeziehung der ohnehin schwer interpretierbaren Wechselbeziehungen zwischen den Einflussgrössen kann nur eine geringfügige Steigerung des Bestimmtheitsmasses erreicht werden, sodass diese nicht mit in die Modellgleichung eingehen. Die Anforderungen an die Verteilung der Residuen sind erfüllt. Anhand Gleichung 3.1 ist ersichtlich, dass die Scherfestigkeit $\tau_{0.2}$ mit abnehmender Holzfeuchte und zunehmender Rohddichte steigt.

Die Abnahme von τ und $\tau_{0.2}$ mit zunehmender Holzfeuchte in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung wird in den Abbildungen 3.6(a) und 3.6(b) veranschaulicht. Die Werte der Scherfestigkeit für τ als auch für $\tau_{0.2}$ liegen parallel zur Faser (LT und LR) deutlich höher als bei Beanspruchung quer zur Faser, wobei keine Werte für τ in den Ebenen RT und TR vorliegen. Ist die Scherfestigkeit

Tabelle 3.2 Scherfestigkeit in Abhängigkeit von Belastungsrichtung und Klimastufe; Probenanzahl je Richtung und Klimastufe: 10

Ebene	LT				TL				LR				
	ω [%]	ρ_ω [g/cm^3]	τ [N/mm^2]	$\tau_{0.2}$ [N/mm^2]	ω [%]	ρ_ω [g/cm^3]	τ [N/mm^2]	$\tau_{0.2}$ [N/mm^2]	ω [%]	ρ_ω [g/cm^3]	τ [N/mm^2]	$\tau_{0.2}$ [N/mm^2]	
Klima	$\bar{x}$	9.41	0.62	14.30	11.65	9.15	0.61	3.95	2.79	9.03	0.63	17.24	10.73
20/50	v [%]	3.30	7.90	11.40	12.70	2.90	6.80	13.60	15.70	3.00	5.80	5.30	13.80
20/65	$\bar{x}$	13.95	0.66	13.06	10.02	13.97	0.65	4.30	2.50	13.47	0.64	14.78	9.12
	v [%]	7.40	6.30	14.30	14.50	7.90	5.80	18.90	18.10	9.90	6.20	8.70	14.60
20/85	$\bar{x}$	16.52	0.65	11.14	8.86	16.68	0.65	3.75	2.29	16.38	0.65	12.95	8.35
	v [%]	4.60	6.50	11.50	11.60	5.70	6.90	18.90	15.90	6.40	3.80	9.00	10.80
20/90	$\bar{x}$	18.46	0.65	10.53	8.04	18.34	0.64	3.59	2.07	18.09	0.64	11.41	7.59
	v [%]	5.50	4.60	13.70	14.20	5.00	5.90	16.00	22.70	3.40	7.10	10.50	15.00
Ebene				RL				RT				TR	
20/50	$\bar{x}$	9.14	0.61	5.21	2.89	9.35	0.59	10.03	3.64	9.39	0.60	10.05	4.58
	v [%]	4.20	8.40	26.90	14.30	2.80	4.80	14.40	10.00	3.10	7.30	18.00	15.90
20/65	$\bar{x}$	13.83	0.65	5.61	2.66	14.38	0.64	9.11	3.80	14.05	0.63	8.82	4.33
	v [%]	7.70	6.20	29.70	20.60	1.30	5.70	19.40	18.80	5.70	7.30	19.40	18.90
20/85	$\bar{x}$	16.64	0.64	5.60	2.58	17.84	0.62	6.50	3.05	17.88	0.62	6.96	3.22
	v [%]	6.90	5.30	19.80	16.70	3.00	4.70	17.80	11.20	2.10	3.40	5.80	13.90
20/90	$\bar{x}$	18.24	0.65	4.63	2.20	19.09	0.60	6.13	2.98	18.64	0.60	6.71	3.11
	v [%]	4.70	6.80	19.50	15.80	4.90	6.30	6.40	3.70	5.20	4.70	11.80	8.00

τ : Scherfestigkeit bezogen auf F_{max} [N/mm^2]
 $\tau_{0.2}$ Scherfestigkeit bei 0.2 % plastischer Verformung [N/mm^2]

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  5.740817   0.757510   7.579 5.01e-13 ***
Feuchte      -0.204697   0.013185 -15.525 < 2e-16 ***
Dichte       0.009508   0.001175   8.093 1.73e-14 ***
EbeneLT      0.734240   0.165621   4.433 1.33e-05 ***
EbeneRL     -6.265573   0.161632 -38.764 < 2e-16 ***
EbeneRT     -5.144095   0.168842 -30.467 < 2e-16 ***
EbeneTL     -6.382771   0.163227 -39.104 < 2e-16 ***
EbeneTR     -4.758858   0.167183 -28.465 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8025 on 283 degrees of freedom
(17 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.937,    Adjusted R-squared:  0.9354
F-statistic: 601.4 on 7 and 283 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Abb. 3.5 Ergebnis der Regressionsanalyse - Scherfestigkeit ($\tau_{0,2}$), Feuchte, Rohdichte, Belastungsrichtung (Ebene); Wechselwirkungen bleiben unberücksichtigt (Software: „R“)

$\tau_{0,2}$ bei LT-Beanspruchung grösser als bei LR, wird die höchste Scherfestigkeit bezogen auf F_{max} bei LR-Beanspruchung erreicht. Die in Abbildung 3.7 abgebildeten Box-Plots veranschaulichen die Streuung der Messwerte in den einzelnen Klimastufen und Belastungsrichtungen.

In den Abbildungen 3.8 und 3.9 sind typische Versagensbilder dargestellt. Zeigen LT-, TL-, LR- und RL-Proben einen deutlichen Scherbruch, ist dieser bei RT- und TR-Proben innerhalb der Prüfparameter nicht zu beobachten.

Die Ergebnisse des Druckscherversuchs zeigen, dass alle betrachteten Faktoren signifikanten Einfluss auf die Scherfestigkeit der Esche haben, wobei der Einfluss der Belastungsrichtung am grössten ist. Die Holzfasern sind in longitudinaler Richtung orientiert und bieten bei Schubbeanspruchung in dieser Richtung den grössten Widerstand, was die hohe Scherfestigkeit in Faserichtung (LT und LR) bedingt. Wie bisherige Untersuchungen zur Scherfestigkeit gezeigt haben, liegen die Werte bei den Laubhölzern Buche und Eiche in der LT- Ebene über dem Wert bei LR-Beanspruchung, was auf die versteifende Wirkung der Holzstrahlen in der LT-Ebene zurückgeführt wird (Reiterer et al., 2002; Horvath, Molnar und Niemz, 2008). Die vorliegenden Ergebnisse der Scherfestigkeit $\tau_{0,2}$ bei 0.2 % plastischer Dehnung für Esche bestätigen diesen Zusammenhang.

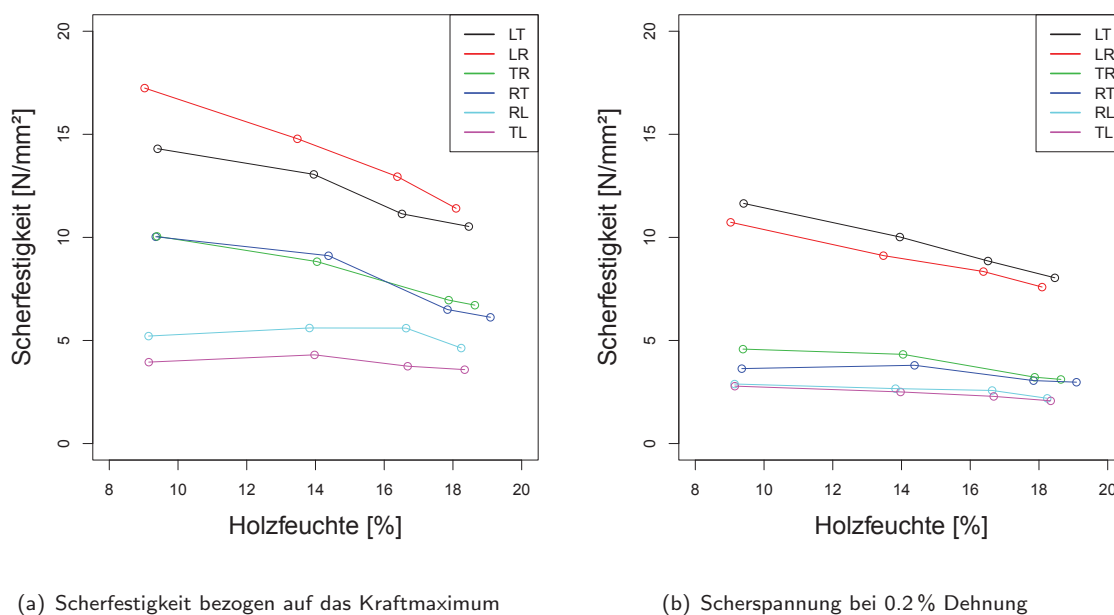
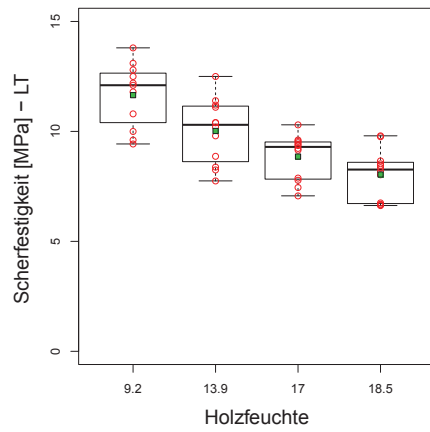


Abb. 3.6 Mittelwerte der Scherfestigkeit/-spannung in Abhängigkeit von Holzfeuchte und Belastungsrichtung

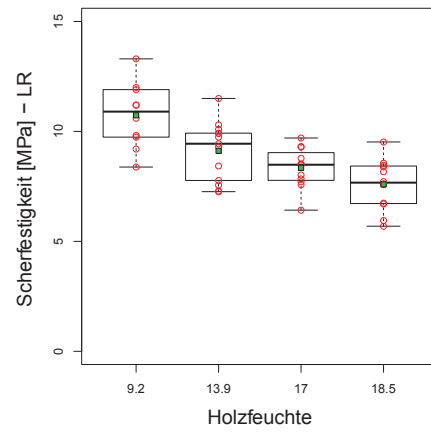
Betrachtet man allerdings die Scherfestigkeit τ bei maximaler Kraft, werden die höchsten Werte in der Ebene LR erreicht.

In Abbildung 3.10 ist dieser Zusammenhang anhand des Spannungs-Dehnungs-Diagramms zweier Proben der Klimastufe 20/50 erläutert. Bei ca. 0.5 mm Dehnung nimmt die LR-Probe zunächst weniger Spannung auf als die LT-Probe. Wird bei LT-Belastung bei ca. 1 mm Dehnung, bei LR-Belastung bei ca. 3 mm Dehnung das Spannungsmaximum erreicht, liegt der erreichte Scherfestigkeitswert der LR-Probe über dem Wert der LT-Probe. Volumenanteil und Größe der Holzstrahlen sind bei Esche deutlich geringer als bei Buche oder Eiche. Es ist deshalb zu vermuten, dass die versteifende Wirkung der Holzstrahlen in der Beanspruchungsrichtung LT bei Eschenholz geringer ist.

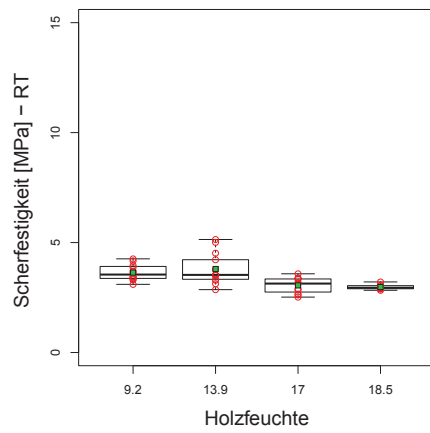
Die Ergebnisse einer Scherfestigkeitsuntersuchung an Esche nach Kollmann (1951), dargestellt in Tabelle 3.3 zeigen ebenfalls die höchsten Werte bei LR-Beanspruchung. Die von Kollmann (1941) dokumentierten Werte wurden durch Scherfestigkeitsmessungen an zweischnittigen Proben ermittelt und weichen deutlich von den Ergebnissen dieser Arbeit ab. Generell liegen die unteren Werte für LT- und LR-Beanspruchung ca. 10%, für TL- und RL-Beanspruchung ca. 25% über den vergleichbaren Werten dieser Arbeit.



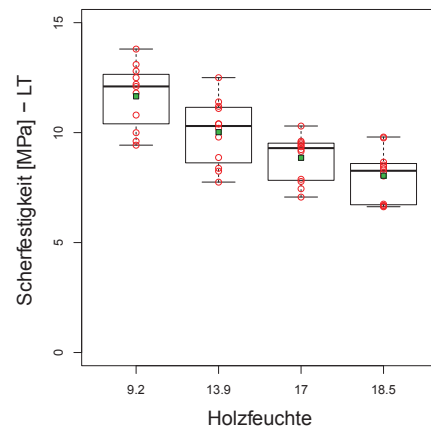
(a) Scherspannung in der LT-Ebene



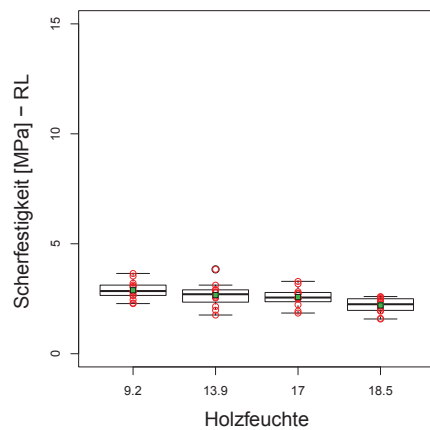
(b) Scherspannung in der LR-Ebene



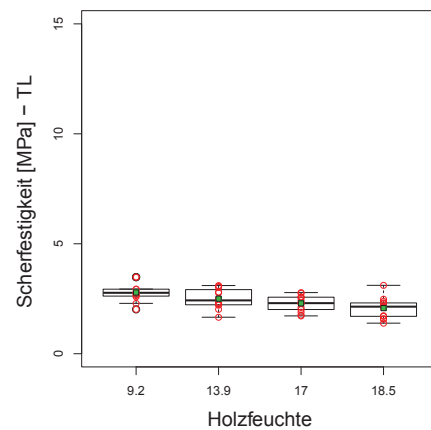
(c) Scherspannung in der RT-Ebene



(d) Scherspannung in der LT-Ebene

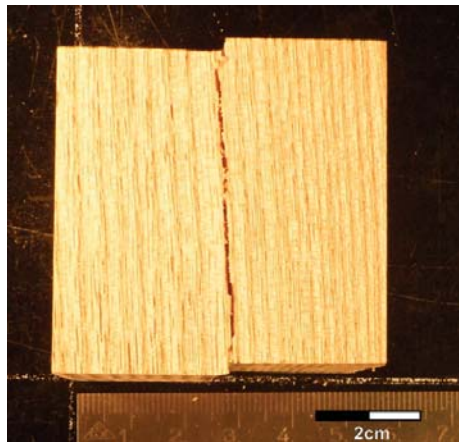


(e) Scherspannung in der RL-Ebene

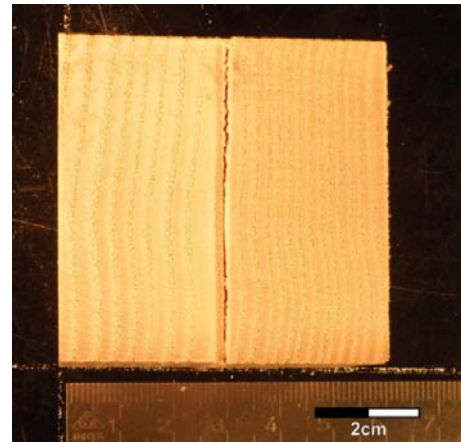


(f) Scherspannung in der TL-Ebene

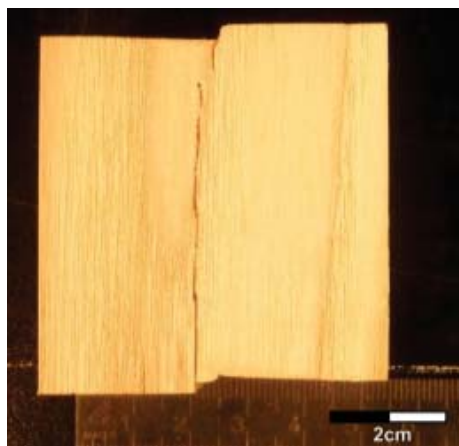
Abb. 3.7 Scherfestigkeit $\tau_{0.2}$ in Abhängigkeit von Klimastufe und Belastungsrichtung, Mittelwerte durch Quadrat gekennzeichnet



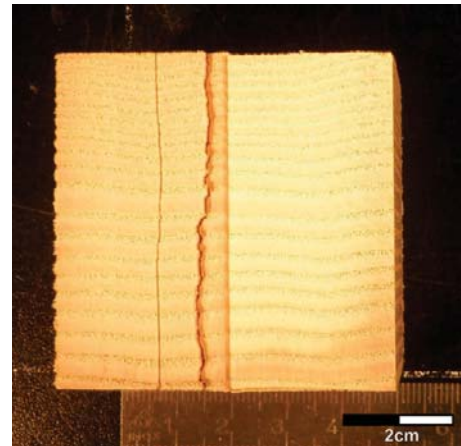
(a) Druckscherprobe in der LT-Ebene (Seitenansicht)



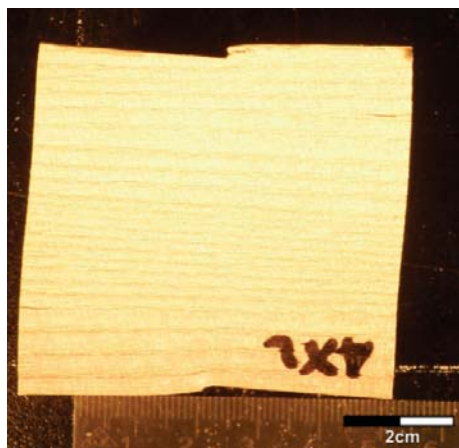
(b) Druckscherprobe in der LT-Ebene (Draufsicht)



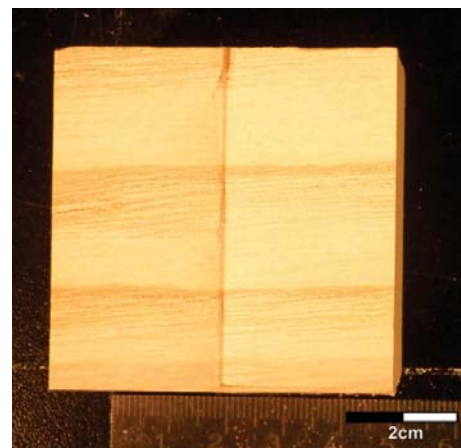
(c) Druckscherprobe in der LR-Ebene (Seitenansicht)



(d) Druckscherprobe in der LR-Ebene (Draufsicht)

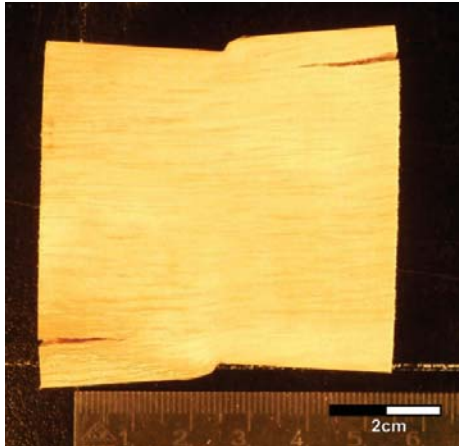


(e) Druckscherprobe in der RT-Ebene (Seitenansicht)

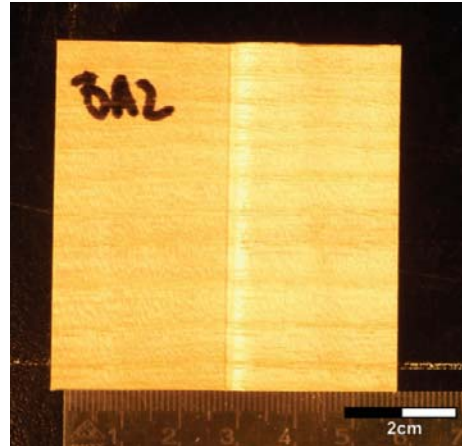


(f) Druckscherprobe in der RT-Ebene (Draufsicht)

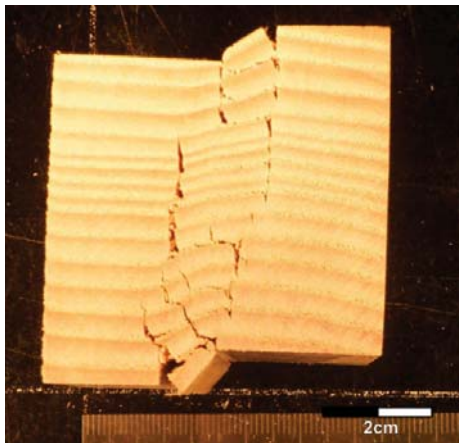
Abb. 3.8 Bilder geprüfter Scherproben



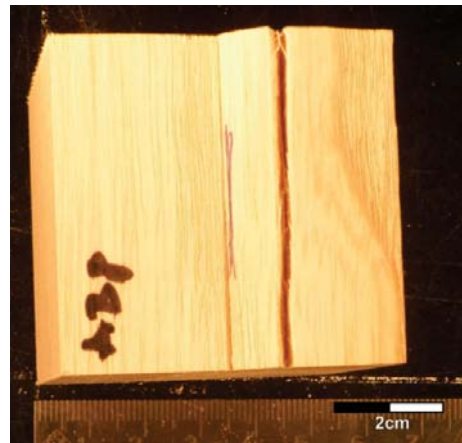
(a) Druckscherprobe in der TR-Ebene (Seitenansicht)



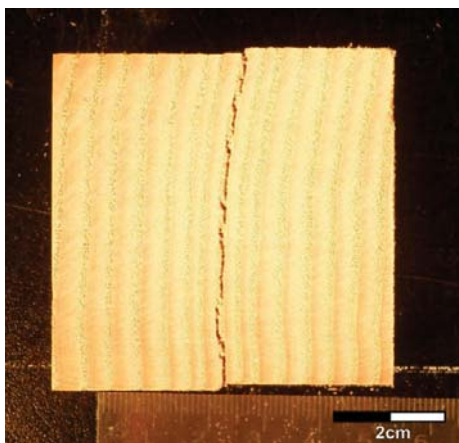
(b) Druckscherprobe in der TR-Ebene (Draufsicht)



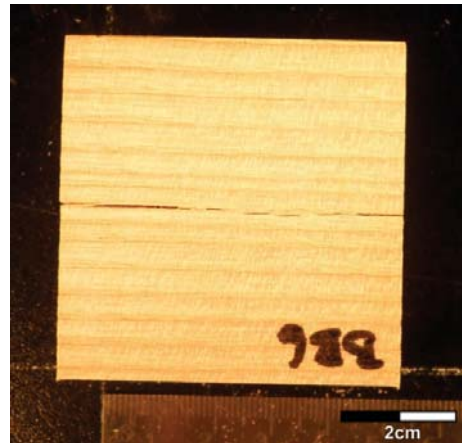
(c) Druckscherprobe in der RL-Ebene (Seitenansicht)



(d) Druckscherprobe in der RL-Ebene (Draufsicht)



(e) Druckscherprobe in der TL-Ebene (Seitenansicht)



(f) Druckscherprobe in der TL-Ebene (Draufsicht)

Abb. 3.9 Bilder geprüfter Scherproben

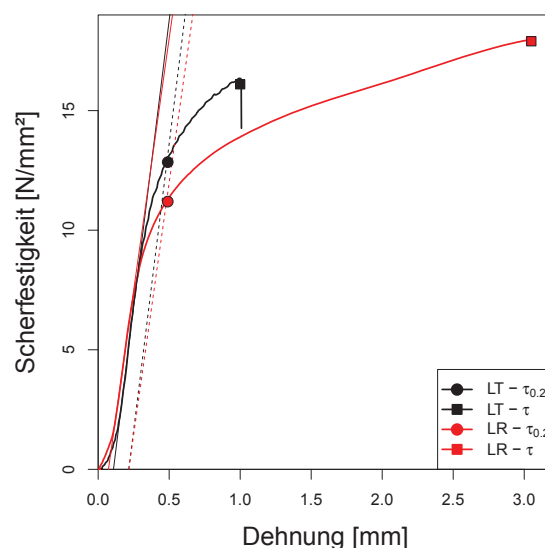


Abb. 3.10 Scherfestigkeit $\tau_{0.2}$ bzw. τ in Abhängigkeit von der Dehnung (Klimastufe: 20/50)

Infolge der hohen Druckfestigkeit in Faserrichtung (Esche: 52 N/mm^2) erfolgt in den Ebenen LT und TL ein deutliches Abscheren entlang der Jahrringgrenze beim Erreichen der Grenzspannung, ohne dass die Probe zuvor erhebliche Deformation erfährt. Bei Schubbeanspruchung quer zur Faser kommt es aufgrund der geringeren Querdruckfestigkeit (Esche: 11 N/mm^2 (Niemz, 1993)) zur Deformation des Probekörpers. Dabei wird der Scherbruch von Effekten wie dem Aufrollen der Fasern (Rollschub) in RL-Richtung und dem Stauchen der Fasern in tangentialer Richtung bei LR-Belastung begleitet.

Das Materialverhalten in den Ebenen RT und TR setzt sich deutlich ab. Die Zellstruktur der Fasern kann der Querdruckbelastung nicht standhalten und wird stark verdichtet. Dabei werden die Zellhohlräume komplett zerstört. Der Probekörper erfährt eine starke Deformation bei ansteigender Krafteinwirkung. Die dadurch eingebrachten Spannungen verursachen Risse in Faserrichtung in zugbelasteten Bereichen ausserhalb der Scherebene. Ein Versagen in Form eines Scherbruchs tritt innerhalb der gewählten Abbruchkriterien nicht ein, sodass die Scherfestigkeit bezogen auf F_{max} für RT- und TR-Belastung nicht bestimmt werden konnte. Die von Kollmann (1951) dokumentierten Werte für RT und TR (vgl. Tab. 3.3), zeigen, dass man bei Belastung in diesen Ebenen, verglichen zu den übrigen Belastungsrichtungen, um ein Vielfaches höhere Werte erhält.

Tabelle 3.3 Scherfestigkeit τ von Esche in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung, $\tau = 9 - 14.8\%$, $\rho = 0.63 - 0.75 \text{ g/cm}^3$ (Kollmann, 1951))

Belastungsrichtung	Scherfestigkeit $\tau [N/mm^2]$
LT	15,4... 18,1
TL	5,4... 7,4
LR	16,2... 19,4
RL	7,5... 9,0
RT	46,4... 50,6
TR	37,1... 43,8

Es ist eine Zunahme der Scherfestigkeit mit steigender Rohdichte festzustellen. Niemz (1993) berichtet analog für den Zusammenhang zwischen Normalrohdichte und Scherfestigkeit.

Ein festigkeitsmindernder Einfluss der Holzfeuchte ist in allen geprüften Belastungsrichtungen zu erkennen. Im Vergleich zu den Mittelwerten der Scherfestigkeit $\tau_{0,2}$ bei 9-10 % Holzfeuchte (Klimastufe 20/50) verringern sich die Mittelwerte bei 18-19 % Holzfeuchte (Klimastufe 20/65) um 31 % bei LT, 29 % bei LR, 25 % bei TL, 24 % bei RL, 17 % bei RT und 33 % bei TR. Durch Feuchteaufnahme werden die stabilisierenden Molekülstrukturen der Zellulose durch zunehmende Bindung von Wassermolekülen im interfibrillaren Bereich geschwächt, sodass die Festigkeit sinkt. Dies gilt besonders bei Beanspruchung in den Ebenen LT und LR, da dort die Belastungsrichtung mit der Orientierung der Fibrillen zusammenfällt. Bei TR-Belastung ist ebenfalls ein deutlicher Feuchteinfluss sichtbar, wobei die Scherfestigkeit besonders während dem Prozess der Kapillarkondensation im Bereich zwischen 14-18 % Holzfeuchte abnimmt.

3.1.3 Bruchzähigkeit

Ein Überblick über die Ergebnisse des Bruchzähigkeitsversuchs ist mit Tabelle 3.4 gegeben. Zur Ermittlung der für K_{IC} massgebenden Kraft werden drei Fälle unterschieden (vgl. Abs. 2.5). Bei Klimastufe 20/50 und 20/65 treten alle drei Fälle auf. In den Klimastufen 20/85 und 20/90 ist die massgebende Kraft vereinzelt nach Typ II, bei den meisten Proben nach Typ III bestimmt worden.

Zwischen Feuchte, Rohdichte, dem Einfluss des Rissausbreitungssystems und der Bruchzähigkeit kann ein enger Zusammenhang festgestellt werden. Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen haben nur geringen Einfluss. Sie werden im Regressionsmodell (Gleichung 3.2) nicht berücksichtigt. Die Voraussetzungen für eine Regressionsanalyse sind weitestgehend erfüllt.

Tabelle 3.4 Bruchzähigkeit in Abhängigkeit von Rissausbreitungssystem und Klimastufe

Klima	TL				RL				TR				RT			
	$\bar{\omega}$ [%]	ρ_{ω} [g/cm ³]	K_{IC} MPa $\sqrt{m}$	ω [%]	ρ_{ω} [g/cm ³]	K_{IC} MPa $\sqrt{m}$	ω [%]	ρ_{ω} [g/cm ³]	K_{IC} MPa $\sqrt{m}$	ω [%]	ρ_{ω} [g/cm ³]	K_{IC} MPa $\sqrt{m}$	ω [%]	ρ_{ω} [g/cm ³]	K_{IC} MPa $\sqrt{m}$	ω [%]
20/50 $\bar{\nu}$ [%]	9.9	0.6	0.559	9.3	0.56	0.78	9.6	0.57	0.623	10.2	0.67	0.971				
	4.6	6.1	10.5	4.9	7	6.5	1.2	0.7	13.9	1	1.1	17.6				
20/65 $\bar{\nu}$ [%]	13.7	0.58	0.493	12.2	0.57	0.767	13.8	0.59	0.545	14.4	0.67	0.851				
	1.2	4.8	7.3	10.9	6.7	9.7	0.6	0.4	9.7	0.5	1.6	12.2				
20/85 $\bar{\nu}$ [%]	17.3	0.63	0.369	14.9	0.56	0.686	17	0.62	0.494	18.2	0.68	0.653				
	1.4	7.6	10.3	0.7	1.4	4.8	1	0.3	14.1	0.7	1.4	14.5				
20/90 $\bar{\nu}$ [%]	19.2	0.59	0.399	18.4	0.58	0.653	18.7	0.62	0.477	20.1	0.67	0.63				
	1.7	6.5	6.2	4.6	6.8	10.7	0.6	1	8.4	0.7	2.3	9.1				

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.013e+00  1.044e-01   9.699 < 2e-16 ***
Feuchte      -2.418e-02  1.414e-03 -17.098 < 2e-16 ***
Dichte        7.521e-05  1.898e-04   0.396 0.692180
EbeneRT       8.728e-02  2.365e-02   3.690 0.000267 ***
EbeneTL      -2.389e-01  1.628e-02 -14.674 < 2e-16 ***
EbeneTR      -1.665e-01  1.587e-02 -10.490 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.08587 on 294 degrees of freedom
(3 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.7627,    Adjusted R-squared:  0.7587
F-statistic:  189 on 5 and 294 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Abb. 3.11 Abbildung 3.3 1: Ergebnis der Regressionsanalyse – Bruchzähigkeit, Feuchte, Rohdichte, Rissausbreitungssystem (Ebene); Wechselwirkungen bleiben unberücksichtigt (Software: „R“)

$$K_{IC} = -2.418 \cdot 10^{-2} \rho + 7.521 \cdot 10^{-5} \rho_{\omega} + 1.013 + e_i \quad (3.2)$$

e_i : Koeffizienten der Rissausbreitungssysteme gemäss Abb. 3.11, wobei $i=(RT, TL, \dots)$, $e_{RL}=0$

Die Messdaten lassen keinen signifikanten Einfluss der Rohdichte vermuten. Der Einfluss der Holzfeuchte und der Rissausbreitungssysteme sind hochsignifikant, wobei der Einfluss der Holzfeuchte als geringer eingeschätzt wird. Der Koeffizient der Holzfeuchte liegt deutlich unter dem Schätzwert der Rissausbreitungssysteme. Mit Feuchtezunahme nimmt die Bruchzähigkeit ab. Abbildung 3.12 zeigt diesen Zusammenhang für alle betrachteten Rissausbreitungssysteme.

Die Streuung von K_{IC} ist durch die in Abbildung 3.13 abgebildeten Plots nachzuvollziehen. Bei RT streut K_{IC} stark um den Mittelwert. Differenziert man K_{IC} -Werte im RT-Rissausbreitungssystem nach Rissverlauf ausschliesslich im Spätholz (RT-S) bzw. Frühholz (RT-F) wird die Ursache der Streuung deutlich (Abb.3.12, 3.14(a)). Ein Rissverlauf im Spätholz bedingt deutlich höhere K_{IC} -Werte als ein Rissverlauf im Frühholz bzw. entlang der Jahrringgrenze.

Die Abbildungen 3.14(a) und 3.14(b) zeigen typische Kraft-Rissaufweitungs-Kurven in Abhängigkeit von Rissausbreitungssystem bzw. der Holzfeuchte. Der Einfluss der Holzfeuchte auf die Steifigkeit

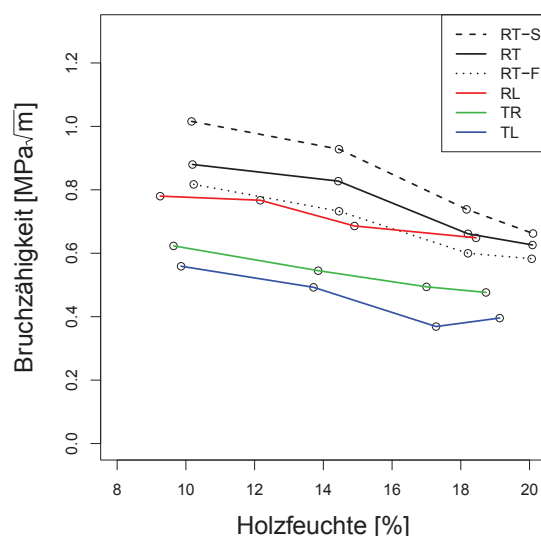


Abb. 3.12 Bruchzähigkeit in Abhängigkeit von Holzfeuchte und Rissausbreitungssystem

der Proben, besonders eine tendenziell stärkere Nicht-Linearität mit zunehmender Holzfeuchte sind zu erkennen.

Typische Rissverläufe sind in Abbildung 3.15 veranschaulicht. Die Lage der Rissfront im Holz bestimmt dabei entscheidend den Rissverlauf. Der Start der Rissfront im Spätholz bedingt nicht grundsätzlich, dass der Riss über die gesamte Strecke im Spätholz verläuft. Bei der RT-Probe in Abbildung 3.9(a) verläuft der Riss sowohl durch Spät- als auch Frühholz. Bei Rissausbreitung in Faserrichtung (TL und RL) ist der Riss selbst bei maximaler Dehnung des Probekörpers mit bloßem Auge schwer erkennbar. Die entsprechenden Abbildungen sind trotzdem zur Vollständigkeit dargestellt worden. Risse bei TR-Belastung breiten sich häufig stufenförmig aus, wobei der Rissverlauf zunächst innerhalb einer querliegenden Frühholzschicht verläuft bevor er sich weiter geradlinig ausbreitet.

Die Faktoren Feuchte und Rissausbreitungssystem werden anhand der vorliegenden Messdaten als signifikante Einflussgrößen eingestuft. Der Einfluss der Rohdichte scheint nicht signifikant zu sein.

Das an der Risspitze entstehende Spannungsfeld bewirkt ein Versagen der Zellstruktur an der Stelle des geringsten Widerstands. Bei Proben des RL-, TL- und TR-Rissausbreitungssystems verläuft die Rissfront sowohl durch Früh- als auch durch Spätholz. TR-Proben zeigen meist einen sogenannten „Treppenriss“ (stufenförmiger Rissverlauf). Die Position der Risspitze in Früh- bzw.

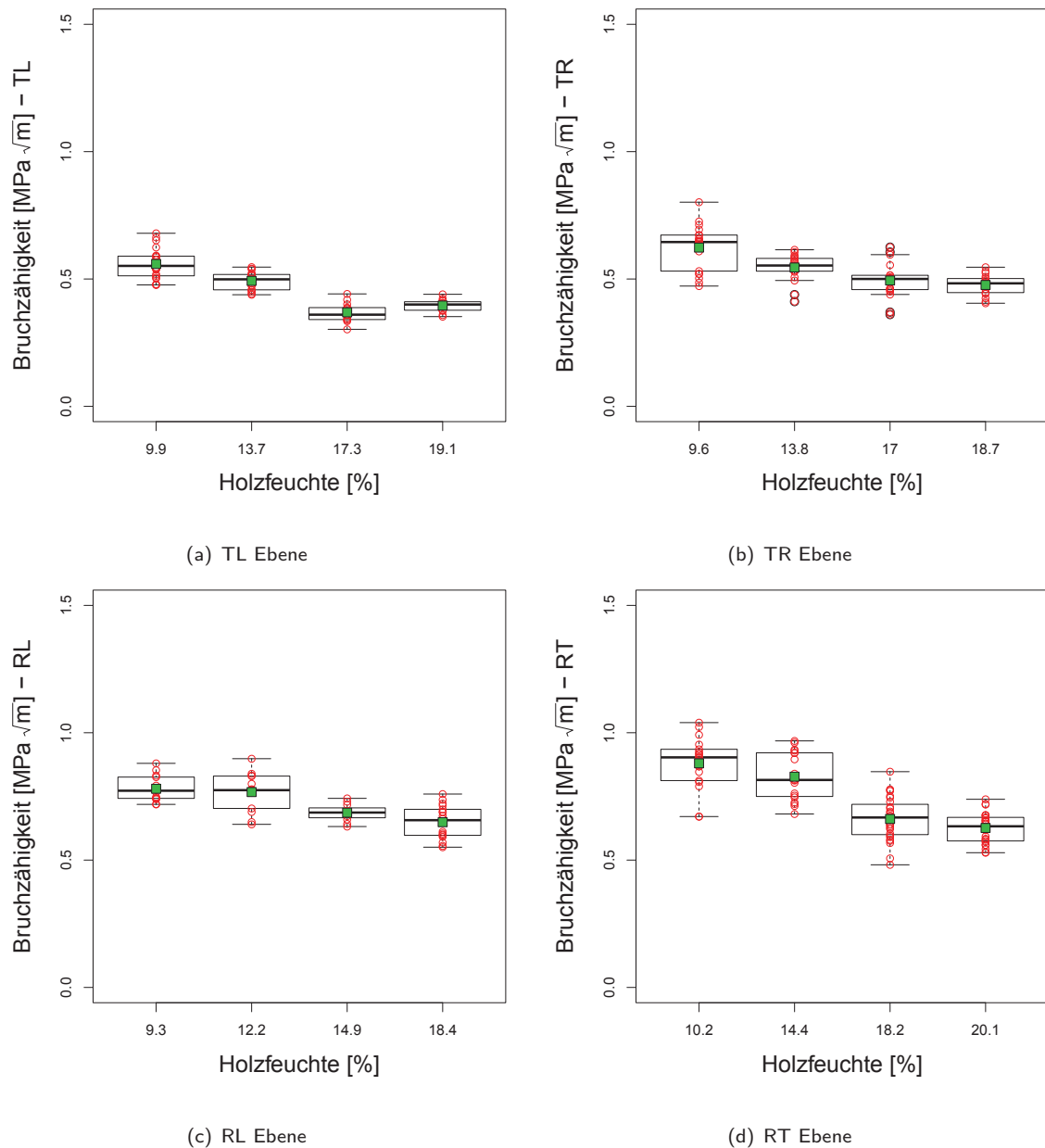
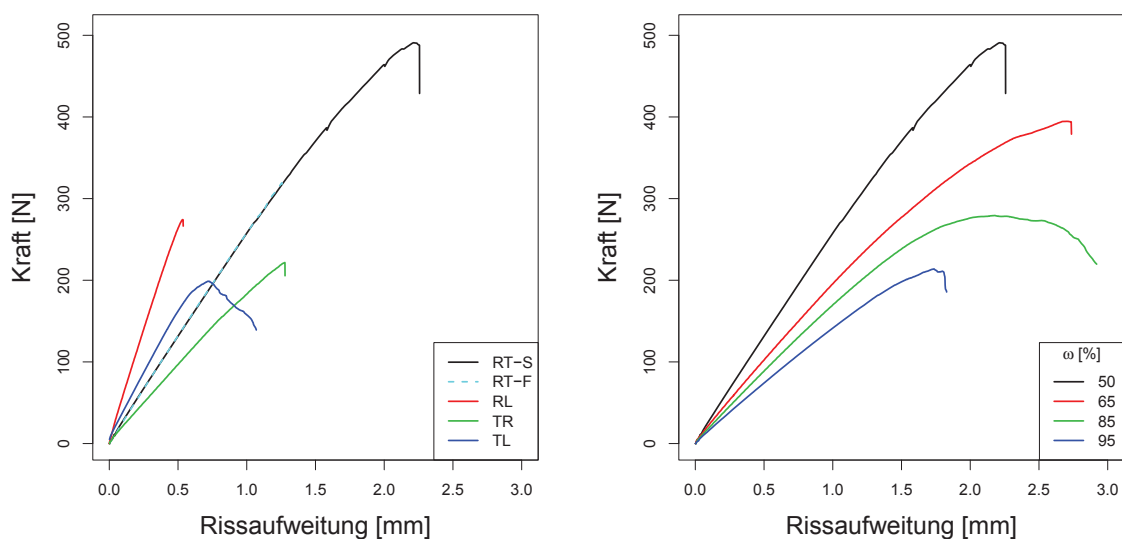


Abb. 3.13 Bruchzähigkeit in Abhängigkeit von Holzfeuchte und Rissausbreitungssystem

Spätholz hat bei diesen Rissausbreitungssystemen keinen signifikanten Einfluss auf den ermittelten K_{IC} -Wert.

Bei RT-Proben, bei denen der Rissansatz teilweise ausschliesslich im Spät- bzw. Frühholz liegt (RT-S-, RT-F-Proben), variiert K_{IC} stark in Abhängigkeit von der Position der Risspitze. Verläuft der Riss bei ausreichend breiten Jahrringen komplett im Spätholz, wird im Mittel eine

(a) Abhängigkeit vom Rissausbreitungssystem ($\omega \approx 10\%$)

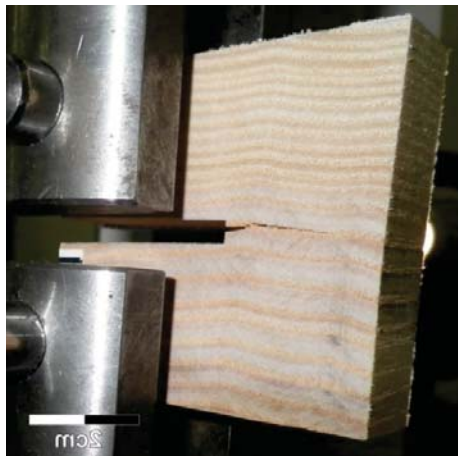
(b) Abhängigkeit von der Holzfeuchte (RT-Ebene, Spätholz)

Abb. 3.14 Repräsentative Kraft-Rissaufweitungs-Kurven in Abhängigkeit vom Rissausbreitungssystem bzw. Holzfeuchte

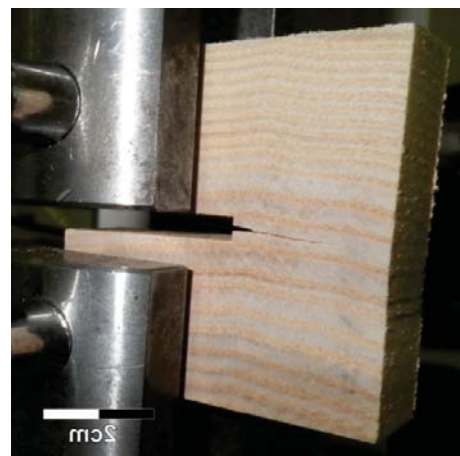
Bruchzähigkeit von $0.884 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ gemessen; bei Rissausbreitung im Frühholz $0.664 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Grundsätzlich hat Spätholz eine höhere Dichte als Frühholz. Der Zusammenhang steigender Bruchzähigkeit mit zunehmender Rohdichte ist demnach anhand der Differenzierung zwischen Früh- und Spätholz bei RT zu vermuten.

Die ermittelten Rohdichten bestätigen diese Vermutung nicht, was u.a. auf die in Abschnitt 4.1 erläuterte Feuchte-Rohdichte-Überlagerung zurückgeführt werden kann. Ausserdem variieren die Jahrringbreiten der untersuchten Proben mitunter innerhalb einer Probe sehr stark (Abb. 3.15). Der entscheidende Wert der Rohdichte im Bereich der Rissausbreitung kann so erheblich von der Rohdichte der gesamten Probe abweichen. Über den Zusammenhang steigender K_{IC} -Werte mit steigender Rohdichte berichten Reiterer et al. (2002) für die Systeme RL und TL bei Esche, Scheffler (2002) für RT und TR bei Buche.

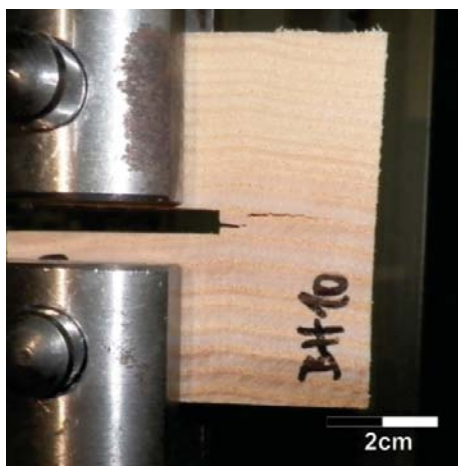
Grundsätzlich liegt die Bruchzähigkeit bei radialer Belastungsrichtung (RL und RT) deutlich höher als bei tangentialer Belastungsrichtung (TR und TL), was vor allem auf die Wirkung der Holzstrahlen zurückgeführt wird. In Reiterer et al. (2002) wird berichtet, dass Holzstrahlen bei Zugbelastung in der fortschreitenden Prozesszone Kräfte aufnehmen können. Durch die Ausrichtung der Holzstrahlen in der Belastungsrichtung haben diese bei RL- und RT-Beanspruchung



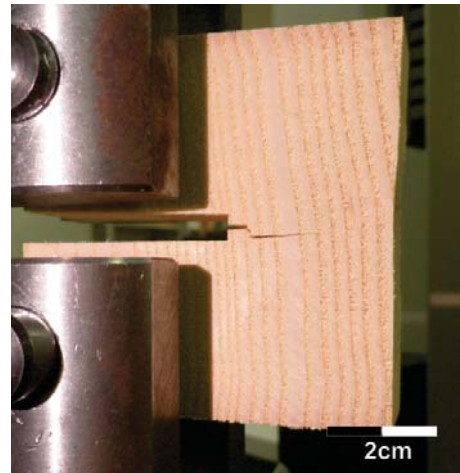
(a) CT Probe in der RT-Ebene (Frühholz)



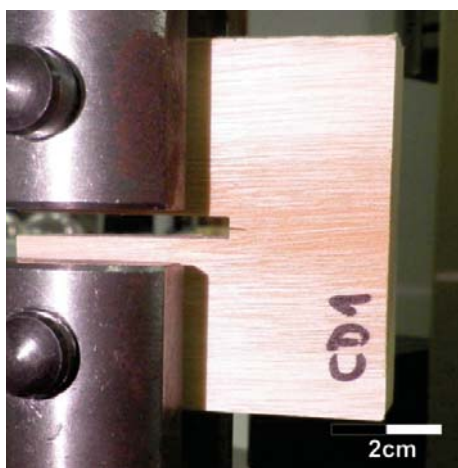
(b) CT Probe in der RT-Ebene (Frühholz)



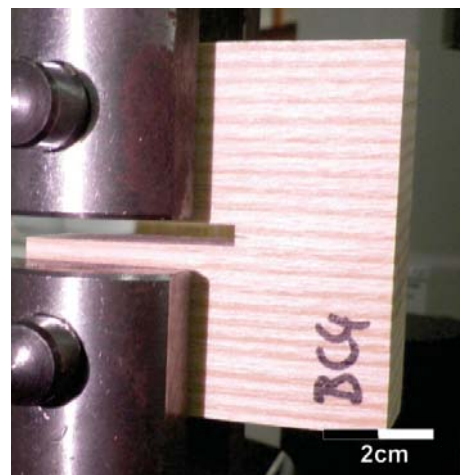
(c) CT Probe in der RT-Ebene



(d) CT Probe in der TR-Ebene



(e) CT Probe in der TL-Ebene



(f) CT Probe in der RL-Ebene

Abb. 3.15 CT-Proben - Typische Rissverläufe

folglich eine zähigkeitsverstärkende Wirkung. Bei Zugbeanspruchung in tangentialer Richtung (TL und TR) stellen die Bereiche zwischen Holzstrahl- und Leitgewebe aufgrund geringer Bindungskräfte den kleinsten Widerstand zur Rissausbreitung dar, sodass das Versagen an dieser Stelle eintritt (Smith, Landis und Gong, 2003). Mikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen von Esche-CT-Proben bei Majano-Majano, Hughes und Fernandez-Cabo (2012) et al. bestätigen diese Aussagen zum Einfluss der Holzstrahlen auf den Bruchverlauf bei Eschenholz.

Ozyhar, Hering und Niemz (2012) berichten für Buche über ein Verhältnis von ungefähr 2:1 zwischen K_{IC} bei RL bzw. RT im Verhältnis zu K_{IC} bei TR bzw. TL. Vergleicht man die Mittelwerte der vorliegenden Messung über alle Klimastufen zwischen RL und TL, liegt die Abweichung bei nur 37%. Ein geringerer Einfluss der Holzstrahlen bei Esche im Vergleich zur Buche ist auch hier zu vermuten.

Liegt eine grosse Kontaktfläche zwischen den Zellen in longitudinaler Richtung vor, sind die Zellen bei Rissausbreitung quer zu Faser nur über deutlich kleinere Flächen miteinander verbunden, sodass der Zellverband gegen einen geringen Widerstand zerstört werden kann. Es wäre demnach zu erwarten, dass die K_{IC} -Werte im RL-Rissausbreitungssystem höher sind als im RT-System. Die Ergebnisse von Ozyhar, Hering und Niemz (2012) und Tollert (2010) bestätigen diesen Zusammenhang. Bei der vorliegenden Messung allerdings liegen die K_{IC} -Werte für RT besonders bei den Proben der Klimastufen 20/50 und 20/65 deutlich über den RL-Werten. Wie Abb.3.16(b) zeigt, liegt die sich einstellende Ausgleichsfeuchte in den einzelnen Klimastufen bei RL-Proben unter den Feuchten der RT-Proben. Ebenfalls sind die mittleren Rohdichtewerte in den vier Klimastufen bei RT deutlich höher als bei RL (Abb. 3.16(a)). Die erwähnte Feuchte-Dichte-Korrelation wird deutlich. Es ist zu vermuten, dass die höheren K_{IC} -Werte bei RT auf eine höhere Normalrohddichte zurückzuführen sind.

Bei Proben geringer Bruchzähigkeit (TL, TR) breitete sich vereinzelt der eingebrachte Anriss aufgrund von Vorspaltung durch die schlagartige Beanspruchung mit dem Hammer schon vor Beginn der Prüfung aus. Durch deutliche Rissausweitung vor Erreichen der maximalen Kraft wurden entsprechende Proben detektiert und die Ergebnisse aus dem Datensatz entfernt. Messfehler in Form zu geringer K_{IC} -Werte sind bei TL und TR trotzdem nicht auszuschliessen. Da die Bruchzähigkeit in den Rissausbreitungssystemen RT und RL deutlich höher ist, ist die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung des Anrisses durch Vorspaltung hier geringer. Die Proben werden bis zum Erreichen der Bruchspannung unterschiedlich stark gedehnt, was vor allem auf den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit zurückzuführen ist. (RT, TR: 1 mm/min; RL, TL: 0.5 mm/min; Abb.

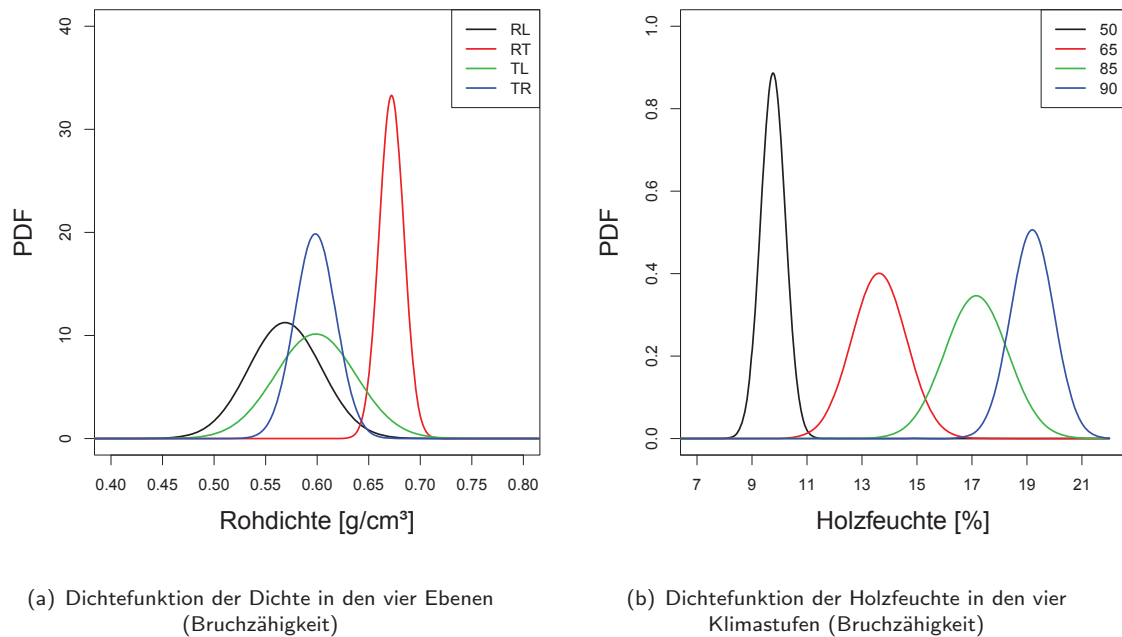


Abb. 3.16 Dichte und Feuchteverteilung bei der Prüfung der Bruchzähigkeit

3.14(b)). Ein Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die massgebende Kraft und damit auf K_{IC} , untersucht in einem Vorversuch, konnte nicht festgestellt werden.

Mit zunehmender Holzfeuchte verändert sich das Materialverhalten tendenziell vom abrupten, spröden zu einem duktilen Versagensfall (Abb. 3.14(b)). Mit zunehmend duktilem Versagen ist zu vermuten, dass leichte plastische Verformungen in der Prozesszone auftreten. Bei gleicher Prüfgeschwindigkeit kann der Anstieg der Kraft-Rissaufweitungs-Kurven als ein Mass für die Steifigkeit dienen. Die Bestimmung des E-Moduls ist aufgrund von Probengeometrie und Versuchsanordnung nicht möglich. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Feuchte die Steifigkeit abnimmt.

Der Trend sinkender Bruchzähigkeit mit steigender Holzfeuchte kann in allen vier Rissausbreitungssystemen, am deutlichsten bei RT und TL beobachtet werden (Abb. 3.13). Verglichen zu den mittleren K_{IC} -Werten bei einer Holzfeuchte von 9-10 % (Klimastufe 20/50) verringern sich die Mittelwerte bei 18-20 % Holzfeuchte (Klimastufe 20/90) um 35 % bei RT, um 29 % bei TL, 23 % bei TR und 16 % bei RL. Nimmt K_{IC} im Bereich von 9-14 % Holzfeuchte nur geringfügig zu ist eine deutliche Verringerung zwischen 14-17 % Holzfeuchte zu erkennen. In diesem Holzfeuchtebereich werden die Wassermoleküle zwischen die Fibrillen der Zellulose eingelagert und

unterbrechen so die unmittelbaren Bindungen in der Mikrostruktur der Zellulose. Das besonders der Zugfestigkeit dienende Grundgerüst der Zellulose ist geschwächt, die Bruchzähigkeit sinkt.

Feuchteabhängige K_{IC} -Werte für Esche aus der Literatur sind dem Autor nur für die Rissausbreitungssysteme RL und TL bekannt (Abb. 3.17). Vergleicht man K_{IC} bei ca. 10 % Holzfeuchte mit den Werten für Esche von Majano-Majano, Hughes und Fernandez-Cabo (2012). bei 11.6 % Holzfeuchte, liegen die Werte dieser Arbeit 10-15 % unter den Werten aus der Literatur. Dabei wurde die Bruchzähigkeit bei Majano-Majano, Hughes und Fernandez-Cabo (2012) an Mikro-CT-Proben durchgeführt. Reiterer et al. (2002) haben die Bruchzähigkeit von Esche bei ca. 12 % Holzfeuchte mit dem „wedge-splitting-test“ nach Stanzl-Tschegg, Tan und Tschegg (1995) bestimmt. Die Abweichung von K_{IC} bei RL-Beanspruchung gegenüber dem in dieser Arbeit gemessenen K_{IC} -Wert bei 12.2 % liegt bei 34%. Die grosse Streuung der Werte deutet darauf hin, dass K_{IC} nicht grundsätzlich unabhängig von Prüfverfahren und Probengeometrie ist. Smith, Landis und Gong (2003) vergleichen mit verschiedenen Methoden bestimmte K_{IC} -Werte von Tanne und schlussfolgern analog.

Die Bestimmung der Bruchzähigkeit anhand des Spannungsintensitätsfaktors mittels einer massgebenden Kraft wird in der Literatur häufig in Frage gestellt. Effekte wie das Fibre Bridging führen zur Vergrösserung der Prozesszone und zum Ansteigen der Bruchzähigkeit noch nach Beginn der Rissausweitung. Eine Beurteilung der Bruchzähigkeit anhand von K_{IC} -Werten vernachlässigt die Bruchenergie, die zusätzlich während der Rissausbreitung freigesetzt wird. Aus diesem Grund werden zunehmend Methoden der EPBM auf Basis von Bruchenergiemessungen angewandt, die unabhängig von der Prozesszonengrösse sind. Es werden Risslänge und Risswiderstand von Beginn der Rissausweitung bis zum vollständigen Materialversagen ermittelt (Matsumoto und Nairn, 2012).

Nach Reiterer et al. (2002) hat der Effekt des Fibre-Bridging bei Laubhölzern wie der Esche aufgrund der deutlich kürzeren Faserlängen im Vergleich zu Nadelholz weniger Bedeutung. Es ist allerdings möglich, dass eine der Grundvoraussetzungen zur Anwendbarkeit der LEBM - eine im Verhältnis zur Probengrösse kleine Prozesszone - bei Proben mit höheren Holzfeuchten nicht mehr erfüllt ist. Wie die Rissausweitungs-Kurven in Abbildung 3.14 zeigen, verhält sich das Material mit steigender Holzfeuchte zunehmend nicht mehr linear-elastisch. Es ist zu vermuten, dass hier plastische Verformungen ausserhalb einer kleinen Prozesszone im Bereich der Rissfront auftreten, was mit Hilfe eines VIC-Systems ("Video-Image-Correlation") in weiterführenden Test zu untersuchen wäre.

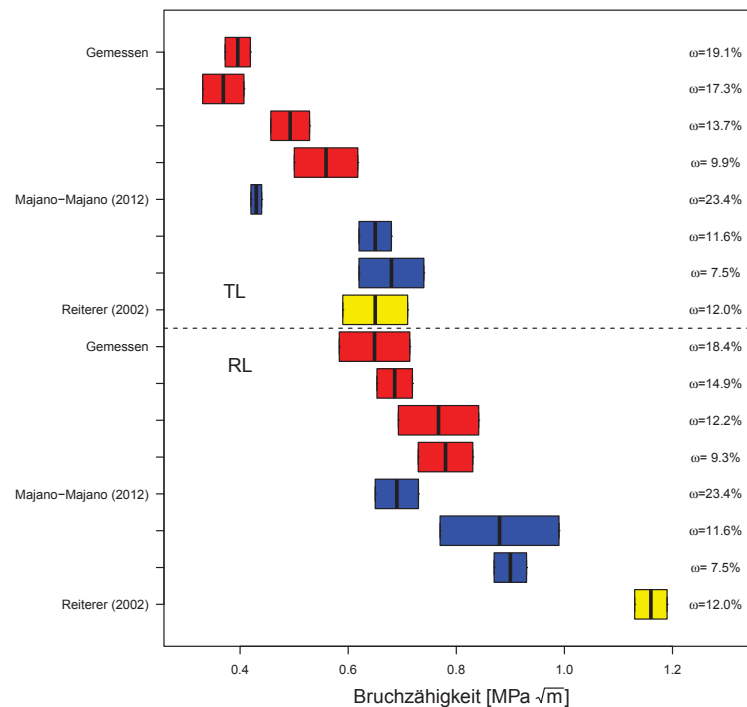


Abb. 3.17 Vergleich der gemessenen K_{IC} -Werte (RL, TL) mit Literaturwerten (vgl. Majano-Majano, Hughes und Fernandez-Cabo (2012), S. 14, $\rho = 0.62 \dots 0.70 \text{ g/cm}^3$; (Reiterer, Sinn und Stanzl-Tschegg, 2002), S. 32, $\rho = 0.7 \pm 0.055 \text{ g/cm}^3$), dargestellt ist jeweils der Mittelwert $\pm$ Variationskoeffizient

3.2 Elastische Kenngrößen

Die E-Moduln des untersuchten Materials wurden in den drei anatomischen Hauptrichtungen mit unterschiedlichen Methoden und Beanspruchungsrichtungen geprüft. Einerseits wurden statische Prüfungen unter Zug-, Druck-, und Biegebeanspruchung durchgeführt. Andererseits wurden dynamische Prüfungen an stabförmigen Prüfkörpern in Längsrichtung und an würfelförmigen Prüfkörpern in den drei Hauptrichtungen durchgeführt. Alle Prüfungen wurden bei vier unterschiedlichen rel. Luftfeuchten im ausgeglichenen Zustand der Proben durchgeführt. Des Weiteren wurden in statischen sowie dynamischen Versuchen Querkontraktionszahlen in den verschiedenen Ebenen feuchteabhängig ermittelt.

3.2.1 E-Modul (statische und dynamische Prüfungen)

In Tab. 3.5 sind die longitudinalen E-Moduln ermittelt aus Eigenfrequenzmessung, BP 5 Durchschallung und Biegeversuch dargestellt. Es zeigt sich, dass die BP5 Durchschallung die höchsten und die Eigenfrequenzmessung die tiefsten Werte liefert. Abb. 3.18 ist zu deutlich sehen, dass sich mit zunehmender Feuchte eine Abnahme des E-Moduln einstellt. Die Proben hatten entsprechend der Klimatisierung eine Holzfeuchtigkeit von 8.2 % bis 18.8%. Die Werte für die verschiedenen Holzfeuchtigkeiten sind in Tab. 3.5 aufgelistet. Entgegen des generellen Trends nimmt der E-Modul von 13.44 % auf 17.5 % Holzfeuchtigkeit im Falle der Schallmessung leicht zu.

Tabelle 3.5 Übersicht der E-Moduln aus verschiedenen Messungen

Klima	n		ω	ρ	ρ_{darr}	E_{Ef}	E_{BP5}	E_{Bieg}	σ_{Bieg}
			[%]	[g/cm ³]		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
20/50	20	$\bar{x}$	8.15	0.58	0.56	11'747	14'521.9	12'623	116.3
		v [%]	1.6	4.4	4.5	11.3	11.9	11.7	8.4
20/65	20	$\bar{x}$	13.44	0.60	0.58	11'527	13'944.6	12'371	94.6
		v [%]	5.0	3.9	4.0	9.3	9.5	10.3	4.6
20/85	20	$\bar{x}$	17.46	0.60	0.57	11'437	14'005.8	12'011	80.5
		v [%]	2.6	4.4	4.5	11.3	9.3	12.3	15.1
20/90	20	$\bar{x}$	18.76	0.61	0.57	11'104	13'775.5	11'622	78.4
		v [%]	4.6	4.6	4.9	12.7	12.1	13.6	9.2

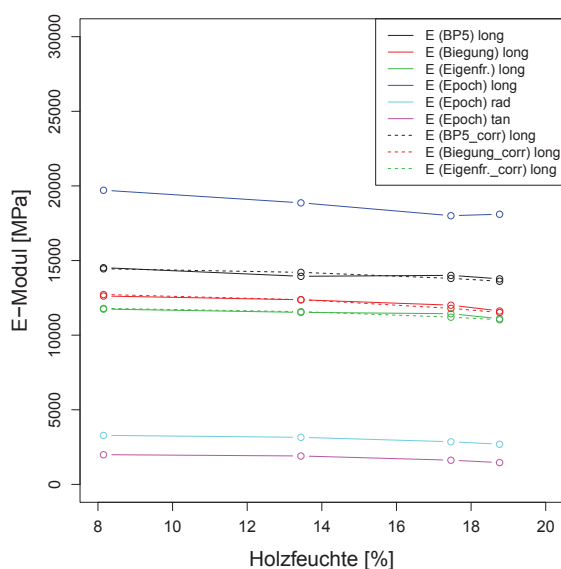


Abb. 3.18 Vergleich der E-Moduln in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit

Tabelle 3.6 Koeffizienten der Regressionsgleichung

	Achsenabschnitt	Holzfeuchte	Darrdichte
Biegung	-9379.8	-150.6	40867.5
Eigenfrequenz	-11053.24	-95.39	41408.13
Durchschallung (BP5)	-11519.6	-103.9	46997.1

Werden die Messmethoden einzeln und daraus jeder Messwert betrachtet, ergibt sich eine Streuung der E-Moduln von 9 bis 14 % innerhalb einer Klimastufe. Dargestellt ist dies für die entsprechenden Messmethoden in Abb. 3.19(a) (Biegeversuch), Abb. 3.19(b) (BP5 Durchschallung) und Abb. 3.19(c) (Eigenfrequenzmessung). Diese Variation in der Steifigkeit kann teilweise anhand der Variation der Rohdichte des Holzes erklärt werden, welche neben der Holzfeuchte ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Steifigkeit hat.

Für eine lineare multiple Regression der Zielgrößen werden bei Verwendung eines additiven Modells mit den Einflussgrößen Holzfeuchte und Darrdichte, Bestimmtheitsmasse von $R^2 = 0.63$ für den E-Modul aus der Durchschallung und $R^2 = 0.70$ für den E-Modul aus der Eigenfrequenz errechnet. Nutzt man das Regressionsmodell um den Einfluss der Dichte zu eliminieren, ergeben sich bei allen Verfahren leicht erhöhte Werte des E-Moduls unter der Annahme einer einheitlichen Darrdichte von 0.58 g/cm^3 .

$$E_{corr} = x_0 + \omega * x_1 + \rho_{darr} * x_2 \quad (3.3)$$

ω : Holzfeuchte [%]

ρ_{darr} : Darrdichte [g/cm^3]=0.58

Bei der Betrachtung der E-Moduln in Tab. 3.7 ist zu erkennen, dass die Werte (bis auf E_L mit 20°/85 % r.L.) bei zunehmender Luftfeuchtigkeit abnehmen. Ob der Mittelwert für E_L mit 20°/85 % r.L. durch Ausreisser zustande gekommen ist, wurde mit einem Ausreissertest geprüft. Für die Probe mit dem höchsten als auch für die Probe mit dem tiefsten Wert wurde der Dixon-Ausreissertest durchgeführt. Weder die Probe 9 (höchster Wert) noch die Probe 8 (tiefster Wert) erfüllten dabei die Kriterien für einen Ausreisser. Deshalb bleiben alle 10 Proben im Probenumfang enthalten.

Bei einem Vergleich der eigenen Werte mit Literaturwerten (Tab. 3.8) ergeben sich gewisse Unterschiede, die jedoch bei genauer Betrachtung erklärt werden können. Die Werte von Keun-

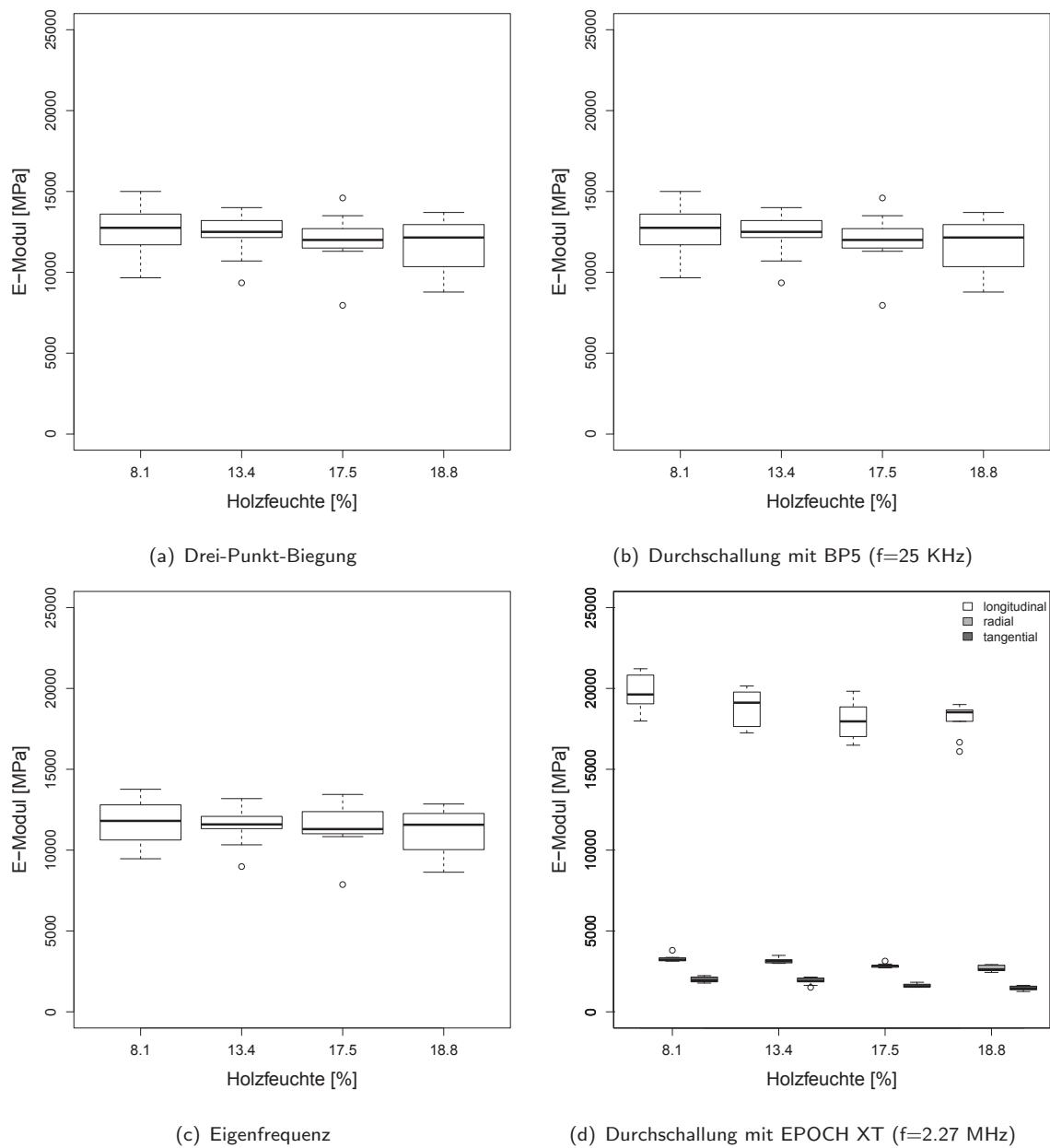


Abb. 3.19 E-Moduln mit verschiedenen Methoden ermittelt in Abhängigkeit der Holzfeuchte

ecke et al. (2008) entsprechen den eigenen, da diese auch aus Ultraschallmessungen stammen. Bei den Werten von (Bucur, 1995), auch aus Schallmessungen, ist der Unterschied auf eine andere Messmethode zurückzuführen. Die restlichen Vergleichswerte wurden statisch ermittelt, was tiefere Werte für die E-Moduln ergibt.

Tabelle 3.7 Übersicht der E-Moduln aus der Epoch-Messung

Klima	n		ω [%]	ρ [g/cm ³]	ρ_{darr} [g/cm ³]	E_L [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]	E_T [N/mm ²]
20/50	20	$\bar{x}$	7.9	0.59	0.57	19713	3286	1990
		ν [%]	5.0	1.91	1.81	5.1	5.8	8.5
20/65	20	$\bar{x}$	10.1	0.60	0.56	18868	3155	1904
		ν [%]	1.0	1.94	2.27	5.6	4.5	10.2
20/85	20	$\bar{x}$	14.1	0.61	0.56	18006	2858	1623
		ν [%]	1.0	2.04	1.74	6.1	4	6.4
20/90	20	$\bar{x}$	15.9	0.61	0.55	18104	2691	1463
		ν [%]	1.0	2.04	2.50	5.1	6.4	8.4

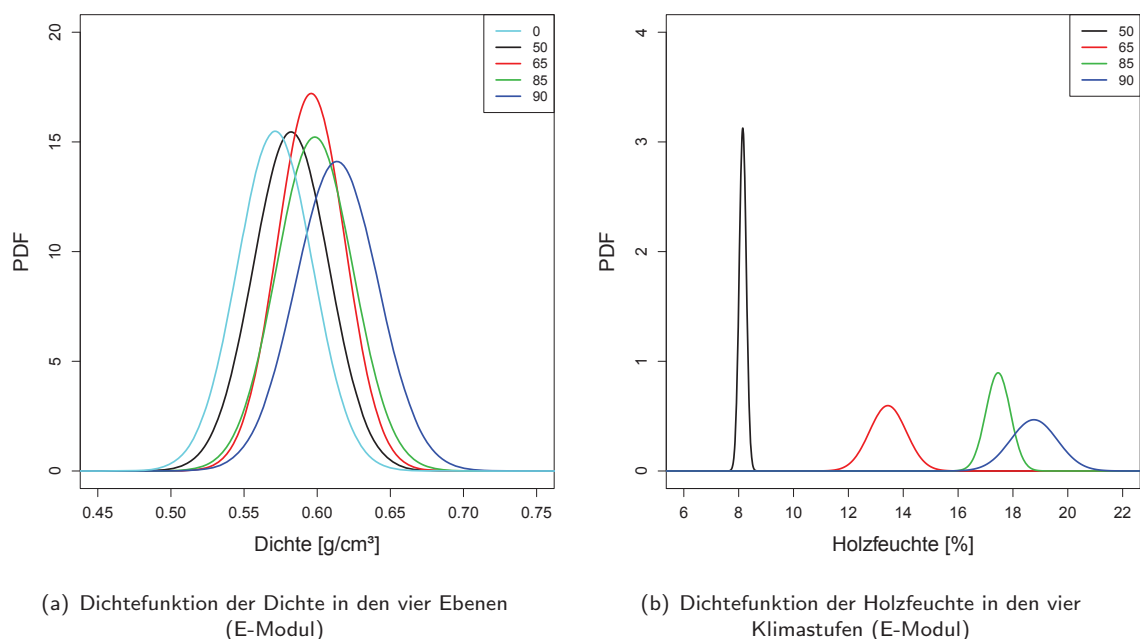
Tabelle 3.8 Vergleich der E-Modul mit Literaturwerten

Quelle	ρ [g/cm ³]	E_L [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]	E_T [N/mm ²]	Methode
Eigene Messungen	0.6	18868	3155	1904	Dynamisch
Keunecke et al. (2008)	0.65	18400	3710	1830	Dynamisch
DIN 68364 (2003)	0.7	13000			Statisch
Bucur (1995)	0.67	15800	1510	800	Statisch
Eigene Messungen		10545	1814	851	Statisch
Wood Handbook (2010)		12000	1500	960	Statisch
Sell (1997)	0.72	12900			Statisch

Die Dichte der Würfel variiert dabei von 0.593 g/cm^3 bis 0.613 g/cm^3 . Wie erwartet nimmt die Dichte bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit zu, dies ist in Abb. 3.20(a) zu sehen. Die Messung der Darrdichte ergab einen Mittelwert von 0.56 g/cm^3 .

3.2.2 Zug- und Druckmodul

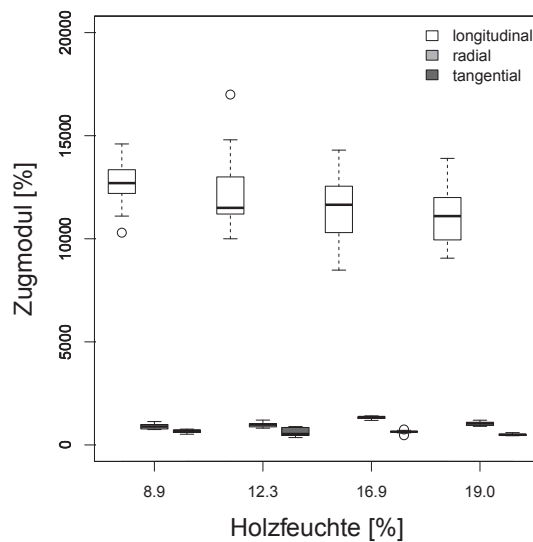
Die Zug- und Druckprüfung des Eschenholzes (Tabelle 3.9 und 3.10) spiegelt ebenso den erwarteten Zusammenhang mit der Holzfeuchte wider. Bei der Beanspruchung auf Druck ist eine stärkere Abhängigkeit von der Holzfeuchte erkennbar als bei einer Beanspruchung auf Zug (Abb. 3.21). Diese Tendenz ist in allen anatomischen Richtungen erkennbar. Die Steifigkeiten unterscheiden sich zwischen den Beanspruchungsrichtungen nur sehr geringfügig, wobei auf Druck beanspruchte Proben einen tendenziell höheren Modul aufweisen (Abb. 3.22).

**Abb. 3.20** Dichte und Feuchteverteilung bei der Prüfung des E-Moduls**Tabelle 3.9** Ergebnisse der Zugprüfung

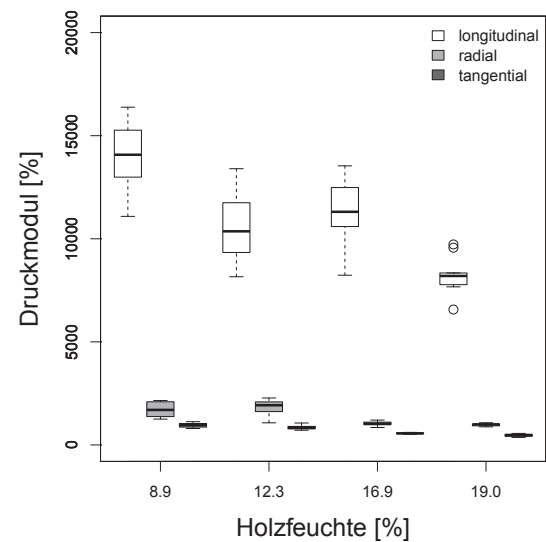
Klima	n	ω	ρ	E_{Zug}	σ_{Zug}	v_{LR}	v_{TR}	v_{LT}	v_{RT}
		[%]	[g/cm ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	—	—	—	—
20/50	10	$\bar{x}$	9.82	12700	134.0				
		v [%]	3.1	8.0	10.9				
20/65	10	$\bar{x}$	12.17	12242	130.3				
		v [%]	3.7	13.8	12.6				
20/85	10	$\bar{x}$	15.51	11408	128.5				
		v [%]	1.9	13.8	15.9				
20/90	10	$\bar{x}$	17.17	11016	125.1				
		v [%]	1.3	12.3	15.8				
20/50	10	$\bar{x}$	8.06	0.61	900	14.8	0.12	0.67	
		v [%]	1.3	2.6	15.3	5.0	12.9	7.4	
20/65	10	$\bar{x}$	11.13	0.62	982	12.5	0.1	0.63	
		v [%]	1.5	0.5	13.9	8.0	8.4	5.0	
20/85	10	$\bar{x}$	15.48	0.62	1324	12.3	0.1	0.66	
		v [%]	0.6	0.6	6.0	5.7	13.3	5.1	
20/90	10	$\bar{x}$	18.97	0.62	1032	11.2	0.08	0.68	
		v [%]	1.0	0.3	9.1	6.8	19.8	4.2	
20/50	10	$\bar{x}$	8.38	0.58	667	9.2		0.07	0.35
		v [%]	1.0	1.2	12.7	3.6		8.8	2.7
20/65	10	$\bar{x}$	13.82	0.59	622	10.1		0.05	0.33
		v [%]	0.7	0.8	34.9	57.7		16.2	4.9
20/85	10	$\bar{x}$	17.92	0.59	635	7.6		0.05	0.36
		v [%]	1.4	1.5	11.6	2.9		12.5	7.2
20/90	10	$\bar{x}$	20.3	0.62	505	6.6		0.05	0.36
		v [%]	1.1	3.8	9.8	3.9		8.1	4.2

Tabelle 3.10 Ergebnisse der Druckprüfung

Klima	n		ω	ρ	E_{Druck}	σ_{Druck}	ν_{RL}	ν_{TL}	ν_{LR}	ν_{TR}	ν_{LT}	ν_{RT}
			[%]	$[g/cm^3]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	—	—	—	—	—	—
20/50	10	$\bar{x}$	8.41	0.62	14069	54.9	0.3	0.46				
		ν [%]	1.0	3.4	12.6	10.7	29.7	17.1				
20/65	10	$\bar{x}$	11.43	0.59	10576	43.41	0.4	0.46				
		ν [%]	1.0	1.1	15.9	3.1	19.4	19.4				
20/85	10	$\bar{x}$	17.81	0.67	11326	36.96	0.43	0.52				
		ν [%]	1.3	2.6	13.9	4.1	33.1	24.6				
20/90	10	$\bar{x}$	18.48	0.63	8245	31.57	0.46	0.48				
		ν [%]	0.7	2.1	11.6	5.2	10.9	18.4				
20/50	10	$\bar{x}$	8.06	0.56	1695	12.36			0.05	0.66		
		ν [%]	1.3	1.4	20.7	3.5			128.6	8.7		
20/65	10	$\bar{x}$	11.13	0.53	1814	10.5			0.09	0.7		
		ν [%]	1.5	0.5	20.5	4.4			18.5	4.9		
20/85	10	$\bar{x}$	15.48	0.55	1042	8.33			0.08	0.73		
		ν [%]	0.6	0.6	10.6	1.0			32.4	3.2		
20/90	10	$\bar{x}$	18.97	0.64	976	7.7			0.1	0.74		
		ν [%]	1.0	1.5	6.6	5.0			26.2	4.1		
20/50	10	$\bar{x}$	8.38	0.61	965	13.8					0.03	0.35
		ν [%]	1.0	0.7	12.0	1.3					48.1	4.5
20/65	10	$\bar{x}$	13.82	0.64	851	10.03					0.04	0.38
		ν [%]	0.7	2.1	12.6	3.6					42.1	10.0
20/85	10	$\bar{x}$	17.91	0.6	565	7.99					0.04	0.37
		ν [%]	1.4	2.8	5.4	1.6					23.4	3.3
20/90	10	$\bar{x}$	20.3	0.65	467	7					0.04	0.37
		ν [%]	1.1	2.2	12.5	2.3					36.8	3.1



(a) Zugbeanspruchung



(b) Druckbeanspruchung

Abb. 3.21 E-Modul in Abhängigkeit der Belastungsrichtung, der Orientierung und der Holzfeuchte

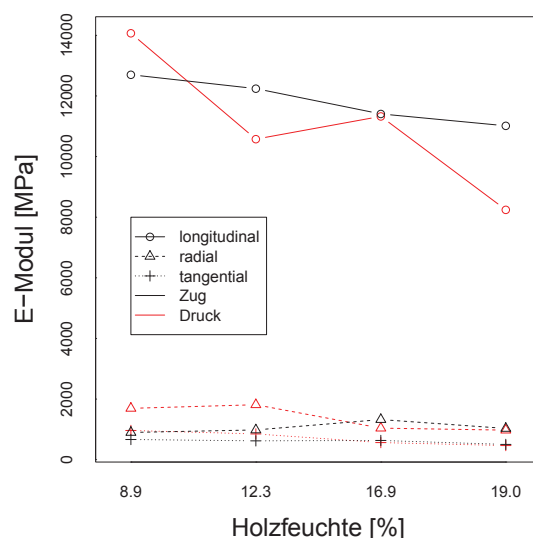


Abb. 3.22 Vergleich der Zug- und Druckmoduln in Abhängigkeit der Holzfeuchte

3.2.3 Querkontraktionszahlen

Die Poissonzahl ist das Verhältnis zwischen Quer- zu Längsdehnung. Neben der Untersuchung des vermuteten Einflusses der Feuchte auf die Querdehnzahl, wird auch auf einen möglichen Einfluss der Dichte der Proben Rücksicht genommen. In Abbildung 3.23(a) und 3.23(b) sind die Resultate graphisch dargestellt, sowie in den Tabellen 3.9 und 3.10 als Zahlenwerte hinterlegt. Dabei fallen die hohen Standardabweichungen bei den Querdehnzahlen mit Druckbelastung auf. Bei den Zugversuchen sind die Abweichungen deutlich geringer als im Druckversuch. Der Grössenunterschied bei den Querdehnzahlen bewegt sich um einen Faktor 10. Dabei lässt sich erkennen das: $\mu_{TR} > \mu_{TL} > \mu_{RL} > \mu_{RT} > \mu_{LR} > \mu_{LT}$.

Im Zugversuch zeigt sich unter den betrachteten Ebenen lediglich in der RT-Ebene ein signifikanter Zusammenhang der Querdehnungszahlen mit der Holzfeuchte. Im Druckversuch dagegen zeigt sich in der RL-Ebene ein signifikanter Zusammenhang mit der Holzfeuchte. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten der Zug- und Druckprüfung konnte nicht ermittelt werden (Abb.3.24). Da die Messungen aufgrund der geringen Querdehnungen, insbesondere bei Belastung in der longitudinalen Orientierung grossen Streuungen unterliegen, kann der ermittelte Zusammenhang, der lediglich ein Bestimmtheitsmass von 0.2 aufweist, als nicht wesentlich bezeichnet werden. Ähnliche Ergebnisse wurden von Ozyhar, Hering und Niemz (2012) für Buchenholz ermittelt. Es ist mit grosser Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die Poissonzahlen keine

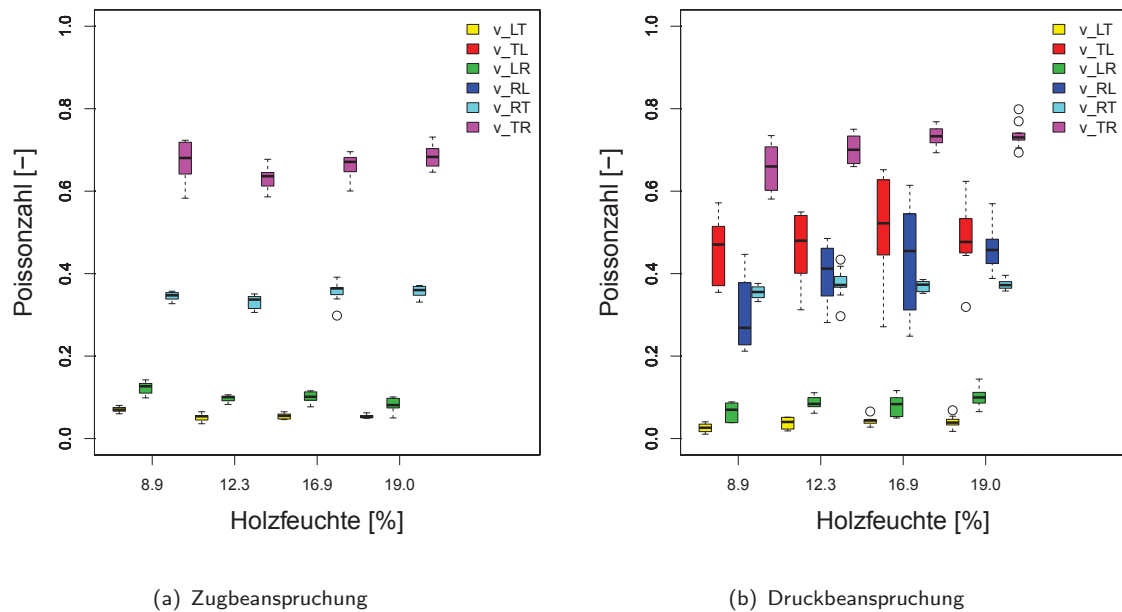


Abb. 3.23 Querkontraktionszahlen in Abhängigkeit der Belastungsrichtung, der Orientierung und der Holzfeuchte

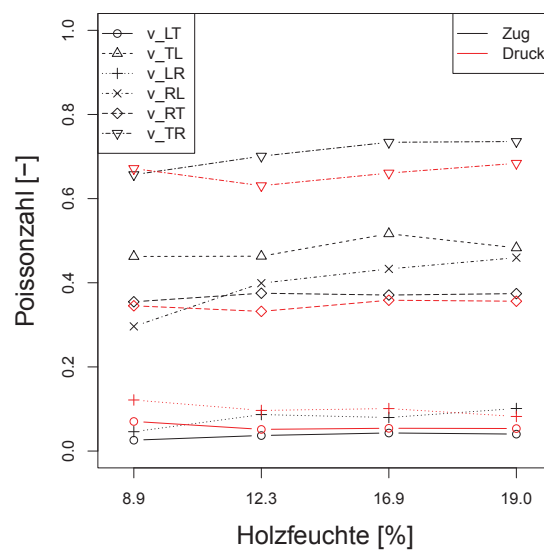


Abb. 3.24 Vergleich der Querkontraktion in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit

Abhängigkeit von der Holzfeuchte aufweisen, da Längs- und Querdehnung gleichermassen durch die Holzfeuchte beeinflusst werden.

3.2.4 Schubmodul

Die dynamisch ermittelten Schubmoduln zeigen wie auch die E-Moduln einen signifikanten Zusammenhang mit der Holzfeuchte. Die gemittelten Werte aus ein und der selben Ebene ergeben erwartungsgemäss für die LR-Ebene die höchsten Werte, gefolgt von der LT-Ebene (Tab. 3.11). In der Querschnittebene (RT) liegen die ermittelten Werte am tiefsten. Die jeweiligen zusammengefassten Einzelmessungen ergaben abgesehen von der LR-Ebene eine gute Übereinstimmung, was anhand des Variationskoeffizienten bzw. aus Abb. 3.25 deutlich wird.

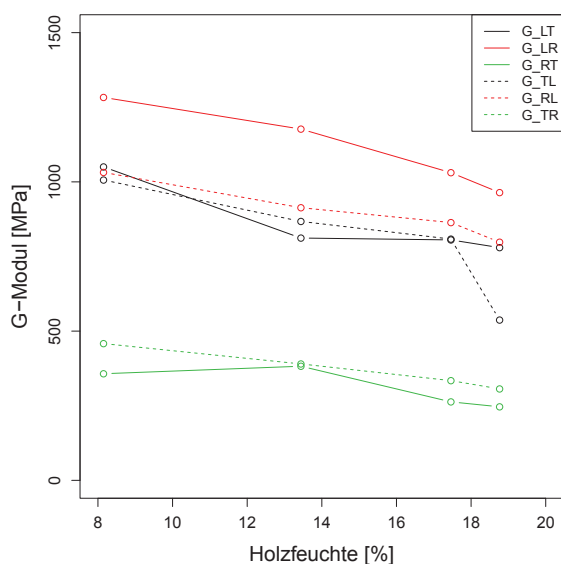


Abb. 3.25 Vergleich der dynamisch ermittelten G-Moduln in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit

Tabelle 3.11 Schubmoduln mittels dynamischer Prüfung

Klima	n		ω [%]	ρ [g/cm ³]	ρ_{darr} [g/cm ³]	G_{LR} [N/mm ²]	E_{LT} [N/mm ²]	E_{RT} [N/mm ²]
20/50	20	$\bar{x}$	5.83	0.59	0.57	1283	1050	357
		ν [%]	9.1	2.0	1.9	2.8	16.9	8.5
20/65	20	$\bar{x}$	8.59	0.6	0.56	1177	812	382
		ν [%]	3.80	2	2.4	6.5	6.9	17.9
20/85	20	$\bar{x}$	11.88	0.61	0.56	1031	806	263
		ν [%]	3.30	2.1	1.8	10.4	3.9	6.5
20/90	20	$\bar{x}$	15.08	0.61	0.55	964	780	246
		ν [%]	5.30	2.1	2.6	5.5	6.6	9.9

Tabelle 3.12 Vergleich der G-Moduln mit Literaturwerten

Quelle	ρ [g/cm ³]	G_{LR} [N/mm ²]	G_{LT} [N/mm ²]	G_{RT} [N/mm ²]
Eigene Werte	0.599	1045	840	386
Keunecke et al. (2008)	0.648	1410	1030	511
DIN 68364 (2003)	0.69	880	620	
Bucur (1995)	0.67	1340	890	270

In Abb. 3.26 sind die Messwerte der Einzelmessungen nochmals graphisch anhand eines Boxplots veranschaulicht. Es ist ersichtlich, dass die Streuungen in allen Ebenen und Messvarianten sehr ähnlich ausfallen. Gewisse Unsicherheiten in den Messwerten lassen sich lediglich in der LT-Ebene bei 8.1 % Holzfeuchte ausmachen. Der Mittelwert bei 18.8 % Holzfeuchte in der TL-Ebene liegt vergleichsweise tief.

Bei einem Vergleich mit Literaturwerten in Tab. 3.12 sind wiederum die Unterschiede zwischen den statisch ermittelten Werten (DIN 68364, 2003) und den Werten aus Ultraschallmessungen ersichtlich. Aufgrund einer höheren Dichte sind die Werte von Keunecke et al. (2008) deutlich grösser.

3.3 Rohdichte

Aufgrund der Korrelation zwischen Feuchte und Rohdichte ist der Einfluss der Normalrohddichte mit den vorliegenden Daten nicht eindeutig quantifizierbar. Da die Rohdichte jedoch grundsätzlich eine signifikante Einflussgrösse auf die Zielgrössen darstellt, wird anhand der ermittelten Rohdichte eine Aussage über den tendenziellen Einfluss der Normalrohddichte getroffen.

Die Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktionen der Rohdichte in den einzelnen Klimastufen zeigen eine Rohdichtezunahme mit steigender Holzfeuchte. Im Verhältnis zu den übrigen Klimastufen fallen die Werte der Klimastufe 20/85 bei der Bruchschlagarbeit, der Klimastufe 20/90 im Falle von Druckscherfestigkeit und Bruchzähigkeit relativ niedrig aus. Die Ursache hierfür ist in der Verteilung der zugeschnittenen Proben auf die einzelnen Stichproben zu sehen. Dadurch kann es zu einer Überlagerung der Einflussgrössen bzw. zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse kommen, da die Zunahme der Holzfeuchte oberhalb von 6-8 % und unterhalb des FSB eine Abnahme z.B. der Festigkeit bewirkt aber die Festigkeit mit zunehmender Normalrohddichte, bzw. Darrdichte ansteigt. Sind die Proben so auf die Stichproben verteilt, dass die mittlere Normalrohddichte in

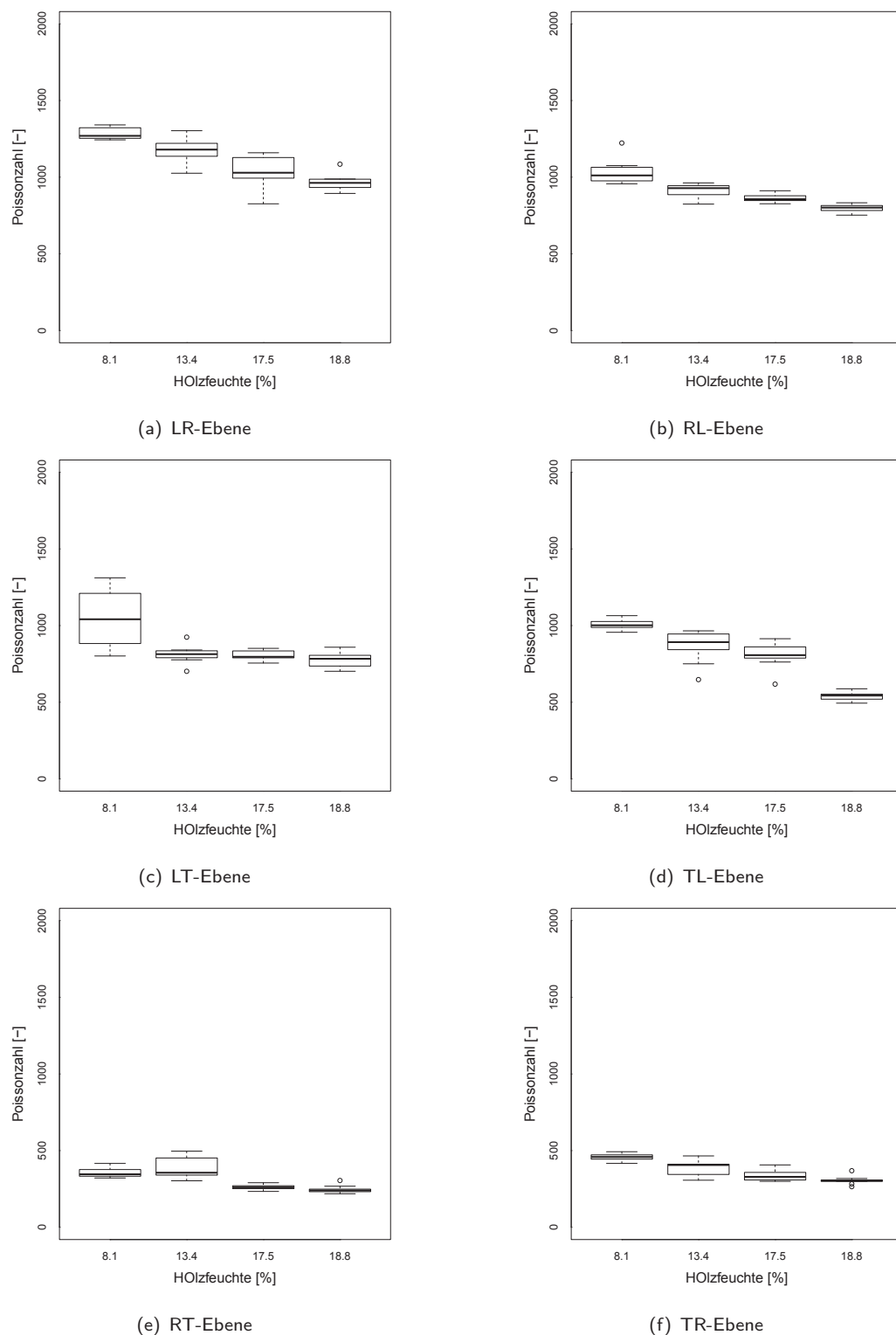


Abb. 3.26 Schubmoduln in verschiedenen Ebenen ermittelt mit dem Messsystem EPOCH XT in Abhängigkeit der Holzfeuchte

einigen Klimastufen verhältnismässig niedrig ist, wird die festigkeitsmindernde Wirkung der Holzfeuchte zusätzlich durch den Einfluss der verhältnismässig niedrigen Rohdichte überlagert. Durch eine zufällige Verteilung der Proben auf die verschiedenen Klimastufen konnten die genannten Effekte weitestgehend aber nicht vollständig vermieden werden.

4 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit sind Daten zum elastischen Verhalten und zum Versagensverhalten von Eschenholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte in den drei Belastungsrichtungen radial, tangential und longitudinal erarbeitet worden. Vor allem die Daten zur Scherfestigkeit in den Belastungsrichtungen quer zur Faser und zur Bruchzähigkeit in den Rissausbreitungssystemen RT und TR ergänzen die Ergebnisse bisheriger Arbeiten. Generell ist bei den Untersuchungen an Esche eine Abnahme von Scherfestigkeit und Bruchzähigkeit mit steigender Holzfeuchte im Bereich von ca. 8-20 % Holzfeuchte festzustellen, wobei die Abnahme zwischen ca. 14-18 % Holzfeuchte am stärksten ist. Die Ergebnisse der Bruchschlagarbeit lassen keinen Feuchteinfluss vermuten.

Die ermittelten Schlagzähigkeitswerte liegen im Bereich der ebenfalls stark streuenden Werte aus der Literatur für andere Holzarten wie Buche oder Eiche. Bezüglich der Scherfestigkeit liegen die ermittelten Werte für Esche im Vergleich zu den Ergebnissen von Horvath, Molnar und Niemz (2008) unter den Werten von Buche und Eiche aber über denen der Fichte. Die gute Zähigkeit von Esche findet Ausdruck in im Vergleich zu anderen Holzarten hohen K_{IC} -Werten, besonders in den Ebenen RT und TR. Die Werte liegen hier 10-20 % über den vergleichbaren Werten für Buche (Ozyhar, Hering und Niemz, 2012). Der verstärkende Einfluss der Holzstrahlen in radialer Richtung ist bei der Untersuchung von Scherfestigkeit und Bruchzähigkeit deutlich geworden. Verglichen mit Buche oder Eiche scheint der Einfluss allerdings geringer zu sein.

Die Werte der Bruchschlagarbeit haben Relevanz für schlagartig beanspruchte Produkte wie z.B. Werkzeugstiele. Für den Holzbau sind besonders die Ergebnisse der Scherfestigkeit und der Bruchzähigkeit interessant. Nach Niemz (1993) entstehen Scherspannungen u.a. in Klebfugen und bei kraftschlüssigen Holzverbindungen (z.B. Keilzinken). Die ermittelten K_{IC} -Werte können zur Simulation von Versagensfällen oder Beurteilung von vorhandenen Risse in Bauteilen genutzt werden.

Bei der Bestimmung der elastischen Eigenschaften wurde gezeigt, dass die E- und G-Moduln in allen Richtungen bei zunehmender Holzfeuchtigkeit abnehmen. Die Querdehnungszahlen sind

dagegen als unabhängig von der Materialfeuchte zu betrachten. Beim Vergleich der Werte aus dynamischen Messmethoden mit statischen Messmethoden wurde gezeigt, dass mittels Eigenfrequenzmessungen relativ genaue Werte für den E-Modul ermittelt werden können. Ultraschallmessungen ergaben dagegen deutlich höhere Werte als im statischen Versuch.

Neben den ermittelten Werten, die in Tabelle 4.1 noch einmal für das Normalklima zusammengefasst sind, liegen viele der für den Holzbau relevanten Eigenschaften bei Laubhölzern wie der Esche über den Werten der meist in der Holzbaubranche eingesetzten Nadelhölzer (z.B. Fichte). Hübner (2009) untersuchte z.B. Buche- und Esche-BSH und berichtet über deutlich höhere Querdrukfestigkeiten als bei vergleichbaren Nadelholzkonstruktionen. Auch die Querkzugfestigkeiten der Laubhölzer liegen über denen von Nadelholz.

Wie einleitend erwähnt, wird jedoch ein Grossteil des geernteten Laubholzes in der Schweiz nur energetisch verwertet. Aufgrund fehlender Normen für den Laubholzeinsatz im Holzbau können derzeit Projekte nur bei Sondergenehmigung umgesetzt werden. Neben Konstruktionen komplett aus Laubholz, wie zum Beispiel einer Werkhallenkonstruktion aus Esche der Firma Neue Holzbau AG (Lungern, Schweiz), wird Laubholz bereits zur Verstärkung von Nadelholzkonstruktionen eingesetzt.

Um Laubholz für die Holzbaubranche zugänglich zu machen, fehlt es zudem an geeigneten Klebstoffsystemen. Die zum Beispiel für Brettschichtholzkonstruktionen (BSH) relevante Herstellung hochfester Klebeverbindungen erfordert für Laubholzelemente neue Klebstoffsysteme und andere Verklebungsparameter als bei der Verklebung von Nadelholz. Höhere Quellmasse und Elastizitätsmoduln bedingen deutlich höhere Spannungen unter Feuchteinfluss. Nach Untersuchungen von Wetzig et al. (2011) wären zum Abbau dieser Spannungen besonders elastische Klebeverbindungen denkbar. Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften von Laubholz lohnt es sich in dieser Richtung weiter zu forschen.

Tabelle 4.1 Zusammenfassung aller Kennwerte im Normalklima

Orientierung	L		R		T	
	$\bar{x}$	v [%]	$\bar{x}$	v [%]	$\bar{x}$	v [%]
Holzfeuchte	ω	%				
Rohdichte	ρ	g/cm^3	13.44	5		
	E_{Ef}	N/mm^2	0.6	3.9		
	E_{BP5}	N/mm^2	11527	9.3		
	$E_{Bieg.}$	N/mm^2	13945	11.9		
E-Modul	$E_{Bieg.}$	N/mm^2	12371	10.3		
	E_{Epoch}	N/mm^2	18868	5.6	3155	4.5
	E_{Zug}	N/mm^2	12242	13.8	982	13.9
	E_{Druck}	N/mm^2	10576	15.9	1814	20.5
	σ_{Zug}	N/mm^2	130.30	12.6	12.45	8.0
Festigkeit	σ_{Druck}	N/mm^2	43.41	3.1	10.10	57.7
	$\sigma_{Bieg.}$	N/mm^2	94.59	4.5	10.03	3.6
Bruchschlagarbeit	W_b	kJ/m^2	62.40	22.4		
Diffusionswiderst.	μ_{wetcup}				30.84	4.4
	μ_{drycup}				157.46	6.5
Diff. Quellmass		%/%	0.02	0.0	0.18	0.2
					0.31	0.1
Ebene	LR		LT		RT	
	$\bar{x}$	v [%]	$\bar{x}$	v [%]	$\bar{x}$	v [%]
Holzfeuchte	ω	%				
Rohdichte	ρ	g/cm^3	13.47	9.9	13.95	7.4
Schubmodul	G	N/mm^2	0.64	6.2	0.66	6.3
			1176.88	6.5	811.82	6.9
Poissonzahl	ν_{Zug}		0.1	8.4	0.05	16.2
	ν_{Druck}		0.09	18.5	0.04	42.1
Druckscherfestigkeit	τ	N/mm^2	14.78	8.7	13.06	14.3
	$\tau_{0.2}$	N/mm^2	9.12	14.6	10.02	14.5
Bruchzähigkeit	K_{IC}	$MPa\sqrt{m}$			17.6	0.9
					6.50	0.767
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9
					6.50	13.90
					10.50	0.493
					14.05	0.63
					7.9	5.8
					13.97	0.65
					7.7	6.2
					13.83	0.65
					1.3	5.7
					5.7	7.3
					17.9	5
					4.9	0.63
					10.0	0.46
					19.4	0.70
					5.61	8.82
					29.7	4.30
					20.6	2.50
					18.8	18.1
					0.9	18.9

Literaturverzeichnis

- ASTM E 399 (2009)** Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials.
- BAFU (2011)** Jahrbuch Wald und Holz 2011. Bundesamt für Umwelt BAFU
- BAFU (2012)** Jahrbuch Wald und Holz 2012. Bundesamt für Umwelt BAFU
- Baumann, R. (1922)** Die bisherigen Ergebnisse der Holzprüfungen in der Materialprüfungsanstalt an der TH Stuttgart. Berlin: TH Stuttgart, VDI Forschungshefte, 139 S.
- Bodig, J. und Jayne, B.A. (1982)** Mechanics of wood and wood composites. New York: Van Nostrand R., XXI, 712 p.
- Bonoli, C., Niemz, P. und Mannes, D. (2005)** Untersuchungen zu ausgewählten mechanischen Eigenschaften von Eschenholz. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 156 No. 11, 432–437
- Brändli, U.-B. (2010)** Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnisse der dritten Erhebung (2004 -2006). Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL – Technical report
- Bucur, V. (1995)** Acoustics of wood. Boca Raton etc.: CRC Press, 284 S.
- Clarke, S.H. (1935)** Recent work on the relation between anatomical structure and mechanical strength in English ash. Forestry, 9, 132–138
- Debaise, G.R., Porter, A.W. und Pentoney, R.E. (1966)** Morphology and Mechanics of Wood Fracture. Materials Research and Standards, 6 No. 10, 493–499
- DIN 52182 (1976)** Prüfung von Holz - Bestimmung der Rohdichte.
- DIN 52185 (1976)** Prüfung von Holz - Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser.

- DIN 52186** Prüfung von Holz - Biegeversuch.
- DIN 52187 (1979)** Prüfung von Holz - Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung.
- DIN 52188 (1979)** Prüfung von Holz - Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser.
- DIN 52189-1 (1981)** Prüfung von Holz-Schlagbiegeversuch.
- DIN 68364 (2003)** Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten.
- DIN EN 12668-1** Zerstörungsfreie Prüfung - Charakterisierung und Verifizierung der Ultraschall-Prüfausrüstung - Teil 1: Prüfgeräte.
- DIN EN 13183-1 (2002)** Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren.
- DIN EN ISO 12737 (2011)** Metallische Werkstoffe - Bestimmung der Bruchzähigkeit (ebener Dehnungszustand).
- Gerhards, C.C. (1982)** Effect of Moisture-Content and Temperature on the Mechanical-Properties of Wood - an Analysis of Immediate Effects. Wood and Fiber, 14 No. 1, 4–36
- Griffith, A.A. (1921)** The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 221 No. 582-593, 163–198
- Hübner, U. (2009)** Laubhölzer für lastabtragende Bauteile im Bauwesen. OIB aktuell (Zeitschrift des österreichischen Instituts für Bautechnik), 10 No. 2, S. 19 – 20
- Hering, S. (2011)** Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen. Diss. Nr 19903, 2011 ETH Zürich
- Hilbrand, H.C. (1964)** Comparison of blockshear methods for determining shearing strength of solid wood. United States Department of Agriculture, Forest Products Laboratory – Technical report
- Horvath, N., Molnar, S. und Niemz, P. (2008)** Untersuchungen zum Einfluss der Holzfeuchte auf ausgewählte Eigenschaften von Fichte, Eiche und Rotbuche. Holztechnologie, 49 No. 1, 10–15

- Jeronimidis, G. (1980)** The Fracture Behaviour of Wood and the Relations between Toughness and Morphology. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 208 No. 1173, 447–460
- Keunecke, D. et al. (2008)** Stiffness moduli of various softwood and hardwood species determined with ultrasound. Wood material science & engineering, 6 No. 3, 91–94
- Kühne, H. (1951a)** Über die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des braunen Kernholzes der Esche. Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe – Technical report
- Kühne, H. (1951b)** Untersuchungen über einige Eigenschaften des Eschen- und Robinienholzes im Hinblick auf dessen Verwendung für Werkzeugstiele. Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe – Technical report
- Kollmann, F. (1941)** Die Esche und ihr Holz. Berlin: Springer, Schriftenreihe Eigenschaften und Verwertung der deutschen Nutzhölzer, 147 S.
- Kollmann, F. (1951)** Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin u.a.: Springer, 2 Bände
- Krackler, V., Keunecke, D. und Niemz, P. (2010)** Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten. ETH, ETH Zürich
- Kucera, L.J. und Gfeller, B. (1994)** Einheimische und fremdländische Nutzhölzer: Merkmale und Eigenschaften der in der Schweiz gebräuchlichsten Holzarten. Zürich: ETH Zürich
- Logemann, M. und Schelling, W. (1992)** Die Bruchzähigkeit von Fichte und ihre wesentlichen Einflussparameter-Untersuchungen im Mode-1. Holz Als Roh- und Werkstoff, 156 No. 3, 47–52
- Majano-Majano, A., Hughes, M. und Fernandez-Cabo, J.L. (2012)** The fracture toughness and properties of thermally modified beech and ash at different moisture contents. Wood Science and Technology, 46 No. 1-3, 5–21
- Matsumoto, N. und Nairn, J. (2012)** Fracture Toughness of Wood and Wood Composites during Crack Propagation. Wood and Fiber Science, 44 No. 2, 121–133
- Merz, T. (2009)** Messung der Schallgeschwindigkeit in den drei Hauptschnitttrichtungen mit Longitudinal- und Transversalwellen.

- Niemz, P. (1993)** Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW, Holz: Anatomie, Chemie, Physik, 243 S.
- Niemz, P., Kucera, L.J. und Bernatowicz, G. (1999)** Studies on the effect of grain angle on the propagation velocity of soundwaves in wood. Holz Als Roh- und Werkstoff, 57 No. 3, 225–225
- Ozyhar, T., Hering, S. und Niemz, P. (2012)** Moisture-dependent elastic and strength anisotropy of European beech wood in tension. Journal of Materials Science, 47 No. 16, 6141–6150
- Quer, M. et al. (1995)** Zerstörungsfreies Qualitätskontrollverfahren für die Produktion dynamisch beanspruchter Werkzeugstiele aus Eschenholz. European Journal of Wood and Wood Products, 53 No. 4, 229–235
- Reiterer, A. et al. (2002)** The radial reinforcement of the wood structure and its implication on mechanical and fracture mechanical properties. A comparison between two tree species. Journal of Materials Science, 37 No. 5, 935–940
- Reiterer, A., Sinn, G. und Stanzl-Tschegg, S.E. (2002)** Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 332 No. 1-2, 29–36
- Richard, H.A. und Sander, M. (2012)** Ermüdungsrisse erkennen, sicher beurteilen, vermeiden. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, Praxis, 259 S.
- Scheffler, M. (2002)** Bruchmechanische Untersuchungen zur Trockenrissbildung an Laubholz. Herdecke: GCA-Verlag
- Schniewind, A.P. und Pozniak, R.A. (1971)** On the fracture toughness of Douglas fir wood. Engineering Fracture Mechanics, 2 No. 3, 223–230
- Sell, J. (1997)** Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. Zürich: Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz
- Smith, I., Landis, E. und Gong, M. (2003)** Fracture and fatigue in wood. Chichester: Wiley, 234 S.
- Smith, I. und Vasic, S. (2002)** Fracture behaviour of softwood. Mechanics of Materials, 35, 803–815

- Stanzl-Tschegg, S.E., Tan, D.-M. und Tschegg, E.K. (1995)** New splitting method for wood fracture characterization. Wood Science and Technology, 29 No. 1, 31–50
- Tollert, M. (2010)** Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Kompaktzugproben aus Eibe und Fichte in Abhängigkeit von der Rissausbreitungsrichtung.
- Tsoumis, G. (1991)** Science and technology of wood structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand R., XIII, 494 S.
- Valentin, G.H. (1991)** Application of Fracture Mechanics to Timber Structures RILEM State-of-the-art Report. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, rakennetekniikan laboratorio
- Wagenführ, A. und Scholz, F. (2008)** Taschenbuch der Holztechnik. München: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Verlag, 568 S.
- Wagenführ, R. (2000)** Holzatlas. 5th edition. München: Fachbuchverlag Leipzig, 707 S.
- Wetzig, M. et al. (2011)** Untersuchungen zur Verklebung dreischichtiger Massivholzplatten unter Verwendung von Laubholz. Bautechnik, 88 No. 10, 687–693
- Wood Handbook (2010)** Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory