

Stefan Seegmüller

**Untersuchungen über die mechanische
Holzentfeuchtung zum Abbau innerer
Holzspannungen bei schwachem
Buchenstammholz**

Gliederung

1	Einleitung	4
1.1	Stand des Wissens	4
1.2	Zielsetzung	8
2	Material und Methoden	10
2.1	Holz	10
2.2	Versuchsanordnung	12
2.2.1	Mechanische Holzentfeuchtung	12
2.2.2	Einschnitt und Besäumung	14
2.2.3	Technische Endtrocknung	15
2.3	Methoden	17
2.3.1	Feuchtebestimmung	17
2.3.1.1	Xylemsaftwägung	17
2.3.1.2	Elektrische Widerstandsmessung	18
2.3.1.3	Darrmethode	18
2.3.2	Dehnungsmessung	20
2.3.3	Charakterisierung der Schnittholzrisse	22
2.3.4	Charakterisierung der Schnittholzverformung	23
2.4	Statistische Auswertung	26
3	Ergebnisse	29
3.1	Holzfeuchte	29

3.1.1	Mittlere Holzfeuchte	29
3.1.1.1	Vergleich unterschiedlicher Messmethoden	29
3.1.1.2	Einfluss der I/D-Behandlung auf die mittlere Holzfeuchte	30
3.1.2	Einfluss der I/D-Behandlung auf die Holzfeuchteverteilung	31
3.2	Holzspannungen	32
3.2.1	Längszugdehnung im Rundholz	32
3.2.2	Rissbildung im Schnittholz	33
3.2.2.1	Risslängen	34
3.2.2.2	Rissbreiten	38
3.2.2.3	Rissflächen	42
3.2.3	Verformungen des Schnittholzes	45
3.2.3.1	Längskrümmung	45
3.2.3.2	Querkrümmung	49
3.2.3.3	Verdrehungswinkel	51
3.2.3.4	Verdrehung	52
4	Diskussion	57
4.1	Holzfeuchteverteilung im Stammholz	57
4.2	Längszugspannungen im Stammholz	59
4.3	Schnittholzrisse	60
4.4	Schnittholzverformungen	62
4.5	Qualitätssortierung	65
4.6	Ökonomische Betrachtung	67
5	Zusammenfassung	70
6	Literatur	72

7	Abkürzungen	78
7.1	Kennwerte und Namen	78
7.2	Zeitschriften	78

1 Einleitung

1.1 Stand des Wissens

Laubbäume nehmen über 37 % der Waldflächen in Deutschland ein. Die wichtigste der beteiligten Baumarten ist die Buche, die fast die Hälfte aller Laubwälder prägt (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (BMELF), 1992). Besonders in Rheinland-Pfalz, das mit 42 % den höchsten relativen Waldanteil aller Bundesländer aufweist, wachsen überdurchschnittlich viele Buchen. So liegt der Buchenflächenanteil in diesem Bundesland bei fast 21 %. Nur Hessen ist noch reicher an Buchenwäldern (BMELF, 1992).

Die Bedeutung der Buche lässt sich nicht nur darauf zurückführen, dass sie die wichtigste Schlusswaldbaumart in Mitteleuropa darstellt, sondern auch darauf, dass sie vielfältig nutzbar ist (BURSCHEL und HUSS, 1987; ANTHES *et al.*, 1993). So stellte Buchenholz in der Vergangenheit einen der wichtigsten Energieträger dar. Noch heute werden in ländlichen Regionen wie beispielsweise der Westeifel 65-80 % des Buchenholzes zu diesem Zweck verwendet (MAIER und ENGELS, 2003).

Buchenstammholz lässt sich darüberhinaus auf vielfältige Weise stofflich nutzen. „Zu den Hauptverwendungsbereichen zählen die Herstellung von Möbeln (besonders für stark beanspruchte Gebrauchsmöbel, Stühle, Tische und Gestelle), der Innenausbau (Treppen, Parkett, Holzpflaster, Trennwände), Eisenbahnschwellen, Küchen- und Haushaltsgeräte aller Art, Spielwaren, Werkzeugteile und -stiele, Drechslerwaren, Modellbau, Klavierbau, Verpackungen einschließlich Paletten, Span- und Faserplatten, Sperrholz (einschließlich der verschiedensten Spezialplatten wie z. B. Multiplexplatten und Panzerholz[®]), Zellstoff und Papier ... und vieles andere mehr“ (GROSSER und ZIMMER, 1998, S. 7).

Für die meisten Stammholzverwendungen stellt der Einschnitt in einem Sägewerk den ersten Bearbeitungsschritt dar (EHLEBRACHT, 1995). Deshalb wird nahezu 80 % des gesamten Laubstammholzes in Sägewerken verarbeitet. In der Regel wird das Stammholz zu Blockware eingeschitten. Weil mit steigender Stammholz-Stärkeklasse Produktivität und Ausbeute wachsen, bevorzugen die meisten Sägewerke stärkeres Stammholz ab HKS-Stärkeklasse 3b (ANTHES *et al.*, 1993). Nicht zuletzt vor diesem Hintergrund stiegen die Preise für starkes Rundholz normaler Qualität seit 1995 um 15 % an (ZENTRALE MARKT- UND PREISBERICHTSTELLE FÜR

ERZEUGNISS DER LAND, FORST- UND ERNÄHRUNGSWIRTSCHAFT GMBH (ZMP), 2001). EHLEBRACHT (2000) stellt für starkes Buchenstammholz normaler Qualität in der Periode von 1985 bis 1997 sogar einen Preisanstieg um 44 % fest.

Demgegenüber konnten die schwachen Stammholzsortimente bis einschließlich HKS-Stärkeklasse 3a kaum vom wachsenden Buchenholzmarkt profitieren (EHLEBRACHT, 2000). Vielmehr mussten die Forstbetriebe „bei nahezu allen wichtigen Sortierungsalternativen für schwaches Stammholz ... Erlösrückgänge oder nur marginal höhere Preise hinnehmen“ (EHLEBRACHT, 2001, S. 15). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass einige mengenmäßig bedeutende Absatzmärkte für schwaches Buchenstammholz wie die Holzpackmittel-, Holzwaren- und Holzschwellenindustrie sowie der Bergbau immer weniger Buchenholz aufnehmen (ANTHES *et al.* 1993; EHLEBRACHT, 2000).

Andererseits lassen sowohl geänderte Waldbauverfahren als auch die Altersklassenstruktur der Buchenwälder bis 2007 leicht ansteigende Mengen an schwachem Buchenstammholz erwarten. So könnten 2007 alleine in den alten Bundesländern mit bis zu 500.000 m³ ca. 20 % mehr Buchenstammholz der Stärkeklasse 2 geerntet werden als 1986. Darüberhinaus zeigte die Bundeswaldinventur von 1988, dass noch nicht einmal die Hälfte des potentiellen Aufkommens an schwachem Buchenstammholz realisiert wird (ANTHES *et al.* 1993).

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Diskrepanz zwischen Aufkommenspotenzial und Absatzmöglichkeiten für schwaches Buchenstammholz bemühte sich die Forstverwaltung Rheinland-Pfalz in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts intensiv um neue Wege zur Laubschwachholzverwendung. Diese Anstrengungen zielten einerseits auf die Erkundung zukunftsweisender Bearbeitungstechnologien und andererseits auf die Entwicklung neuer Produkte ab.

Als zukunftsweisende Bearbeitungstechnologien ließen sich abgeleitet von der Nadel-schwachholzbearbeitung die Profilspaner-, Kreissägen- und die Feinschnittgattertechnik mit automatischem Schnelleinzug identifizieren (EHLEBRACHT, 1995, 1997). Mit Hilfe dieser Techniken gelang es, die Ausbeute zu steigern und die Einschnittkosten zu reduzieren. Gegenüber herkömmlichen Betrieben mit Gattersägen, die bis zu 80,- € Produktionskosten je m³ Schnittholz tragen, errechnete sich ein Kostenvorteil von bis zu 50 % für die neuen Techniken (EHLEBRACHT, 2000; JAAKKO PÖYRY, 2000).

Daneben versuchten Studien, neue Wege zusätzlicher Wertschöpfung durch die Weiterverarbeitung von Halbwaren aus schwachem Buchenstammholz darzustellen. So diskutiert EHLEBRACHT (2001) die Möglichkeiten des Einsatzes von schwachem Buchenstammholz im

Zusammenhang mit „Inside-Out-Beams“, dem „Berliner Verbau“ und bei der Parkettherstellung. Inside-Out-Beams sind eine Art Kreuzholz, während der Berliner Verbau eine Sonderform des Grubenholzes für den Tiefbau darstellt (PATTERSON, 1998; EHLEBRACHT, 2001).

ANTHES *et al.* beobachteten 1993 einen wachsenden Markt für Massivparkett. Dieses Wachstum scheint sich im europäischen Rahmen bis 2002 fortgesetzt zu haben (ANONYMUS, 2003). Entgegen der Annahme von ANTHES *et al.* (1993) nahm der Marktanteil mitteleuropäischer Produzenten in dieser Periode zu (ANONYMUS, 2003). Vor diesem Hintergrund befassten sich FISCHER und JOCHUM (1996) eingehend mit der Parkettherstellung aus schwachem Laubstammholz, darunter auch Buchenholz. Wenngleich technisch grundsätzlich machbar, waren die volumenbezogenen Parkettausbeuten bei der Verwendung von schwachem Laubstammholz geringer und die Sortenstruktur ungünstiger als bei einer Normalproduktion. Dies konnte darauf zurückgeführt werden, dass sich Rohfriesen aus schwacher Buche bei der Kammertrocknung eher als solche aus starker Buche verformt hatten oder gerissen waren. Diese Beobachtungen bestätigte EHLEBRACHT (2001).

Schnittholzverformungen treten in Form von Längskrümmungen, Querkrümmungen und Verdrehungen auf (DIN 68 369, DIN E. V., 1988). Die Längskrümmung stellt die Abweichung der Brettoberfläche von einer Ebene in Faserrichtung dar. Als Querkrümmung wird die Abweichung der Brettoberfläche senkrecht zur Faserrichtung und als Verdrehung die spiralförmige Abweichung der Brettoberfläche von einer breitenparallelen Ebene bezeichnet (SANDBERG, 1997; ÖHMAN, 1999).

Schnittholzrisse treten als Schilfer, Herzrisse oder Schrägrisse auf. Als Schilfer werden Oberflächenrisse bezeichnet. Im Gegensatz zum Schilfer durchtrennen Herz- oder Schrägrisse die fehlerhaften Bretter und Bohlen vollständig. Während Herzrisse senkrecht in der Mitte der Bretter verlaufen, stellen Schrägrisse schräg von der Kernröhre ausgehende Radialrisse dar (DIN 68 369, DIN E. V., 1988).

Verformungen und Holzrisse lassen sich durch Wuchsspannungen oder feuchteabhängige Volumenänderungen des Holzes erklären (MAYER-WEGELIN und MAMMEN, 1954; KAUMAN, 1964). Die Wuchsspannung ist ein Mangel der inneren Holzstruktur, der sich während des Gewebewachstums einstellt (ARCHER, 1987 A). Schon das Holz im stehenden Stamm steht unter Spannung. Die Spannung rührt von der verstärkten Celluloseeinlagerung im Zugholz (nur Laubholz, KUBLER, 1987), divergierenden Mikrofibrillenwinkeln (MADDERN HARRIS und MEYLAN, 1965), der Zellwanddicke (HALE, 1957) und den Zellartenanteilen bzw. –größen her (HALE, 1957; ANONYMUS, 2002). Mit diesen Zell- und Gewebedifferenzierungen re-

agiert der Baum auf statische und dynamische Umwelteinflüsse, die auf seine Architektur einwirken (ANONYMUS, 2002). Typisch für diese Art der Holzspannungen ist, dass sie schon unabhängig vom Quellungszustand der Holzfasern bei Änderungen der auf das Holz einwirkenden Kräfte zu Rissen führen. Beispielsweise treten gerade im Buchenholz häufig unmittelbar nach der Fällung und Stammholzaushaltung Risse auf (MAYER-WEGELIN und MAMMEN, 1954; ANONYMUS, 2002). Solche Probleme scheinen bei schwachem Laubstammholz größer als bei starkem zu sein (DINWOODIE, 1966).

Im Gegensatz dazu beruhen Trocknungsrisse auf der Anisotropie der Schwindmaße und Holzfeuchtegradienten (MAYER-WEGELIN, 1954; KAUMAN, 1964). Während frisches Buchenstammholz ca. 80-115 % Holzfeuchte aufweist, liegt seine Verwendungsfeuchte in der Regel bei 10-15 % (KNIGGE und SCHULZ, 1966; BRUNNER und HILDEBRANDT, 1987, unvollst. zit. in EHLEBRACHT, 2000). Schon bei einer Holzfeuchte von ca. 80 % beginnt Buchenholz zu schwinden (BARISKA, 1966). Dies wird unterhalb des Fasersättigungspunktes von 30 % relativer Holzfeuchte, bei dem alle chemischen und physikalischen Rückhaltekräfte für Wasser in der Holzzellwand noch abgesättigt sind, besonders deutlich (BOSSHARD, 1974). Im nicht mehr fasergesättigten Holz gibt die Zellwandcellulose unter Volumenverkleinerung adhäsiv gebundenes Wasser ab. Entsprechend unterschiedlicher Zellwanddicken und Mikrofibrillenwinkel der tangentialen und radialen Zellwände schwindet Holz mit dem Effekt von Verformungen oder Rissen unterhalb der Fasersättigung anisotrop (z. B. GU *et al.*, 2001).

Neben der zellulären Ebene lassen sich Phänomene der Holzfeuchteverteilung für Trocknungsschäden verantwortlich machen. So weist MAYER-WEGELIN (1955) darauf hin, dass „die verschieden rasche Austrocknung äußerer und innerer Holzschichten ... zur Bildung mehr oder minder zahlreicher und tiefer Schwindrisse führen [kann]“. Dies belegt SZÖKE (1960) in einem Experiment mit Buchenholzkanteln. Er stellt fest, dass das Ausmaß von Trockenspannungen unterhalb der Fasersättigung vom Feuchtigkeitsgefälle im Holz abhängt. KÄRKI (2002) bezieht dementsprechend trockenungsbedingte Schnittholzfehler wie Verformungen oder Risse auf Holzfeuchtegradienten im Holz, die durch ungleiche Trocknung verschärft werden. Auch STAHL (2000) weist darauf hin, dass der radiale Feuchtetransport entlang eines Feuchtegradienten bei der Konvektionstrocknung zu Spannungen im Holz und anschließender Rissbildung führen kann. Solche Spannungen treten insbesondere dann auf, wenn oberflächennahe Holzbereiche unterhalb der Fasersättigung verstärkt schwinden, während Bereiche im Holzinnern noch oberhalb der Fasersättigung vollständig gequollen sind (BRUNNER, 1987). Demnach treten Schnittholzschäden besonders dann auf, wenn das Holz zu schnell getrocknet wird (KÄRKI, 2002).

Bei der Buche lassen sich schon oberhalb des Fasersättigungspunktes Bereiche unterschiedlicher Holzfeuchte im Stammholz identifizieren. So weist EHLEBRACHT (2000) auf besondere Trocknungsrisiken für Buchenschnittholz durch sogenannte „Wassernester“ hin. Diese Probleme machen sich besonders bei Schnittholz aus schwachem Buchenstammholz bemerkbar (FISCHER und JOCHUM, 1996, EHLEBRACHT, 2001). Dies verschärft anscheinend die Trocknungsspannungen während der Kammertrocknung beträchtlich. Auch aus diesem Grund wollen viele Sägewerker diese Sortimente trotz der günstigen Rohstoffpreise nicht verwenden (EHLEBRACHT, 2000).

1.2 Zielsetzung

Andererseits wurde im vergangenen Jahrzehnt an der Universität Karlsruhe mit dem Inkubations-/Dekompressionsverfahren (I/D-Verfahren) eine neue Methode zur mechanischen Stammholzentfeuchtung entwickelt, die sich zur Vergleichmäßigung der Holzfeuchteverteilung eignen soll. „Dabei wird das Holz ... einem erhöhten Umgebungsdruck (Inkubation) ausgesetzt, so daß sich Gas in den flüssigkeitsgefüllten Kapillaren lösen kann. Wird dann der Druck abgesenkt (Dekompression), so bilden sich in den Kapillaren des Holzes kleine Gasbläschen, welche sich ausdehnen und dabei den Holzsaft verschieben. Wird der Holzsaft ausgeschoben und tropft ab, so entfeuchtet sich das Holz. Man kann mehrere Druckzyklen (I/D-Zyklen) anwenden,“ um die Flüssigkeit sukzessive auszuschieben. „Das Holz kann mechanisch innerhalb weniger Minuten bis Stunden in die Nähe der Fasersättigung entfeuchtet werden“ (verändert, nach STAHL, 1999, S. 1). So zeigen erste Erfahrungen, dass auch Buchenholz mit dieser Methode bis auf 50 % Holzfeuchte vorgetrocknet werden kann (STAHL, 2000).

Darüberhinaus erwies sich, dass das I/D-Verfahren die Holzfeuchte von rundem Buchenholz um ca. 1/3 vergleichmäßigte (STAHL, 2000). Dies legt die Vermutung nahe, dass sich dieses Verfahren im Rahmen der Stammholzvortrocknung dazu eignen könnte, „Wassernester“ und andere Holzfeuchtegradienten noch vor der Schnittholzerzeugung zu beseitigen. Dies könnte dazu beitragen, die spannungsbedingt geringen Schnittholzausbeuten von schwachem Buchenstammholz anzuheben, so dass die Vermarktungsfähigkeit dieser Sortimente steigt.

Um diese Hypothesen zu überprüfen wird im Rahmen der vorliegenden Studie schwaches Buchenstammholz im Vergleich zu unbehandelten Kontrollen I/D-entfeuchtet und zu kam-

mergetrocknetem Schnittholz verarbeitet. Die Entfeuchtung wird mittels Feuchteverteilungen über den Stammquerschnitt charakterisiert. Für die Schnittholzqualität werden Kennwerte zu Rissen und Verformungen der Bretter untersucht. Mit Hilfe dieser Kennwerte wird die Qualität des Schnittholzes I/D-entfeuchteter Buchenstämme mit derjenigen unbehandelter Stämme verglichen.

2 Material und Methoden

Um die genannten Hypothesen zu überprüfen, wurden Buchen eines südpfälzischen Standorts (vgl. Kap. 2.1) einerseits nach mechanischer Entfeuchtung und andererseits frisch eingeschnitten (vgl. Kap. 2.2). Vor dem Einschnitt wurde die Längszugspannung aller Stämme bestimmt (vgl. Kap. 2.3). Unmittelbar vor bzw. nach der technischen Endtrocknung wurde das Schnittholz hinsichtlich der Verwerfungen und Rissbildung analysiert (vgl. Kap. 2.3).

2.1 Holz

Das untersuchte Buchenholz stammte aus dem Distrikt XXX „Stixwörth“, Abteilung 2 „Rap-penwörth“, Bestand b des südpfälzischen Forstamts Hagenbach. Das betreffende Waldstück stockt im Rheinaue-Staatswald, Revier Neuburg südlich von Hagenbach. Diese Region gehört dem Wuchsgebiet 07.01. „Nördliches Oberrheinisches Tiefland“, Wuchsbezirk 01 „Rheinau-en“ an. Die Rheinauen zwischen dem Stromufer der nördlichen Oberrheins und dem Hochge-stade werden durch ein „warmgemäßigtes, über die Vielzahl der Wasserflächen etwas ausge-glichesenes Beckenklima kontinentaler Prägung mit sehr hoher Vegetationszeittemperatur und sehr langer Vegetationszeit sowie geringen Niederschlagsmengen“ gekennzeichnet (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG, 1985).

Dementsprechend erhält der Buchenbestand, der in 106-107 m üNN wächst, jährlich ca. 675-750 mm Niederschlag bei einer mittleren Vegetationszeittemperatur von über 16 °C. Trotz der geringen Niederschläge wurde der Standort als „sehr frisch“ bis „äußerst frisch“ eingestuft. Er bietet dem Baumwachstum eine nährstoffreiche, kalkhaltige Vega aus alluvialen Kiesen, San-den und Schluffen in ebener Lage (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG, 1996; FORSTDIREKTION RHEINHESSEN-PFALZ, 1999).

Das geschlossene Buchen-Baumholz wird stamm- bis gruppenweise durch Esche, Berg- und Spitzahorn sowie Hainbuche und Kirsche ergänzt. Den standörtlichen Voraussetzungen ent-sprechend leisten die 53 bzw. 60 Jahre alten Buchen eine I.0. Ertragsklasse (Ertragstafel Bu-

che, Mäßige Durchforstung, SCHOBER, 1967, in: MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU UND FORSTEN, 1980).

Im Rahmen einer planmäßigen Erstdurchforstung wurden im Januar 2001 insgesamt 60 Probestämme mit einem Gesamtvolumen von 8,66 fm entnommen und manuell voll vermessen. Der Einschlagszeitpunkt im Winter gewährleistete, dass die Stämme während der Lagerung keine Feuchtigkeit verloren (KNIGGE und SCHULZ, 1966). Alle Stämme waren 2,80 m lange, äußerlich weitgehend fehlerfreie Erdstammstücke mit Mittendurchmessern von 25,4 cm \pm 7 % (Mindestzopfdurchmesser = 22 cm, Abb. 1). Dies entspricht den nur schwer vermarktbar schwachen Stammholzsortimenten (ANTHES *et al.*, 1993; FISCHER und JOCHUM, 1996).



Abb. 1: Probestämme zur mechanischen Holzentfeuchtung.

Die Stämme stammen aus einer planmäßigen Erstdurchforstung eines ca. 50-jährigen Buchenmischbestands im Wuchsbezirk „Rheinauen“. Die Erdstammstücke (Länge 2,80 m, Mittendurchmesser 25,4 cm \pm 7 %, Mindestzopf 22 cm) waren äußerlich weitgehend fehlerfrei.

2.2 Versuchsanordnung

Während etwa die Hälfte der Stammabschnitte entsprechend einer Zufallsauswahl frisch eingeschnitten wurde, wurde die andere Hälfte der Stammabschnitte vor dem Einschnitt mechanisch entfeuchtet (vgl. Kap. 2.2.1). Die Mittendurchmesser der frisch bearbeiteten Stammabschnitte unterschieden sich mit durchschnittlich $25,5 \text{ cm} \pm 6 \%$ nicht signifikant von denen der mechanisch entfeuchteten Stammabschnitte mit durchschnittlich $25,3 \text{ cm} \pm 7 \%$. Alle Stammabschnitte wurden unmittelbar vor ihrem Einschnitt hinsichtlich ihrer Längszugspannung beurteilt (vgl. Kap. 2.3.2) und nach Einschnitt und Besäumung (vgl. Kap. 2.2.2) technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Unmittelbar nach dem Einschnitt und nochmals nach der technischen Endtrocknung wurden alle Bretter hinsichtlich Rissbildung, Längskrümmung, Querkrümmung, Verdrehungswinkel und Verdrehung begutachtet (vgl. Kap. 2.3.3, 2.3.4).

2.2.1 Mechanische Holzentfeuchtung

25 der insgesamt 60 Stammabschnitte wurden vor ihrem Einschnitt in der I/D-Pilotanlage des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik der Universität Karlsruhe im Anhalt an die von SCHILL und STAHL (1996) beschriebene Methode mechanisch vorentfeuchtet (Abb. 2). Die Stämme wurden im I/D-Reaktor zyklisch mit Druckluft beaufschlagt. Die Drücke der Anfangszyklen lagen bei 40 bar und wurden stufenweise auf 15 bar bei den Endzyklen reduziert. Während die hohen Drücke einen größeren Entfeuchtungseffekt auf die Stämme ausüben, dienen die niederen Drücke eher der Vergleichmäßigung der Feuchte über Stammlänge und -querschnitt (SCHILL und STAHL, 1996). Drücke von über 20 bar wurden mittels 200 bar-Pressluftgasflaschen und manuell gesteuerter Druckreduziereinrichtung erzeugt. Geringere Drücke wurden automatisch aus dem Druckluft-Hausnetz gespeist.

Nachdem Vorversuche gezeigt hatten, dass eine 15 minütige Inkubation unter Druck keine signifikanten Entfeuchtungsfortschritte gegenüber kürzeren Behandlungsdauern verspricht, wurden die Stämme je Zyklus 1 Minute bei der jeweils geeigneten Druckstufe behandelt. Die anschließende Dekompressionsphase dauerte ca. 15 min (vgl. auch SCHILL und STAHL, 1996).



Abb. 2: Pilotanlage zur mechanischen Holzentfeuchtung.

Die I/D-Pilotanlage erlaubt die mechanische Vorentfeuchtung von Stammabschnitten von bis zu 35 cm Durchmesser und 3 m Längen. Der etwa 390 l fassende Druckbehälter ist für einen Überdruck bis 40 bar ausgelegt. Der Drucklastwechsel lässt sich rechnergestützt oder manuell steuern. Ausführliche Informationen zu dieser Anlage finden sich bei SCHILL und STAHL (1996).

Entsprechend der mechanischen Entfeuchtbarkeit der Stämme wurden 85-218 I/D-Zyklen angewandt. Die Entfeuchtbarkeit wurde entsprechend Kap. 2.3.1.1 durch eine getrennte Wägung von Xylemsaft und Holz zwischen den I/D-Zyklen geschätzt. Die Xylemsäfte wurden auf 0,01 g und das Holz auf 0,01 kg genau gewogen. Wenn die austretende Menge Xylemsaft nicht mehr auf eine signifikante Abnahme der Holzfeuchtigkeit schließen ließ, galt die I/D-Behandlung als abgeschlossen (Abb. 3 A, B).

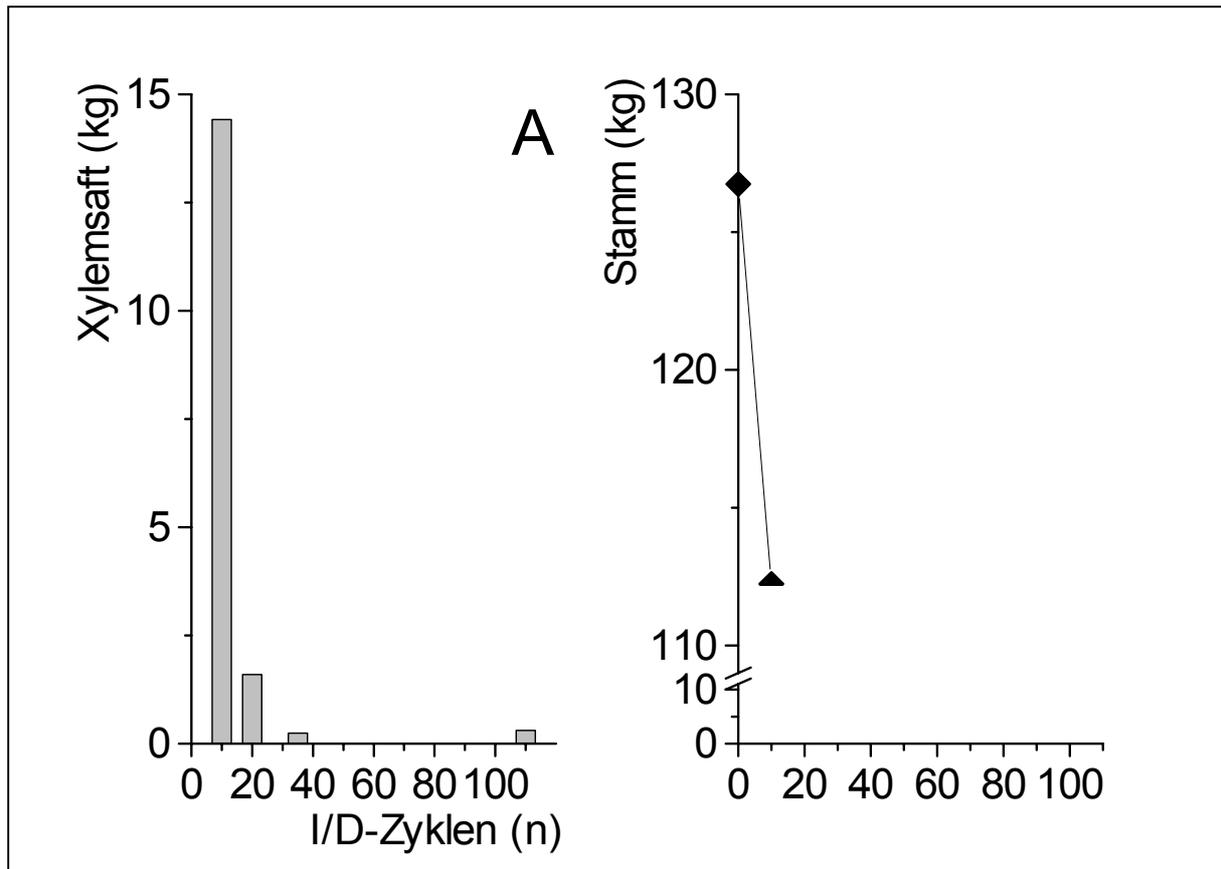


Abb. 3: Verlauf der mechanischen Holzentfeuchtung in Abhängigkeit von der Zyklenzahl am Beispiel von Stamm Nr. 30: Ausgeschobener Xylemsaft (A) und Gewicht des Stammes (B).

Der in Abb. 3 beschriebene Stamm Nr. 30 (Mittendurchmesser 21 cm, Länge 2,80 m) wurde im Laufe der mechanischen Holzentfeuchtung insgesamt 110 Inkubations- und Dekompressionszyklen unterworfen. Der Druck der ersten 15 Zyklen lag bei 40 bar, der nächsten 15 Zyklen bei 30 bar, der folgenden 5 Zyklen bei 20 bar und der restliche Zyklen bei 15 bar. Jede Inkubation dauerte 1 min und jede Dekompression ca. 15 min. Zwischen den Zyklen wurde der Stamm gewogen. Xylemsaft und Holz wurden zu verschiedenen Zeitpunkten der Entfeuchtung getrennt voneinander gewogen.

2.2.2 Einschnitt und Besäumung

Alle Stämme wurden auf einer Gattersäge (Linck GmbH, Oberkirch, Deutschland) zu unbesäumten 32 mm-Brettern eingeschnitten. Entsprechend ihrer Lage im Stamm wurden alle Bretter durchnummeriert (Abb. 4). Unmittelbar nach dem Einschnitt wurden die Bretter auf einer Besäumsäge (Hörmler, Dürmentingen, Deutschland) auf 160 mm Breite besäumt (Abb. 4). Insgesamt wurden 336 Bretter hergestellt. Die Bretter, die weniger als 16 cm waldkante-freie Breite aufwiesen, wurden verworfen. Weil viele Bretter der Seitenware diese Anforder-

ungen nicht erfüllten, wurden in der Regel nur die Bretter 2-4 jedes Stammes zur weiteren Begutachtung herangezogen (Abb. 4). Dementsprechend standen insgesamt 240 Bretter für die Untersuchung der Holzspannungen zur Verfügung. Alle besäumten Bretter wurden mit jeweils 5 Stapelleisten zu Paketen von ca. 1,20 m Höhe und 1,5 m Breite aufgesetzt. Die Bretter wurden bis zum Beginn der technischen Trocknung ca. 3 Wochen vor der Witterung geschützt gelagert.

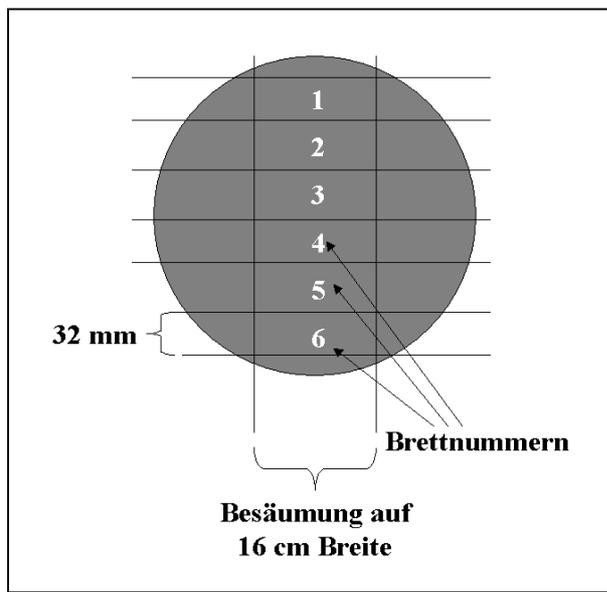


Abb. 4: Einschnittstärke, Besäumung und Schnittholzkennzeichnung der untersuchten Buchenstämme.

2.2.3 Technische Endtrocknung

Das Schnittholz wurde in einer hackschnitzelbefeuerten Trockenkammer (BES Bollmann, Gottmadingen, Deutschland) unter ständiger Überwachung des Trocknungsfortschritts mittels Feuchtefühlern in den Brettern auf eine Endfeuchte von 12 % getrocknet (Abb. 5). Zu diesem Zweck wurde die Kammer nach der Beschickung entsprechend einem bewährten Standardverfahren zur Buchenholztrocknung mit einer Geschwindigkeit von 3,0 °C / h auf die Trocknungs-Anfangstemperatur von 52 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % aufgeheizt (Tab. 1; BES-BOLLMANN, 1996). Dies entspricht einer Gleichgewichtsholzfeuchte von etwa 14 %. Im Laufe der Trocknung wurde die Kammertemperatur abhängig von der Holzfeuchte auf 60 °C angehoben und die relative Luftfeuchte auf 30 % gesenkt, so dass sich zum Ende der Trocknung eine Gleichgewichtsholzfeuchte von 4,8 % ergab (Tab. 1). Zum Schluss der technischen Trocknung wurden die Bretter 11,3 h bei 35 °C und 64 % relative Luftfeuchte auf eine Gleichgewichtsholzfeuchte von 11 % konditioniert.

Bis zur weiteren Untersuchung wurde das Holz ca. 2 Wochen vor Witterung geschützt gelagert. Die Schnittholzfeuchte betrug beim 2. Untersuchungstermin ca. $9,1 \% \pm 0,7 \%$ (N = 16; Holzfeuchtebestimmung im Brettzentrum (> 5 mm Holztiefe) entsprechend Kap. 2.3.1.2). Die Bretter maßen nach der technischen Endtrocknung ca. 2,50 m * 140 mm * 29 mm (L * B * D).



Abb. 5: Technisch endgetrocknetes Buchenschnittholz vor der Trockenkammer.

Die Trockenkammer wurde mit Hackschnitzeln beheizt. Das Holz wurde holzfeuchtegeführt 3 Wochen lang getrocknet, bis 12 % Endfeuchte erreicht waren. Die Feuchteabnahme wurde mit Feuchtefühlern im Schnittholz ständig überwacht.

Holzfeuchte (%)	45	26	12
Temperatur (°C)	52	55	60
Relative Luftfeuchte (%)	80	72	30
Gleichgewichtsholzfeuchte (%)	14	11,5	4,8

Tab. 1: Holzfeuchtegeführtes Programm zur technischen Trocknung von Buchenschnittholz.

Die Holzfeuchte wurde ständig mittels Holzfeuchtefühlern in verschiedenen Brettiefen gemessen. Das Trocknungsprogramm entspricht einem bewährten Standardverfahren (BES-BOHLMANN, 1996).

2.3 Methoden

2.3.1 Feuchtebestimmung

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Holzfeuchten der Stammholzabschnitte und des Schnittholzes zu verschiedenen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Methoden erhoben. So wurde die Stammholzfeuchte und ihre Verteilung vor dem Einschnitt vergleichend für die unbehandelten und I/D-entfeuchteten Stämme erhoben. Zu diesem Zweck wurde die Holzfeuchte in einer ersten Annäherung über die elektrische Leitfähigkeit bestimmt (Kap. 2.3.1.2). Der Erfolg der mechanischen Holzentfeuchtung wurde verfahrensbegleitend durch die Wägung des austretenden Xylemsaftes erfasst (vgl. Kap. 2.2.1; Kap. 2.3.1.1). Detailliert ließen sich die Verhältnisse von Holzfeuchte und -verteilung im Stammholz nach der Darmmethode herleiten (Kap. 2.3.1.3).

Im Zusammenhang mit der Erhebung der Schnittholz-Spannungsparameter wurden nach dem Einschnitt und nach der technischen Endtrocknung die Holzfeuchten der Bretter elektrisch erhoben. Mit einer vergleichbaren Technik wurde der Verlauf der technischen Endtrocknung verfolgt (Kap. 2.3.1.2).

2.3.1.1 Xylemsaftwägung

Der Erfolg der mechanischen Stammholzentfeuchtung nach der I/D-Methode wurde verfahrensbegleitend durch Xylemsaftwägung bestimmt. Zu diesem Zweck wurde der in den Inkubationsphasen ausgetretene Xylemsaft während der Dekompressionsphasen aus dem Reaktor entnommen und auf 0,01 g genau gewogen. Zur Kontrolle der ermittelten Xylemsaftmasse wurden die Stämme nach mehreren Kompressionsphasen auf 0,01 kg genau gewogen. Die Xylemsaftmasse wurde als Trocknungsrate auf das Frischgewicht der Stämme bezogen. Die Bestimmung der Trocknungsraten diente der Abschätzung wirksamer Zyklenzahlen (vgl. Kap. 2.2.1; Abb. 3 A, B).

2.3.1.2 Elektrische Widerstandsmessung

Neben der Wägung lieferte die Widerstands-Messmethode orientierende Informationen über die Holzfeuchteverhältnisse im untersuchten Rund- und Schnittholz. Zu diesem Zweck wurde die Holzfeuchte mit einem mikroprozessorgestützten Hydromette M 4050-Messgerät (GANN Mess- und Regeltechnik GmbH, Stuttgart) gemessen. Die verwendete Rammelektrode M 18 ließ Holzfeuchtemessungen im Bereich 5-100 % zu (GANN MESS- UND REGELTECHNIK GMBH, 1995). Andererseits verfälscht die oberhalb des Fasersättigungspunktes methodenbedingt einsetzende Hydrolyse deutlich die Messergebnisse, so dass die elektrisch gemessenen Holzfeuchten nur als Näherungswerte dienen können (GRAMMEL, 1989). Der Messelektrode entsprechend wurde die Stamm- und Schnittholzfeuchte in jeweils ca. 1 cm Holztiefe in 50 cm Entfernung vom Stamm- bzw. Brettende erhoben.

2.3.1.3 Darmmethode

Zur detaillierten Bestimmung der Stammholzfeuchte und ihrer Verteilung über den Stammquerschnitt wurden vor und nach der I/D-Behandlung Stammscheiben in ca. 20 cm Entfernung vom Stammende entnommen. Auf die gleiche Weise wurden von den unbehandelten Kontrollen unmittelbar vor dem Einschnitt Stammscheiben als Proben für die Holzfeuchtemittlung nach der Darmmethode gewonnen. Von jedem Stamm wurden auf diese Weise 2 Scheiben abgetrennt (Abb. 6 A). Eine der beiden Scheiben wurde mit einer Bandsäge in Probekörper von 20 * 30 * 30 mm Kantenlänge (L * R * T) eingeteilt. Die Probekörper wurden entsprechend ihrer Lage in der Stammscheibe markiert und ebenso wie die unzerlegten Stammscheiben auf 0,01 g genau gewogen und bei 103 °C 3 Tage konvektiv bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (Abb. 6 B). Die getrockneten Probekörper wurden erneut gewogen und aus den Messwerten die relative Holzfeuchte berechnet (vgl. SCHILL und STAHL, 1996). Wie eine Voruntersuchung zeigte, hatte die Probekörper-Einteilung der Stammscheiben mit einer Bandsäge keine signifikanten Einflüsse auf die Holzfeuchten (Tab. 2).

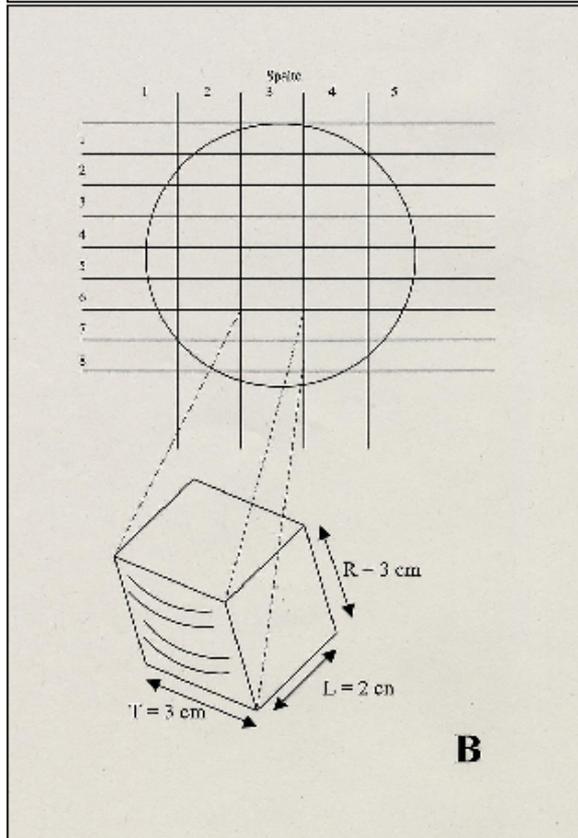
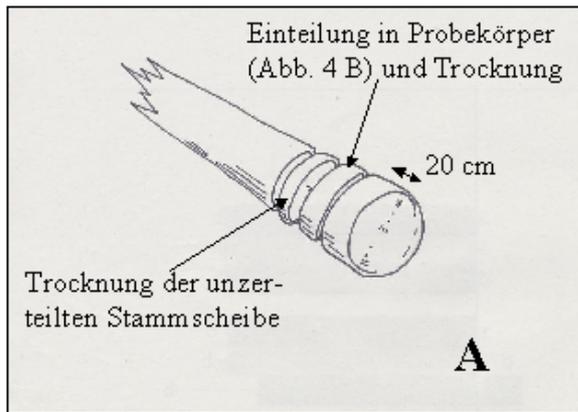


Abb. 6: Entnahme von Stammscheiben zur Holzfeuchtebestimmung nach der Darmmethode (A) und Einteilung der Stammscheiben in Probekörper (B).

Um Effekte durch unkontrollierte Trocknung nach der Rundholzbereitstellung zu vermeiden, wurden die Stammscheiben in ca. 20 cm vom Stammende entfernt entnommen (Abb. 4 A). Von den jeweils 2 Scheiben eines Stammes wurde eine vor der Trocknung in Probekörper eingeteilt (Abb. 4 B).

Behandlung	Holzfeuchte* (%)
Probekörper	48,69 (6) ^A
Stammscheibe	49,62 (6) ^A
Mittel	49,15 (6)

* die Werte in Klammern geben die Variationkoeffizienten an.

Tab. 2: Vergleich der nach der Darmmethode ermittelten relativen Holzfeuchte von Stammscheiben und Probekörpern aus Stammscheiben.

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurde geprüft, ob die Probekörper-Einteilung der Stammscheiben mit einer Bandsäge die Feuchte des untersuchten Holzes beeinflusst hat. Zu diesem Zweck wurden die Stamm-

scheiben der I/D-behandelten Stämme vor der Herstellung der Probekörper quer getrennt. Neben den Probekörpern wurden die vollständigen Stammscheiben getrocknet. Die relative mittlere Holzfeuchte der in Probekörper aufgetrennten Stammscheiben und die Holzfeuchten der nicht aufgetrennten Stammscheiben wurden in einer Varianzanalyse miteinander verglichen. Wie die Indices zeigen, konnten keine signifikanten ($p \leq 0,05$) Unterschiede festgestellt werden, die sich auf die Einteilung der Stammscheiben mit einer Bandsäge zurückführen lassen.

Mit den Messwerten der einzelnen Probekörper ließ sich die räumliche Holzfeuchteverteilung im Stammquerschnitt als Falschfarbenbild grafisch darstellen (Abb. 7). Außerdem wurde mit den Messwerten die mittlere Holzfeuchte der Stammscheiben geschätzt. Die Begutachtung der Standardabweichungen und Variationskoeffizienten dieser Mittelwerte diente der Beschreibung der Holzfeuchteverteilung. Große Standardabweichungen wiesen auf deutliche und kleine auf geringe Holzfeuchteunterschiede innerhalb der Stammscheiben hin. Die Variationskoeffizienten erlaubten den Vergleich von Holzfeuchteverteilungen in Stämmen unterschiedlicher Holzfeuchteniveaus.

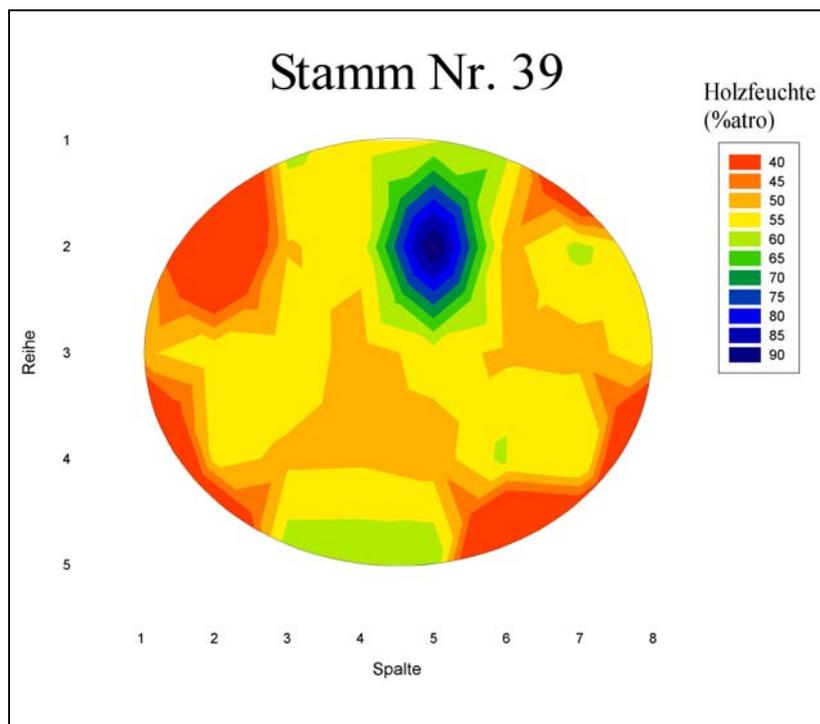


Abb. 7: Exemplarische Darstellung der Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt am Beispiel von Stamm 39.

Die untersuchte Stammscheibe wurde ca. 20 cm von der Stirnfläche entfernt entnommen und in Probekörper (L * R * T = 20 * 30 * 30 mm) eingeteilt. Die Probekörper wurden 2 Tage bei ca. 103 °C auf Gewichtskonstanz getrocknet. Das Falschfarbenbild wurde mit Sigma-Plot 2000 (SPSS Inc., Chicago, Ill, USA) erzeugt.

2.3.2 Dehnungsmessung¹

Unmittelbar vor dem Einschnitt wurden die Längszugspannungen aller Stammabschnitte mittels „Extensiometer“-Bohrmethode mit einem Dehnungsmessgerät nach Fournier (ARCHER, 1987 B; Abb. 8) erhoben, um einen Eindruck der Spannungen im unbehandelten und I/D-entfeuchteten Rundholz zu gewinnen. Die Längszugspannung wird in diesem Verfahren als Ent-

¹ Die Beschreibung der Dehnungsmessung wurde dem Autor freundlicherweise von Herrn Leif Nutto (Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg im Breisgau) überlassen und in abgewandelter Form für den vorliegenden Bericht übernommen.

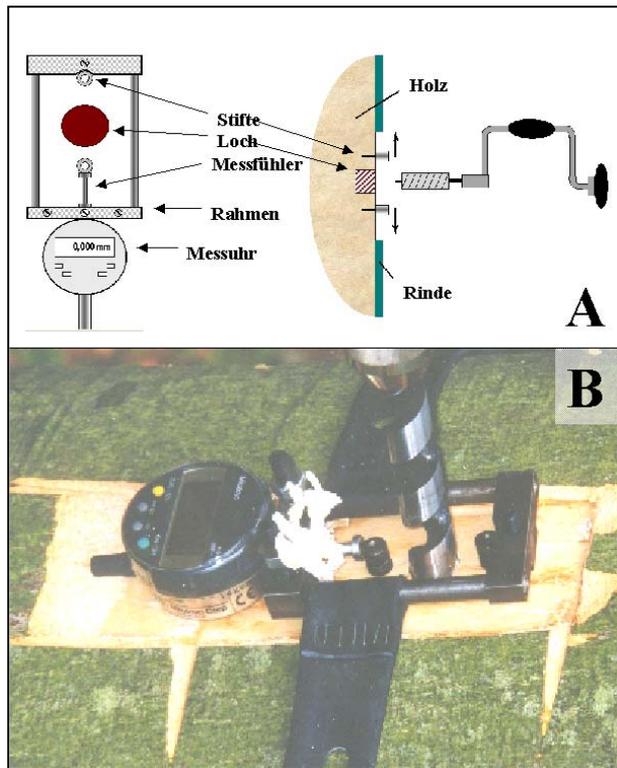


Abb. 8: Schema der Dehnungsmessung mit einem Extensiometer (A, ARCHER, 1987 B) und praktische Durchführung der Dehnungsmessung (B).

Die Abbildungen 8 A und B wurden freundlicherweise vom Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg zur Verfügung gestellt.

fernungsunterschied zwischen 2 definierten Punkten auf der Stammoberfläche vor und nach der Entspannung der sie verbindenden Tracheen und Holzfasern gemessen (Abb. 8 A).

Zu diesem Zweck wurde die Rinde an jeder Messstelle auf einer Fläche von ca. 20 * 10 cm entfernt, um den Holzkörper freizulegen (Abb. 8 B). Mit einer geeigneten Schablone wurden 2 Messnägeln in 4,5 cm Entfernung voneinander parallel zur Holzfaser positioniert und ca. 0,8 cm tief in das Holz eingebracht. Die Entfernung zwischen den beiden Nägeln wurde mit der Präzisionsmessuhr eines Dehnungsmessgeräts nach Fournier *et al.* (1994) auf 1 µm genau kalibriert (Abb. 8 A).

Auf dieser Anordnung aufbauend wird das Holz entspannt, indem die Holzfasern und Tracheen genau in der Mitte zwischen den Messnägeln durch eine Bohrung von 1 cm Durchmesser und mindestens 1,5 cm Tiefe durchtrennt werden (Abb. 8 B). Tiefere Löcher üben keinen Einfluss auf die Längszugdehnung aus (ARCHER, 1987 B; GRZESKOWIAK *et al.*, 1996). Als Maß für die Holzspannung wird die Längszugdehnung als trennungsbedingter Längenunterschied zwischen den definierten Messpunkten des Dehnungsmessgeräts in µm erhoben.

Die Längszugdehnungen wurden in der Mitte jedes Stammabschnitts mit vier jeweils um 90 ° um den Stammumfang herum versetzten Einzelmessungen erhoben. Die Einzelmessungen wurden jeweils nach der entsprechenden Drehung des Stamms an der Stammseite vorgenommen und für jeden Stamm gemittelt.

2.3.3 Charakterisierung der Schnittholzrisse

Obgleich in bestimmten Grenzen akzeptiert, gehören Risse zu den DIN-Sortierkriterien für Buchen-Schnittholz (DIN 68 369; DIN E. V., 1988). Die EU-Norm akzeptiert darüber hinaus überhaupt keine Risse für die höherwertigen Schnittholzklassen (EN 975-1; in: EHLEBRACHT, 2000). Deshalb wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung alle Schnittholzrisse unmittelbar nach Einschnitt und Besäumung (vgl. Kap. 2.2.2) und nach der technischen Endtrocknung (vgl. Kap. 2.2.3) hinsichtlich Länge und maximaler Breite erfasst. Die Risse wurden nicht in Kernrisse, Schrägrisse und Schilfer unterteilt. Risse, die sich auf Äste oder Holzfäule zurückführen ließen, wurden nicht berücksichtigt und oberflächliche Risse nur nachrichtlich aufgenommen, sofern sie nicht tiefer als ca. 5 mm in das Holz reichten. Aus den Aufnahmedaten wurde die Fläche jedes Risses hergeleitet. Alle Einzel-Risslängen, -breiten und -flächen wurden zu brettbezogenen Kennwerten addiert. So wurden die Einzelrisslängen und die Einzelrissflächen zur gesamten Risslänge bzw. -fläche je Brett zusammengezählt. Die Rissbreite wurde durch ihren Maximalwert je Brett charakterisiert.

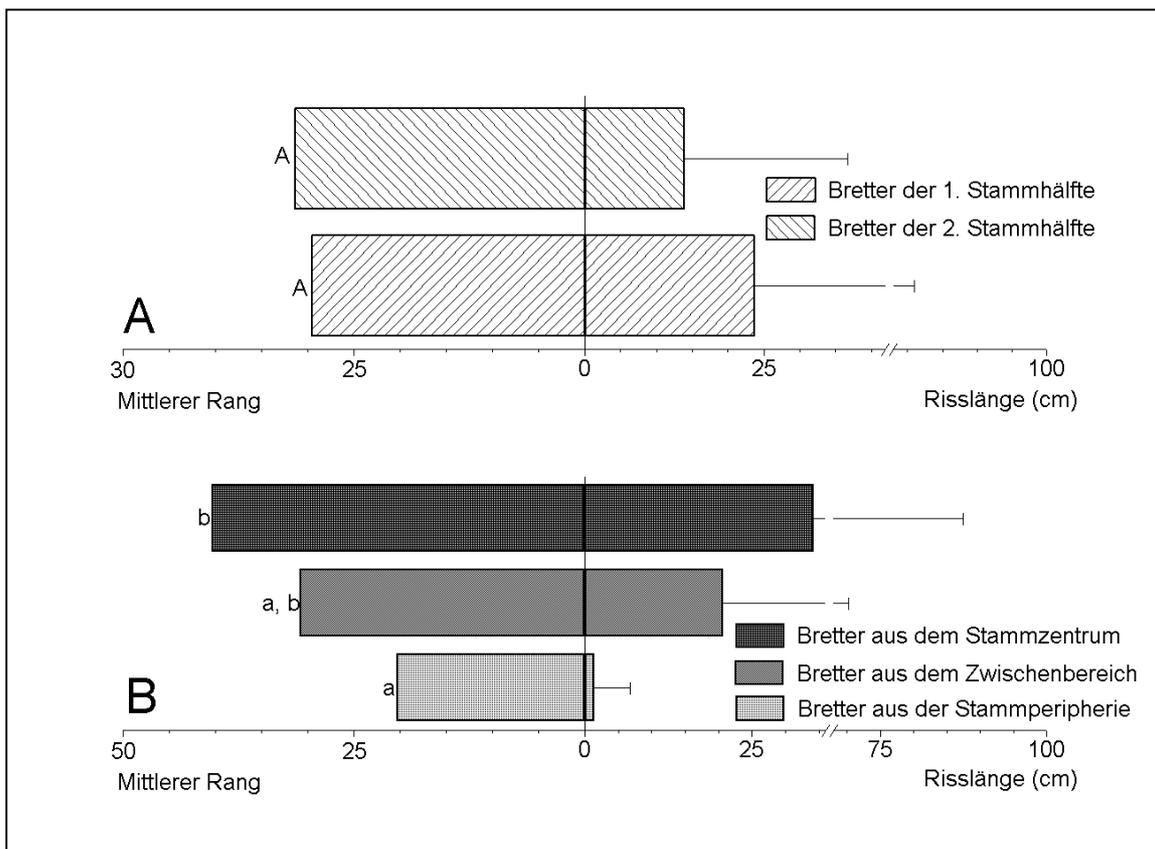


Abb. 9: Risslängen von Brettern der beiden gegenüberliegenden Stammhälften (A) bzw. aus verschiedenen Positionen im Stammquerschnitt (B).

Legende zu Abb. 9: Für die Untersuchung der Schnittholzrisse entsprechend der Lage der Bretter im Stamm wurden die Bretter von 10 zufällig ausgewählten Stammabschnitten vollständig untersucht. Weil die Risslängen nicht normalverteilt waren, wurden signifikante Unterschiede mittels Kruskal-Wallis-Test analysiert. Gleiche Indizes weisen auf homogene Mittelwertgruppen hin. Die Mittelwerte wurden durch Student-Newman-Keuls- und Scheffé-Prozedur bestimmt (vgl. Kap. 2.4).

Mit Hilfe der Risskennwerte wurden die Bretter im Anhalt an die DI-Norm 68 369 über die Gütebedingungen von Rotbuchen-Blockware (DIN e. V., 1988) und an die EU-Norm EN 975-1 (zit. in EHLEBRACHT, 2000) sortiert. Die DI-Norm sieht für Buchenschnittholz 3 Güteklassen vor. Bretter mit bis zu 30 cm langen maximal 10 cm klaffenden Herz- oder Schrägrissen werden in die Güteklasse I sortiert. Die Güteklasse II erlaubt Risse bis 60 cm Länge und 30 cm Breite und die Güteklasse III beliebig lange und über 30 cm breite Risse. Die EU-Norm trennt die Qualität der Bretter ohne Berücksichtigung der Rissbreiten lediglich nach An- oder Abwesenheit von Rissen.

In einer Voruntersuchung wurde die Verteilung von Rissen über den Stammquerschnitt beleuchtet. Dazu wurden einerseits die Bretter der beiden Hälften zufällig ausgewählter Stämme einander gegenübergestellt und andererseits die Bretter aus dem Stammzentrum und der Stammpерipherie miteinander verglichen.

Die Risslängen der Bretter der beiden Stammhälften unterschieden sich nicht signifikant voneinander (Abb. 9 A). Diese Beobachtung stimmt auch für die Rissbreiten und –flächen. Dementsprechend wurden nur die Bretter einer Hälfte jedes Stammabschnitts weiteren Untersuchungen unterworfen. Insgesamt wurden 110 Bretter auf ihre Risse hin begutachtet. Andererseits zeigten alle Risskennwerte deutliche Gradienten vom Stammzentrum zur –peripherie (Abb. 9 B). Deshalb wurden die Risseigenschaften der Bretter entsprechend ihrer Herkunft aus dem Stammquerschnitt differenziert analysiert.

2.3.4 Charakterisierung der Schnittholzverformung

Wie die Risse stellen Verformungen wichtige Merkmale für die Gütesortierung von Buchenschnittholz dar. So schließen beispielsweise die DIN-Güteklassen I und II Längs- und Querkrümmungen aus, während jede Güteklasse Verdrehungen verbietet (vgl. Abb. 10, DIN 68 369; DIN e. V., 1988). Deshalb wurde auch in der vorliegenden Untersuchung der Einfluss

der mechanischen Stammholzentfeuchtung auf die Verformung von Buchenschnittholz untersucht.

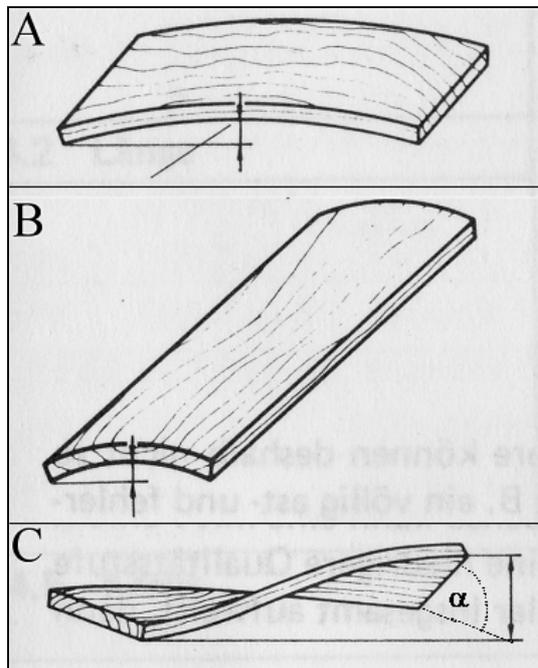


Abb. 10: Längskrümmung (A), Querkrümmung (B) und Verdrehung bzw. Verdrehungswinkel α (C) von Buchenschnittholz.

Die Abbildung wurde in veränderter Form aus DIN 68369 (DIN E. V., 1988) entnommen.

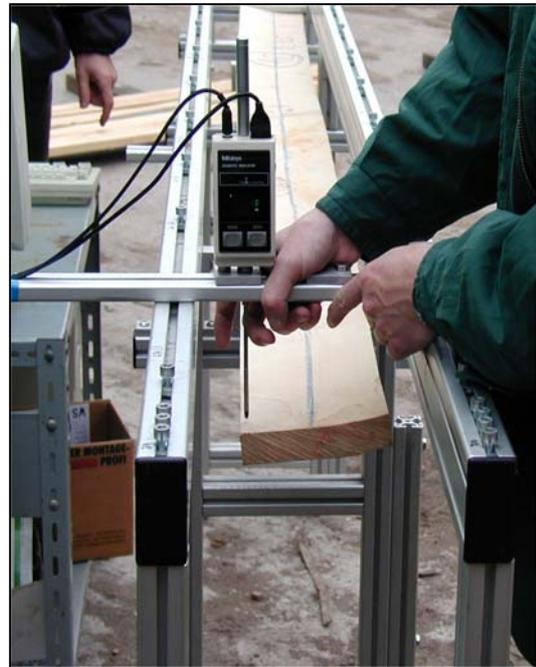


Abb. 11: FRITS – „Freiburg's Improved Timber Scan“.

Der FRITS besteht aus einem verwindungsresistentem Gestell, auf dem sich die Bretter definiert fixieren lassen. Die Brettoberfläche wird punktwise mit einem μm Messfühler gemessen.

Die Verformungen wurden als Längskrümmung, Querkrümmung, Verdrehungswinkel (α) und Verdrehung gemessen. Die Längskrümmung stellt die größte Abweichung der Brettoberfläche von einer Ebene (Pfeilhöhe, cm) in Faserrichtung dar (Abb. 10 A). Als Querkrümmung wird die größte Abweichung der Brettoberfläche senkrecht zur Faserrichtung bezeichnet (Abb. 10 B). Die Krümmungen wurden für die Breitseite der Bretter untersucht. Als Verdrehung gilt die größte spiralförmige Abweichung der Brettoberfläche von einer längsgerichteten Mittengerade (Abb. 10 C). Die Pfeilhöhen dieser 3 Kennwerte wurden auf 2 m Gesamtlänge bzw. -breite bezogen. Der Verdrehungswinkel α steht für die in $^\circ$ gemessene Winkelabweichung zwischen den beiden Brettstirnflächen. (Abb. 10 C).

Die Bretter wurden mit dem „FRITS“ (Freiburg’s Improved Timber Scan) vermessen². FRITS besteht aus einem μm genau eingemessenen verwindungsresistentem Gestell zur ortsgenauen Brettfixierung. Auf der Führungsschiene dieses Gestells wird ein μm -Messfühler so über das Brett bewegt, dass die Abweichung der Brettoberfläche von einer Ebene an definierten Punkten erhoben werden kann (Abb. 11).

Zur Vermessung wurden die Bretter in einer stabilen Dreipunktposition auf das Gestell gelegt. Anschließend wurde mit dem Messfühler die Abweichung der Brettoberfläche von einer Ebene entlang 3 Längslinien an jeweils 12 definierten Punkten auf 1 μm genau erhoben. Entsprechend SEELING und MERFORTH (2000) liegt die Abweichung zwischen 2 Messungen derselben Punkte meist bei ca. 35 μm .

Die Messwerte wurden automatisiert in einen Computer eingelesen. Mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus wurde die Brettform im Computer berechnet und daraus die Pfeilhöhen für Längs- und Querkrümmung sowie Verdrehung abgeleitet.

Die Kennwerte zur Längs- und Querkrümmung bzw. Verdrehung der Bretter dienen zur DIN- und EN-Sortierung der Schnittware. Entsprechend DIN 68 369 können nur vollkommen längskrümmungsfreie Bretter in die Güteklasse I gelangen, während in der Güteklasse II bis zu 1 cm und in der Güteklasse III über 1 cm Längskrümmung zulässig sind. Querkrümmungen sind dieser Norm zufolge nur in der Güteklasse III zulässig und Verdrehungen schließen jede Gütebewertung aus (DIN E. V., 1988).

Die Euro-Norm 975-1 lässt in allen Qualitätsklassen Längskrümmungen von maximal 3 cm / 2 m zu, während stärker längs gebogene Bretter der Schnittholzklasse 4 zugeordnet werden. Die Bretter dürfen dieser Norm gemäß bis zu 1 % für die Schnittholzklasse 1 und 2, bis zu 2 % für die Schnittholzklasse 3 und über 2 % für die Schnittholzklasse 4 quergekrümmt sein. Die zulässigen Verdrehungen liegen bei 2 % für die Schnittholzklassen 1 und 2, 4 % für die Schnittholzklasse 3 und über 4 % für die die Schnittholzklasse 4 (zit. in EHLEBRACHT, 2000).

Wie eine Voruntersuchung zeigte, waren die Bretter nach der technischen Endtrocknung signifikant ($p \leq 0,05$) stärker als vorher verformt. Lediglich der Verdrehungswinkel α hatte sich nicht wesentlich geändert (Abb. 12 A). Deshalb wurde die Bedeutung der mechanischen Stammholzentfeuchtung außer für α jeweils in Bezug zum Trocknungszustand der Bretter berechnet.

² Die Methodenbeschreibung wurde im wesentlichen SEELING und MERFORTH (2000) entnommen.

Eine weitere Voruntersuchung machte deutlich, dass die Position der Bretter im Stamm (Seitenware- oder Kernbrett) nur auf die Längskrümmung und die Verdrehung der Bretter vor der technischen Endtrocknung einen signifikanten Einfluss hatte (Abb. 12 B). Dementsprechend wurde der Einfluss der I/D-Behandlung nur für diese beiden Kennwerte getrennt nach Kern- und Seitenwarebrettern untersucht.

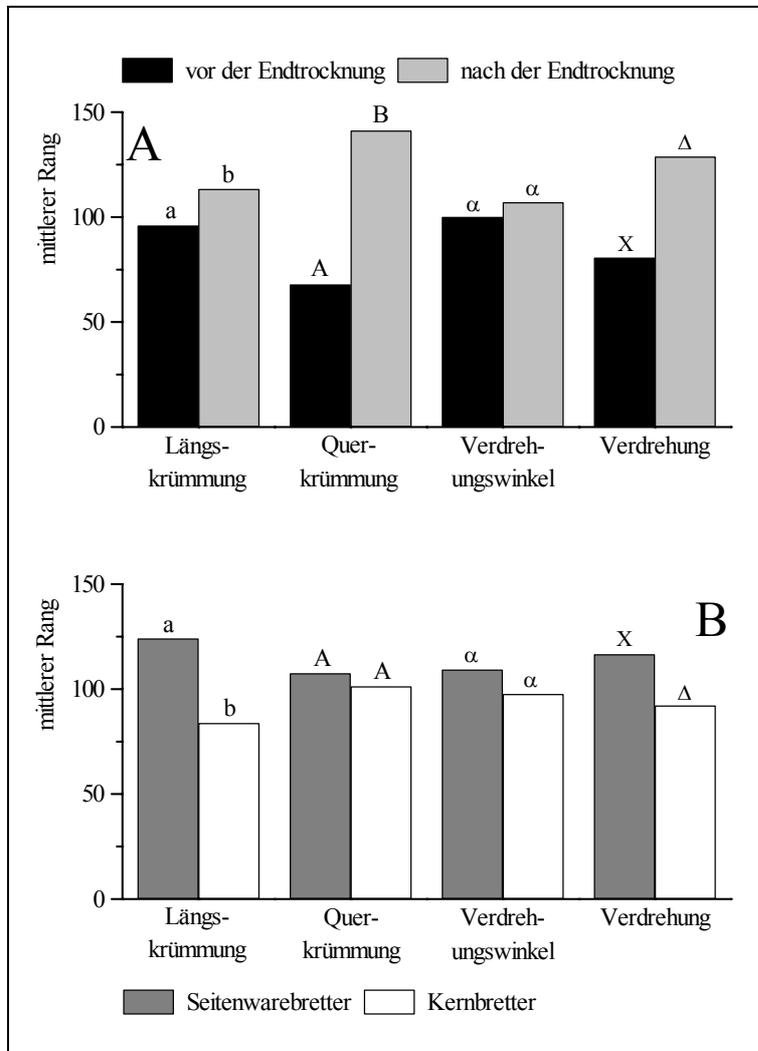


Abb. 12: Einfluss der technischen Endtrocknung (A) und der Lage der Bretter im Stamm (B) auf die Verformungskennwerte von Buchenschnittholz.

Insgesamt wurden 208 Bretter untersucht. Alle Kennwerte waren linksschief verteilt. Deshalb wurden die Einflüsse der technischen Endtrocknung und der Lage der Bretter im Stamm mit Kruskal-Wallis-Tests untersucht. Unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante ($p \leq 0,05$) Unterschiede zwischen Brettern vor und nach der Endtrocknung bzw. zwischen Seitenware- und Kernbrettern.

2.4 Statistische Auswertung

Im Rahmen dieser Studie wurden Messwerte unterschiedlicher Kennwerte stichprobenweise unter dem Einfluss unabhängiger Größen erhoben. Vor weiteren statistischen Analysen wurden die Messwerte aller Kennwerte hinsichtlich ihrer Häufigkeitsverteilungen geprüft. Zu diesem Zweck wurden stetig verteilte Kennwerte in Klassen zusammengefasst. Die Messwerte

aller Kennwerte folgten Normalverteilungen, linkssteilen Verteilungen oder abfallenden Verteilungen. Auf der Basis der Verteilungen wurden für die Auswertung geeignete statistische Verfahren zur Bestimmung wichtiger Einflussgrößen gewählt. Als Signifikanzniveau wurde für alle Tests eine Überschreitungswahrscheinlichkeit $p \leq 0,05$ festgelegt. Als wahrscheinlich signifikant wurde eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von $p \leq 0,1$ festgelegt.

Unabhängige Gruppen mindestens annähernd normalverteilter Messwerte unter dem Einfluss diskreter Größen ließen sich mittels Varianzanalysen miteinander vergleichen. Auf diese Weise wurden unterschiedliche Holzfeuchtemessmethoden, die mittleren Holzfeuchten, deren Varianzen, Längszugspannungen I/D-entfeuchteter und unbehandelter Stämme und soweit möglich die Verformungskennwerte I/D-entfeuchteter und unbehandelter Bretter miteinander verglichen.

Abhängige normalverteilte Stichproben wurden mit paarweisen t-Tests verglichen. Dieser Test gibt gezielt über Änderungen eines Messwerts durch eine unabhängige Größe Aufschluss. Er diente dem Vergleich unterschiedlicher Holzfeuchtemessmethoden und der Bestimmung des I/D-Einflusses auf die durchschnittliche Holzfeuchte.

Stichproben in linkssteilen Verteilungen wurden mit Kruskal-Wallis- bzw. Kolmogorov-Smirnov-Tests auf signifikante Unterschiede geprüft. Während der Kruskal-Wallis-Test jedem Messwert einen Rang zuordnet und die Rangmittelwerte miteinander vergleicht, erlaubt der Kolmogorov-Smirnov-Test der kumulierten Häufigkeitsverteilung die ausschlaggebenden Unterschiede zwischen 2 Stichproben zu identifizieren.

Mittels Kruskal-Wallis-Tests wurde der Einfluss der Lage der Bretter im Stamm und ihres Trocknungszustandes auf die Verformungskennwerte bestimmt. Der Kolmogorov-Smirnov-Test diente der Bestimmung von entfeuchtungsbedingten Unterschieden linkssteil verteilter Verformungskennwerte.

Wurden mehrere einflussgrößenbedingte Gruppen signifikant unterschiedlicher Messwerte für einen Kennwert beobachtet, wurden homogene Mittelwerts-Untergruppen mittels Spannweitentests nach Student, Newman und Keuls sowie Scheffé definiert. Auf diese Weise wurden signifikante Unterschiede zwischen den Schnittholzrisen entsprechend der Lage der Bretter im Stamm untersucht.

An abfallende Häufigkeitsverteilungen wurden nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate lineare bzw. nicht lineare Regressionen angepasst. Die y-Achsenabschnitte und Steigungen der Regressionen wurden in t-Tests miteinander verglichen, sofern sie auf denselben Grundgleichungen basierten. Für nicht lineare Regressionen können die Ergebnisse

dieser Vergleiche nur Hinweise auf signifikante Unterschiede liefern, weil die Vertrauensintervalle solcher Regressionen unscharf sind. Mit Regressionsanalysen wurde die Bedeutung der mechanischen Stammholz-Vorentfeuchtung für die abfallend verteilten Qualitätskennwerte des Buchenschnittholzes analysiert.

Alle statistischen Berechnungen wurden mit SPSS 11.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, USA) berechnet. Lediglich die Regressionen wurden mit stasy-500 V9.01/P2 (PIC GmbH, München, Deutschland) angepasst.

3 Ergebnisse

3.1 Holzfeuchte

3.1.1 Mittlere Holzfeuchte

3.1.1.1 Vergleich unterschiedlicher Messmethoden

Unmittelbar vor dem Einschnitt wurden die Holzfeuchten aller Stämme mittels elektrischer Widerstandsmessung erhoben (vgl. Kap. 2.3.1.2). Daneben wurde die Holzfeuchte von Stammscheiben, die unmittelbar vor dem Einschnitt entnommen worden waren, nach der Darmmethode untersucht (vgl. Kap. 2.3.1.3) sowie im Rahmen der I/D-Behandlung durch Xylemsaft- und Holzwägung bestimmt (vgl. Kap. 2.3.1.1). Die relativen Holzfeuchten nach der elektrischen Widerstandsmessung waren signifikant kleiner als die mit der Darmmethode oder der Xylemsaftwägung ermittelten Werte (Tab. 3). Aus den in Kap. 4.1 genannten Gründen wird in der vorliegenden Untersuchung nicht mehr auf die Holzfeuchten entsprechend der elektrischen Widerstandsmessung, sondern nur noch auf die Werte der Darmmethode oder Xylemsaftwägung zurückgegriffen.

Messmethode	Relative Holzfeuchte* (%)
Elektrische Widerstandsmessung	29,98 ^A (12,6)
Xylemsaftwägung	43,25 ^B (16,0)
Darmmethode	48,29 ^B (7,5)

* Werte in Klammern geben die Variationskoeffizienten an.

Tab. 3: Vergleich der relativen Holzfeuchten von Buchenstammholz entsprechend der Ermittlung mit unterschiedlichen Messmethoden.

Mit Hilfe der unterschiedlichen Messmethoden (Kap. 2.3.1.1 – 2.3.1.3) wurde die Holzfeuchte von 11 Buchenstämmen nach der I/D-Behandlung und vor dem Einschnitt ermittelt. Die Messergebnisse wurden mittels paarweiser t-Tests miteinander verglichen. Unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante ($p \leq 0,05$) Unterschiede zwischen den Messergebnissen der unterschiedlichen Bestimmungsmethoden.

3.1.1.2 Einfluss der I/D-Behandlung auf die mittlere Holzfeuchte

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden 51 der 60 Stämme begutachtet. 9 Stämme wurden nicht analysiert, weil sie an schwerwiegenden Holzfehlern wie Stammfäule oder fällungsbedingten Stammrissen litten, die eine Verarbeitung nicht sinnvoll erscheinen ließen. Von den 51 Stammabschnitten wurden 25 mechanisch entfeuchtet und 26 zur Kontrolle herkömmlich verarbeitet (vgl. Kap. 2.2).

Die unbehandelten Stämme waren wahrscheinlich ($p = 0,004$) mit durchschnittlich 67 % (VK = 11 %) etwas feuchter als die für die I/D-Behandlung vorgesehenen mit durchschnittlich 61,3 % (VK = 9 %; Tab. 4). Dennoch lässt sich ein eindeutiger Einfluss der mechanischen Holzentfeuchtung auf die behandelten Stämme beobachten. So nahm die Holzfeuchte dieser Abschnitte um durchschnittlich 11,7 % auf 49,6 % (VK = 6 %) signifikant ab (Tab. 4). Dementsprechend wiesen die I/D-entfeuchteten Stammabschnitte unmittelbar vor dem Einschnitt signifikant geringere Holzfeuchten als die unbehandelten Kontrollen auf (Tab. 4).

Behandlung	Holzfeuchte (%)			Signifikanz	N
	frisch	entfeuchtet	Differenz		
Kontrolle	67,1 ^a (11)				26
I/D-Behandlung	61,3 ^b (9)	49,6 ^c (6)	11,7 (43)	0,000	25
Mittelwert	64,3 (11)				51

Tab. 4: Holzfeuchten von unbehandelten bzw. I/D-entfeuchteten Buchenholzscheiben.

Die Holzfeuchten der 51 untersuchten Stammabschnitte wurden entsprechend der Darmmethode ermittelt (vgl. Kap. 2.3.1.3). Mit dieser Methode wurden die Holzfeuchten der Stammabschnitte vor und nach der I/D-Entfeuchtung sowie der unbehandelten Kontrollen vor dem Einschnitt erhoben. Die Daten wurden mittels paarweisem t-Test (Einfluss der I/D-Behandlung) oder mittels einfaktorieller Varianzanalyse (unbehandelte Kontrolle und Holz vor bzw. nach der I/D-Behandlung) analysiert. Die Werte in Klammern geben die Variationskoeffizienten an. Unterschiedliche Indizes kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den unbehandelten Kontrollen und den Stammabschnitten vor bzw. nach der I/D-Behandlung.

3.1.2 Einfluss der I/D-Behandlung auf die Holzfeuchteverteilung

Als Kennwerte für die Holzfeuchteverteilung dienten im Rahmen dieser Studie die Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der mittels Darmmethode aus Probekörpern berechneten Holzfeuchten einzelner Stammscheiben unbehandelter Kontrollen und I/D-entfeuchteter Stämme (vgl. Kap. 2.3.1.3). Die räumliche Zuordnung der Probekörper erlaubte

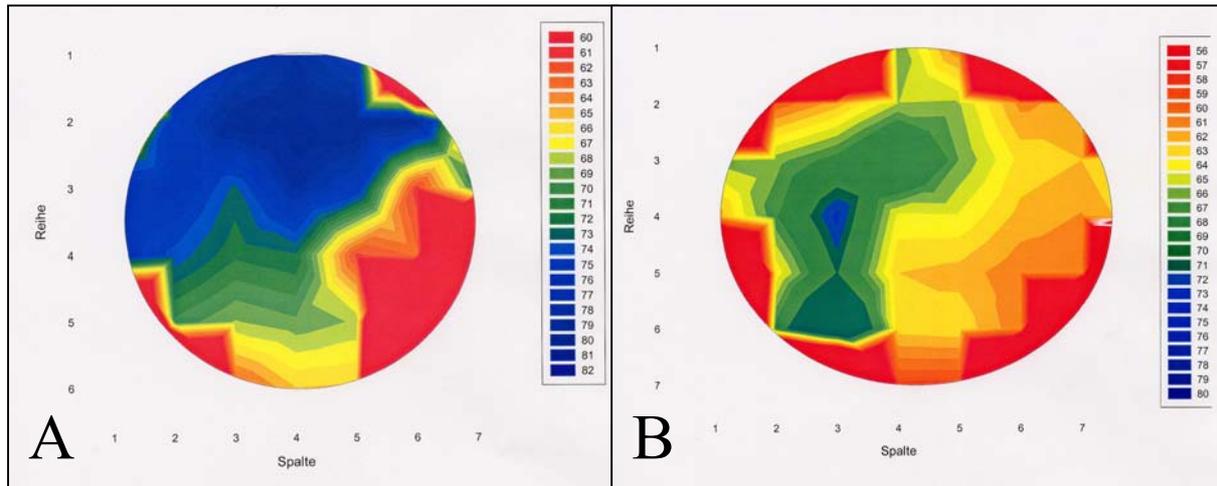


Abb. 13: Holzfeuchteverteilung über den Stammquerschnitt eines unbehandelten (A) und eines I/D-entfeuchteten Stammes (B).

Zur Bestimmung der Holzfeuchteverteilung wurden vor dem Einschnitt der Stämme wie in Kap. 2.3.1.3 beschrieben Holzscheiben in ca. 20 cm Entfernung vom Stammende entnommen, in Probekörper eingeteilt und konvektiv bei 103 °C auf Gewichtskonstanz getrocknet.

stammweise Aussagen über die Holzfeuchteverteilung im Querschnitt. Beispielsweise war die aus dem mechanisch entfachteten Stamm15 entnommene Stammscheibe optisch nicht nur deutlich trockener als die Stammscheibe des nicht entfachteten Stammes 12, sondern wies auch sichtlich weniger Holzfeuchteunterschiede über den Stammquerschnitt auf (Abb. 13 A, B). Dem optischen Eindruck entsprechend waren die I/D-entfeuchteten Stammscheiben mit 48,7 % (Standardabweichung (SE) = 3,1 %) nicht nur im Mittel signifikant trockener als die unbehandelten Kontrollen mit 63,7 % (SE = 8 %) (Tab. 5; vgl. Kap. 3.1.1.2). Auch die Standardabweichungen und Variationskoeffizienten innerhalb der Probenwerte I/D-entfeuchteter Stammscheiben waren mit einer mittleren Abweichung von 2,54 % bzw. einem mittleren Variationskoeffizienten von 5,2 % signifikant geringer als bei den unbehandelten Kontrollen mit einer mittleren Standardabweichung von 4,27 % und einem mittleren Variationskoeffizienten von 6,8 % (Tab. 5). Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die I/D-

Behandlung die Holzfeuchteunterschiede innerhalb der Stämme mit Sicherheit ($p \leq 0,05$) nivelliert hat.

Behandlung	N	Mittelwerte zwischen den Stämmen		
		Mittlere Holzfeuchte*	Standardabweichung*	Variationskoeffizient*
I/D	25	48,69 ^a (6,2)	2,54 ^A (21,7)	5,21 ^S (21,3)
Kontrolle	26	63,68 ^b (12,5)	3,41 ^B (46,9)	6,78 ^E (48,8)

* die Werte in Klammern geben die Variationskoeffizienten zwischen den Stämmen an.

Tab. 5: Mittlere Holzfeuchten, mittlere Standardabweichungen und mittlere Variationskoeffizienten I/D-entfeuchteter und unbehandelter Stämme.

Zur Bestimmung der Holzfeuchteverteilung wurden Stammscheiben vor dem Einschnitt wie in Kap. 2.3.1.3 beschrieben in Probekörper eingeteilt und getrocknet. Die Standardabweichung und der Variationskoeffizient der Probenwerte von den mittleren Holzfeuchten der Stammscheiben dient der Beschreibung der Gleichmäßigkeit der Holzfeuchteverteilung.

3.2 Holzspannungen

3.2.1 Längszugdehnung im Rundholz

Schon im Stammholz treten vielfältige Holzspannungen auf, die sich zumindest zum Teil durch die Messung der Längszugspannungen abbilden lassen (ANONYMUS, 2002). Deshalb wurde mit Hilfe der „Extensiometer-Bohrmethode“ die Längszugdehnung aller behandelten und unbehandelten Stämme unter Berücksichtigung der Stammholzfeuchte und ihrer Verteilung abgeschätzt (vgl. Kap. 2.3.2).

Die Holzfeuchte der Buchen-Rundholzabschnitte hatte auf die Längszugdehnung des Stammholzes ebensowenig Einfluss wie ihre Verteilung (Abb. 14 A, B). Dies deutet darauf hin, dass die Holzspannungen im Rundholz nicht vom Feuchtezustand der Stämme abhingen. Damit übereinstimmend wiesen unbehandelte und I/D-entfeuchtete Stammabschnitte mit durchschnittlich $56 \mu\text{m} \pm 37 \%$ (I/D-entfeuchtete Stämme) bzw. $\pm 25 \%$ (unbehandelte Stämme) identische Längszugdehnungen auf (Abb. 14 C). Offensichtlich hatte die I/D-Behandlung keinen Einfluss auf die Längszugspannungen im unverarbeiteten Rundholz.

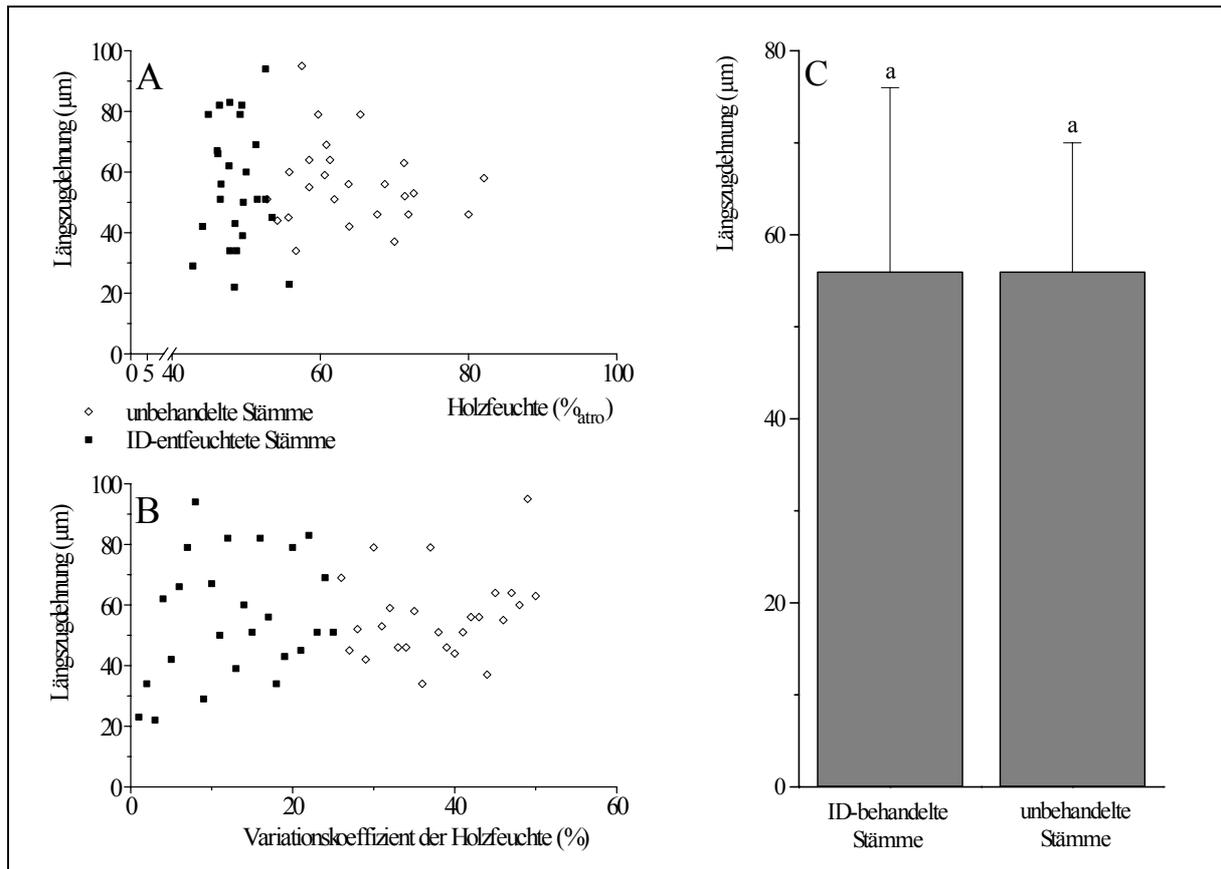


Abb. 14: Längszugdehnungen von Buchenrundholz bei verschiedenen Holzfeuchten (A), Holzfeuchteverteilungen (B) sowie in Abhängigkeit von der I/D- Entfeuchtung (C).

Die Hälfte des Stammholzes wurde durch Gasdruckwechsel mechanisch vorentfeuchtet (Kap. 2.2.1). Die Holzfeuchte und die Holzfeuchteverteilung wurde mittels Darmmethode (Kap. 2.3.1.3) und die Längszugdehnung durch die „Extensiometer-Bohrmethode“ (Kap. 2.3.2) bestimmt. Die identischen Indices in Abb. 14 C zeigen, dass die mechanisch vorentfeuchteten Stämme unter den gleichen Längszugspannungen wie die nicht entfeuchteten Kontrollen standen.

3.2.2 Rissbildung im Schnittholz

Um den Einfluss der mechanischen Stammholzentfeuchtung auf die Schnittholzqualität zu untersuchen, wurden die Risse I/D-behandelter und unbehandelter Bretter der Seitenware und aus dem Stammzentrum entsprechend Kap. 2.3.3 analysiert.

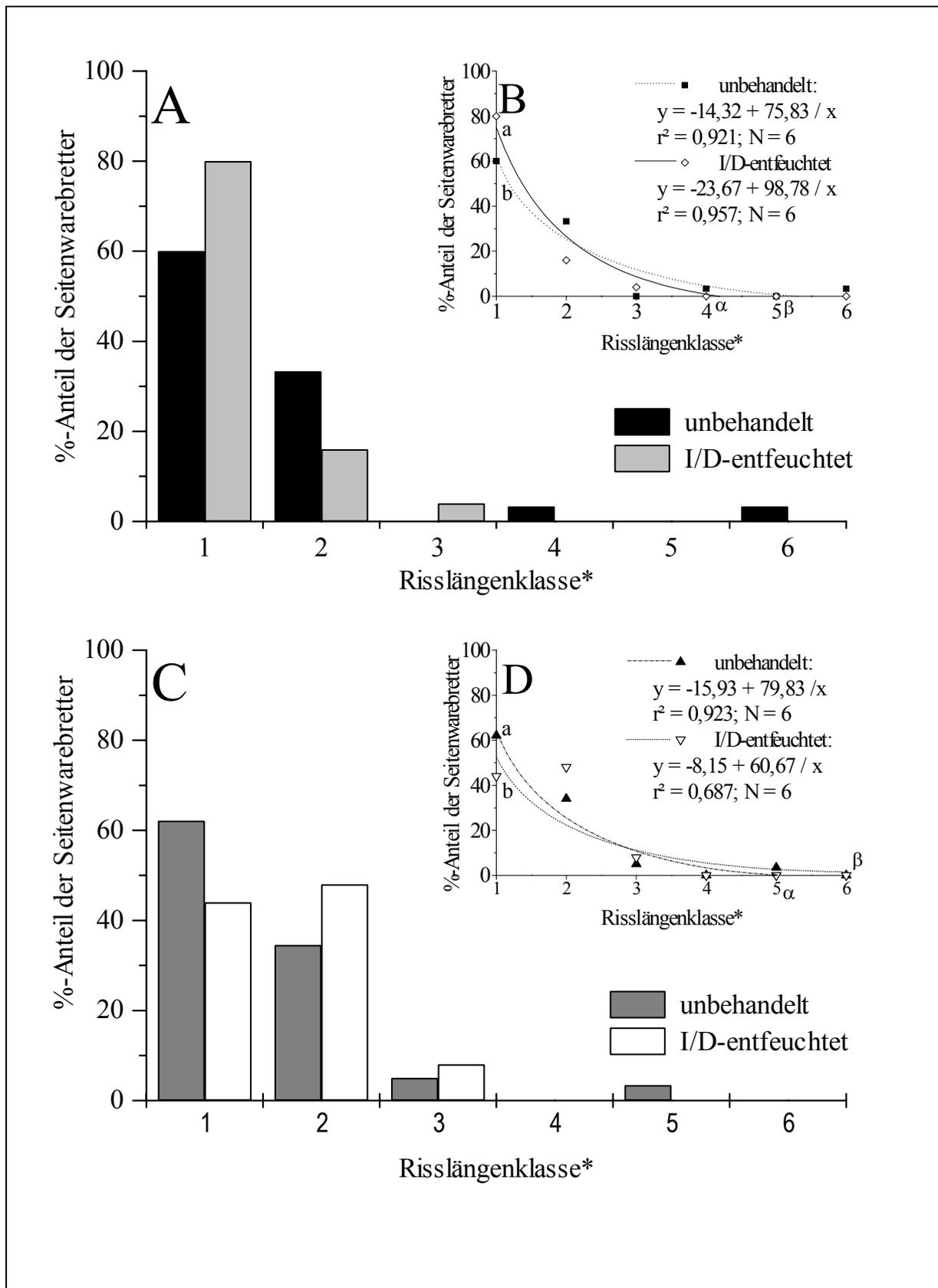
Wie eine Voruntersuchung gezeigt hatte, unterschieden sich die Risse der Seitenware- und Kernbretter vor und nach der technischen Endtrocknung signifikant voneinander (vgl. Kap. 2.3.3; Abb. 9). Deshalb wurden die Risse differenziert nach der Herkunft der Bretter aus dem Stamm und ihrem Trocknungszustand ausgewertet.

3.2.2.1 Risslängen

Die meisten Seitenwarebretter wiesen vor der technischen Endtrocknung keine Risse auf (Abb. 15 A). Dieser Anteil hat im endtrockenen Zustand abgenommen, während mehr Bretter kürzerer Risse bis zu 50 cm Länge aufwiesen (Abb. 15 A, C). Vereinzelt sehr lange Risse reichten bis über 2-2,5 m hinaus (Abb. 15 A, C).

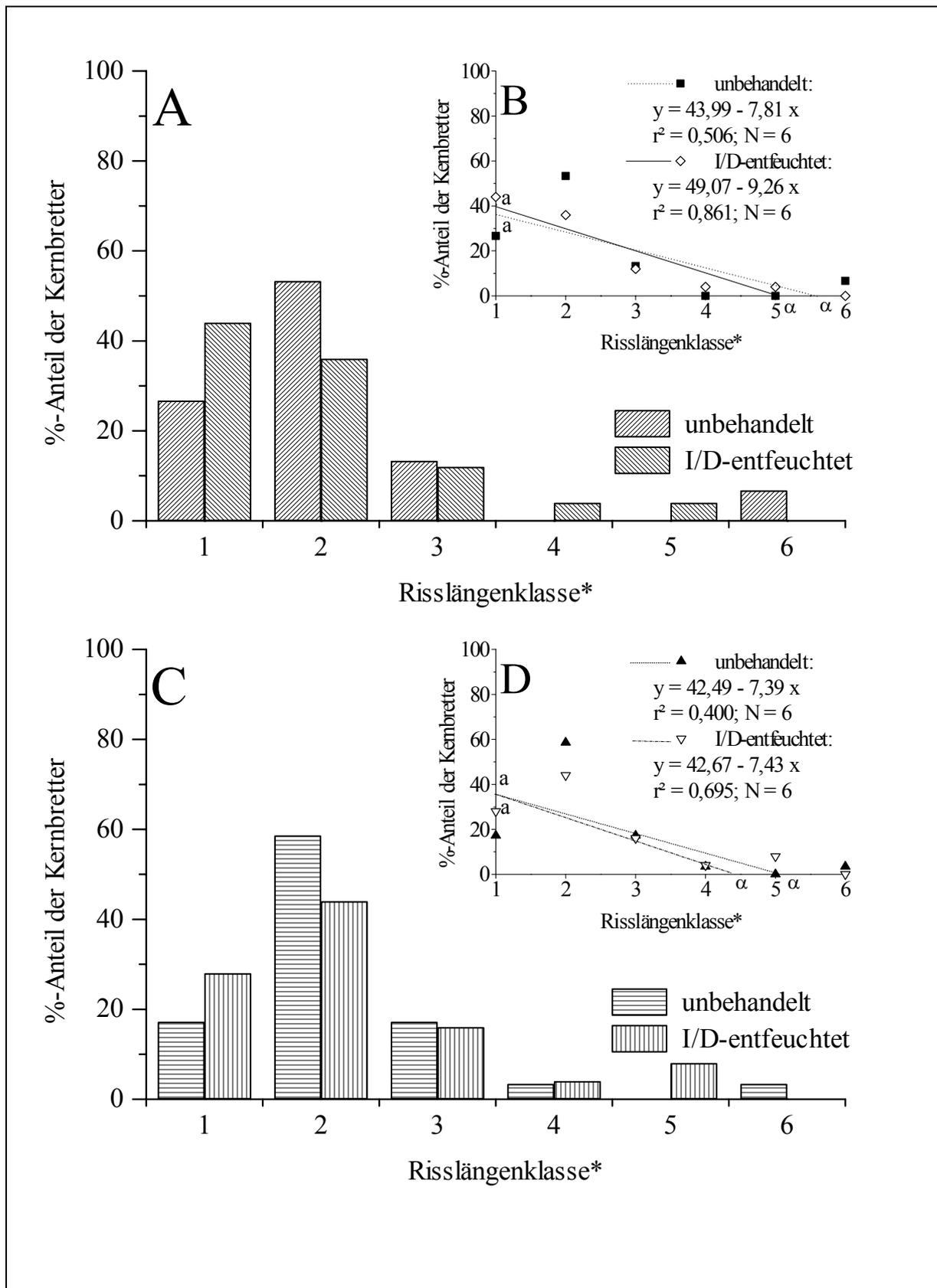
Ca. 20 % mehr I/D-entfeuchtete als unbehandelte Bretter waren vor der technischen Endtrocknung bei Feuchtegehalten oberhalb der Fasersättigung rissfrei. Andererseits traten einzelne über 2,5 m lange Risse nur bei unbehandelten Brettern auf (Abb. 15 A). Dementsprechend wies der t-Test nicht linearer Häufigkeitsregressionen der Risslängen I/D-entfeuchteter bzw. unbehandelter Bretter darauf hin, dass die I/D-entfeuchtete Seitenware vor der Endtrocknung signifikant öfter rissfrei war (Abb. 15 B; y-Achsenabschnitte) und signifikant seltener sehr lange Risse hatte (Abb. 15 B; Steigungen). Offensichtlich hatte die mechanische Vorentfeuchtung der Buchenstämme die Rissbildung oberhalb des Fasersättigungspunktes deutlich reduziert. Dies machte sich in der Schnittholzqualitätssortierung nach der EU-Norm deutlich bemerkbar. Nach dieser Sortiervorschrift gehörten 20 % mehr I/D-entfeuchtete als unbehandelte Seitenwarebretter den beiden höchsten Qualitätsklassen an (Tab. 6). Dennoch waren etwa gleiche Anteile dieser Bretter aus unbehandelten und mechanisch vorentfeuchteten Stämmen mit Rissen bis zu 30 cm in der DIN-Güteklasse I (Tab. 6).

Im Gegensatz dazu waren im endtrockenen Zustand fast 20 % weniger I/D-behandelte als unbehandelte Seitenwarebretter rissfrei (Abb. 15 C). Während sich die Risslängen der unbehandelten Bretter in der technischen Endtrocknung offensichtlich nicht mehr stark verändert hatten, hatten sich bei der weiteren Absenkung der Holzfeuchte unter den Fasersättigungspunkt in vielen I/D-behandelten Brettern neue Risse bis zu 50 cm Länge gebildet (Abb. 15 C). In diesem Sinne zeigt der t-Test der Risslängen-Häufigkeitsregressionen, dass die unbehandelten endtrockenen Seitenwarebretter signifikant öfter rissfrei als die I/D-entfeuchteten waren (Abb. 15 D). Diese Beobachtung bestätigte sich sowohl bei der DIN- als auch bei der EN-Gütesortierung. So wurden ca. 13 % weniger I/D-behandelte Bretter in die höchste DIN-Güteklasse und ca. 17 % weniger in die höchste EN-Schnittholzklasse sortiert (Tab. 6).



* Risslängenkategorie (RLK) 1 ohne Risse, RLK 2 mit Rissen bis zu 50 cm, RLK 3 mit Rissen bis zu 100 cm, RLK 4 mit Rissen bis zu 150 cm, RLK 5 mit Rissen bis zu 200 cm, RLK 6 mit Rissen über 200 cm Länge.

Abb. 15: Anteilmäßige Häufigkeit unterschiedlich lang gerissener Seitenwarebretter vor (A, B) und nach der Endtrocknung (C, D).



* Risslängenkategorie (RLK) 1 ohne Risse, RLK 2 mit Rissen bis zu 50 cm, RLK 3 mit Rissen bis zu 100 cm, RLK 4 mit Rissen bis zu 150 cm, RLK 5 mit Rissen bis zu 200 cm, RLK 6 mit Rissen über 200 cm Länge.

Abb. 16: Anteilsmäßige Häufigkeit unterschiedlich lang gerissener Kernbretter vor (A, B) und nach der Endtrocknung (C, D).

Legende zu **Abb. 15** und **Abb. 16**: Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Insgesamt wurden 110 Bretter untersucht. Die Gesamtlänge der Risse wurde vor und nach der technischen Endtrocknung getrennt durch Anpassung nicht linearer (Abb. 15) bzw. linearer (Abb. 16) Regressionen ausgewertet (B, D). Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Regressionen wurden durch t-Tests der y-Achsenabschnitte (lateinische Indices) und Steigungen (griechische Indices) analysiert (vgl. Kap. 2.4).

Lage der Bretter im Stamm	Trocknungs- zustand	I/D-Ent- feuchtung	% -Anteile der DIN- Güteklassen			% -Anteile der EU- Schnittholzklassen	
			I	II	III	1+2	3+4
Seiten- ware	vorge- trocknet	ohne	90,0	3,3	6,7	60	40
		mit	88,0	8,0	4,0	80	20
	kammer- trocken	ohne	63,3	16,7	20,0	27	73
		mit	76,0	8,0	16,0	44	56
Kern- bretter	vorge- trocknet	ohne	93,1	3,4	3,4	66	34
		mit	84,0	8,0	8,0	44	56
	kammer- trocken	ohne	58,6	24,1	17,2	17	83
		mit	64,0	8,0	28,0	28	72

Tab. 6: Risslängenbedingte %-Anteile der Buchenbretter unbehandelter bzw. I/D-vorentfeuchteter Stämme an den DIN-Güteklassen bzw. EU-Qualitäten.

Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Insgesamt wurden 110 Bretter untersucht. Alle Bretter wurden entsprechend ihren Risslängen nach DIN 68 369 in Güteklassen bzw. nach EN 975-1 in Schnittholzklassen eingewertet (DIN E. V., 1988; EHLEBRACHT, 2000; vgl. Kap. 2.3.3).

Im Vergleich zu den Seitenwarebrettern waren anteilig mehr Kernbretter sowohl vor als auch nach der technischen Endtrocknung bis zu 50 cm lang gerissen. Dennoch ließen sich sehr lange Risse von über 2,50 m Länge nur selten beobachten. Nach der Kammertrocknung hatte sich der Anteil der gerissenen Bretter auf Kosten der rissfreien erhöht (Abb. 16 A, C).

I/D-vorentfeuchtete Kernbretter schienen vor und nach der Kammertrocknung etwas häufiger frei von Rissen zu sein. So betrug die Differenz zwischen dem Anteil rissfreier I/D-entfeuchteter und unbehandelter Kernbretter vor der Kammertrocknung ca. 15 % und nach der Kammertrocknung ca. 10 % (Abb. 16 A,C). Diese Unterschiede ließen sich entsprechend dem t-

Test-Vergleich von y-Achsenabschnitten und Steigungen der Häufigkeitsregressionen nicht mit Sicherheit belegen (Abb. 16 B, D). Anscheinend übte die mechanische Vorentfeuchtung der Stämme lediglich einen untergeordneten Einfluss auf die Längsrisse der Kernbretter aus.

Andererseits ließen sich vor der Kammertrocknung 12 % weniger und nach der Kammertrocknung 11 % mehr I/D-entfeuchtete als unbehandelte Kernbretter den EN-Qualitätsklassen 1+2 zuordnen. Im Gegensatz dazu war der I/D-Einfluss auf die DIN-Güteklasseneinwertung der Kernbretter geringer (Tab. 6).

3.2.2.2 Rissbreiten

Die meisten Bretter der Seitenware wiesen vor und nach der technischen Endtrocknung keine oder keine klaffenden Risse auf (Abb. 17 A, C). So waren über 80 % aller untersuchten Seitenwarebretter in dieser Hinsicht schadensfrei. Die Kernbretter hatten zwar öfter Risse mit einer messbaren Breite. Die Risse spalteten aber nur ca. 8 % dieser Bretter weiter als 1 cm breit auf (Abb. 18 A, C). Damit übereinstimmend waren sehr breite Risse unabhängig von der Lage der Bretter in den Stämmen sehr selten, während über 10 cm breite Risse überhaupt nicht beobachtet wurden (Abb. 17 A, C; 18 A, C). Deshalb stellten die Rissbreiten kein wirksames Sortierkriterium nach DIN 68 369 oder EN 975-1 dar (vgl. Kap. 2.3.3).

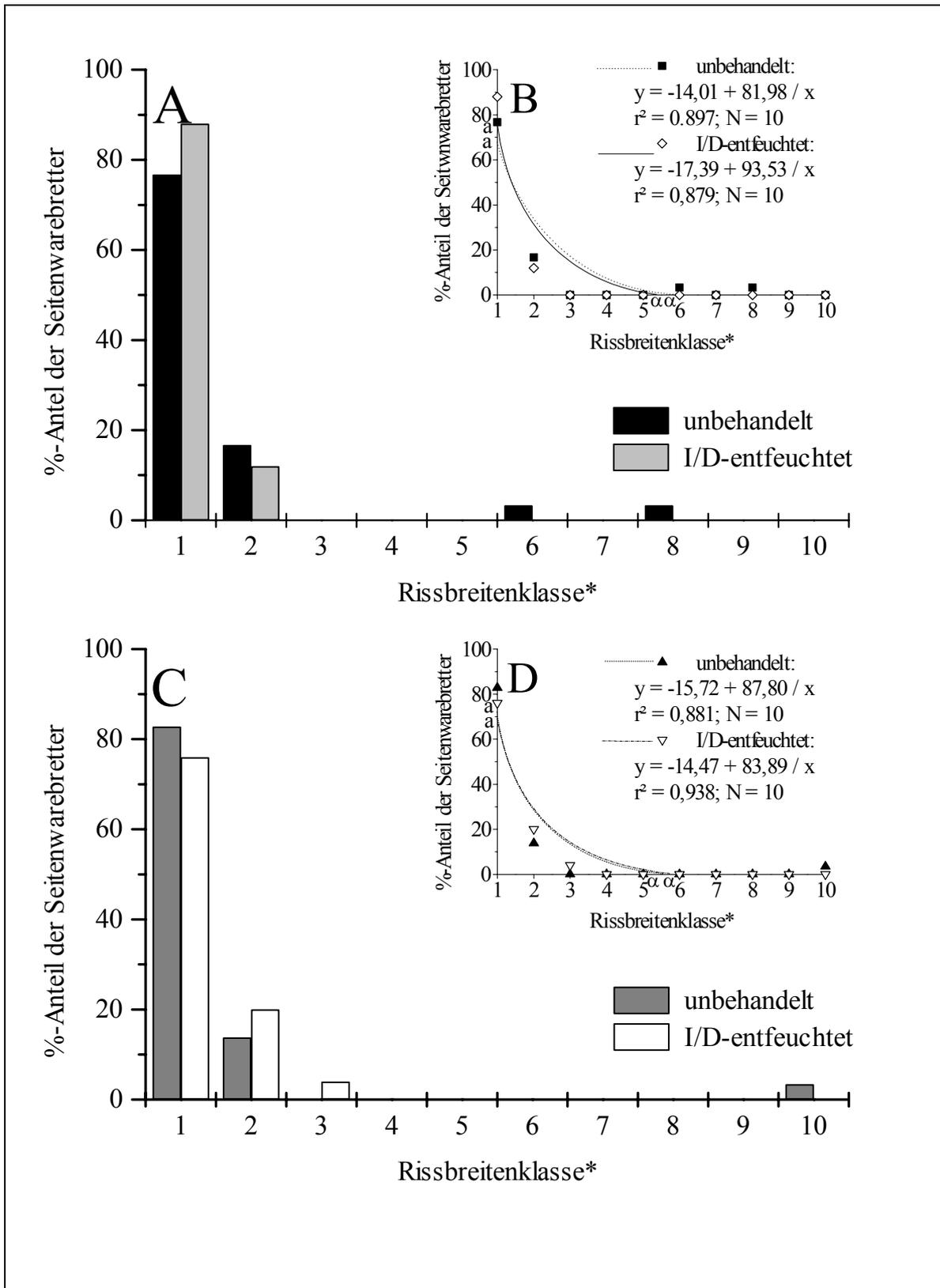
Die I/D-Entfeuchtung übte weder vor noch nach der technischen Endtrocknung einen Einfluss auf die größte Rissbreite der Seitenwarebretter aus (Abb. 17 B, D). So waren vor der Endtrocknung ca. 77 % der unbehandelten und 88 % der I/D-entfeuchteten Seitenwarebretter frei von klaffenden Rissen (Abb. 17 A). Auch nach der technischen Endtrocknung waren die I/D-entfeuchteten und unbehandelten Seitenwarebretter mit etwa der gleichen Wahrscheinlichkeit frei von Rissen, die sich geöffnet hatten (Abb. 17 C). Fast 83 % der unbehandelten und 76 % der I/D-behandelten Seitenwarebretter wurden dementsprechend als fehlerfrei eingestuft (Abb. 17 C). Offensichtlich wirkte sich die I/D-Stammholzentfeuchtung nicht stark auf die Rissbreiten der kammertrockenen Seitenware aus.

Im Gegensatz dazu waren I/D-behandelte Kernbretter vor der technischen Endtrocknung mit ca. 60 % fast doppelt häufig frei von klaffenden Rissen wie unbehandelte mit ca. 30 % (Abb. 18 A). Der Steigungsvergleich der nicht linearen Häufigkeitsregressionen in einem t-Test deutet darauf hin, dass diese Unterschiede nicht nur zufällig sein können (Abb. 18 B). An-

dererseits unterscheiden sich die beiden Regressionen nicht hinsichtlich ihrer y-Achsenabschnitte (Abb. 18 B).

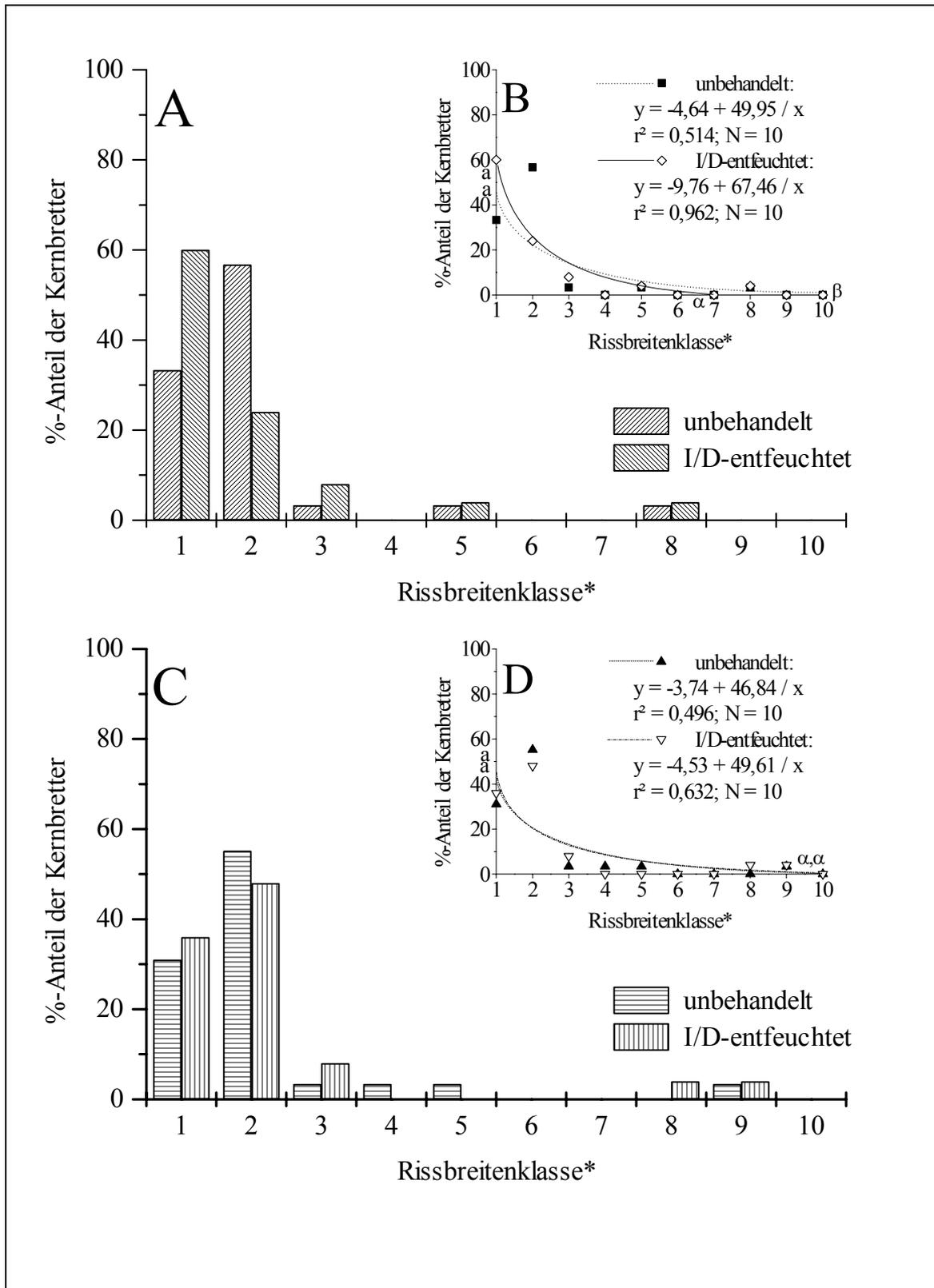
Nach der Endtrocknung ließen sich keine Unterschiede mehr zwischen unbehandelten und I/D-entfeuchteten Brettern beobachten (Abb. 18 C, D). Jeweils ca. 1/3 aller Bretter war frei von klaffenden Rissen; die restlichen Bretter wiesen in der Regel keine Risse von mehr als 1 cm Breite auf. Einzelne Bretter mit breiten Rissen von über 8 cm Breite gab es sowohl nach I/D-Entfeuchtung als auch nach herkömmlicher Verarbeitung (Abb. 18 C).

Legende zu Abb. 17 und Abb. 18: Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Die breitesten Risse von insgesamt 110 Brettern wurden vor und nach der technischen Endtrocknung getrennt durch Anpassung nicht linearer Regressionen ausgewertet (B, D). Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Regressionen wurden durch t-Tests der y-Achsenabschnitte (lateinische Indices) und Steigungen (griechische Indices) analysiert (vgl. Kap. 2.4).



* Rissbreitenklasse (RBK) 1 ohne aufklaffenden Riss, RBK 2 breitester Riss bis zu 1 cm, RBK 3 breitester Riss bis zu 2 cm, RBK 4 breitester Riss bis zu 3 cm, RBK 5 breitester Riss bis zu 4 cm, RBK 6 breitester Riss bis zu 5 cm, RBK 7 breitester Riss bis zu 6 cm, RBK 8 breitester Riss bis zu 7 cm, RBK 9 breitester Riss bis zu 8 cm und RBK 10 breitester Riss über 8 cm breit.

Abb. 17: Anteilsmäßige Häufigkeit unterschiedlich breit gerissener Seitenwarebretter vor (A, B) und nach der Endtrocknung (C, D).



* Rissbreitenklasse (RBK) 1 ohne aufklaffenden Riss, RBK 2 breitester Riss bis zu 1 cm, RBK 3 breitester Riss bis zu 2 cm, RBK 4 breitester Riss bis zu 3 cm, RBK 5 breitester Riss bis zu 4 cm, RBK 6 breitester Riss bis zu 5 cm, RBK 7 breitester Riss bis zu 6 cm, RBK 8 breitester Riss bis zu 7 cm, RBK 9 breitester Riss bis zu 8 cm und RBK 10 breitester Riss über 8 cm breit.

Abb. 18: Anteilmäßige Häufigkeit unterschiedlich breit gerissener Kernbretter vor (A, B) und nach der Endtrocknung (C, D).

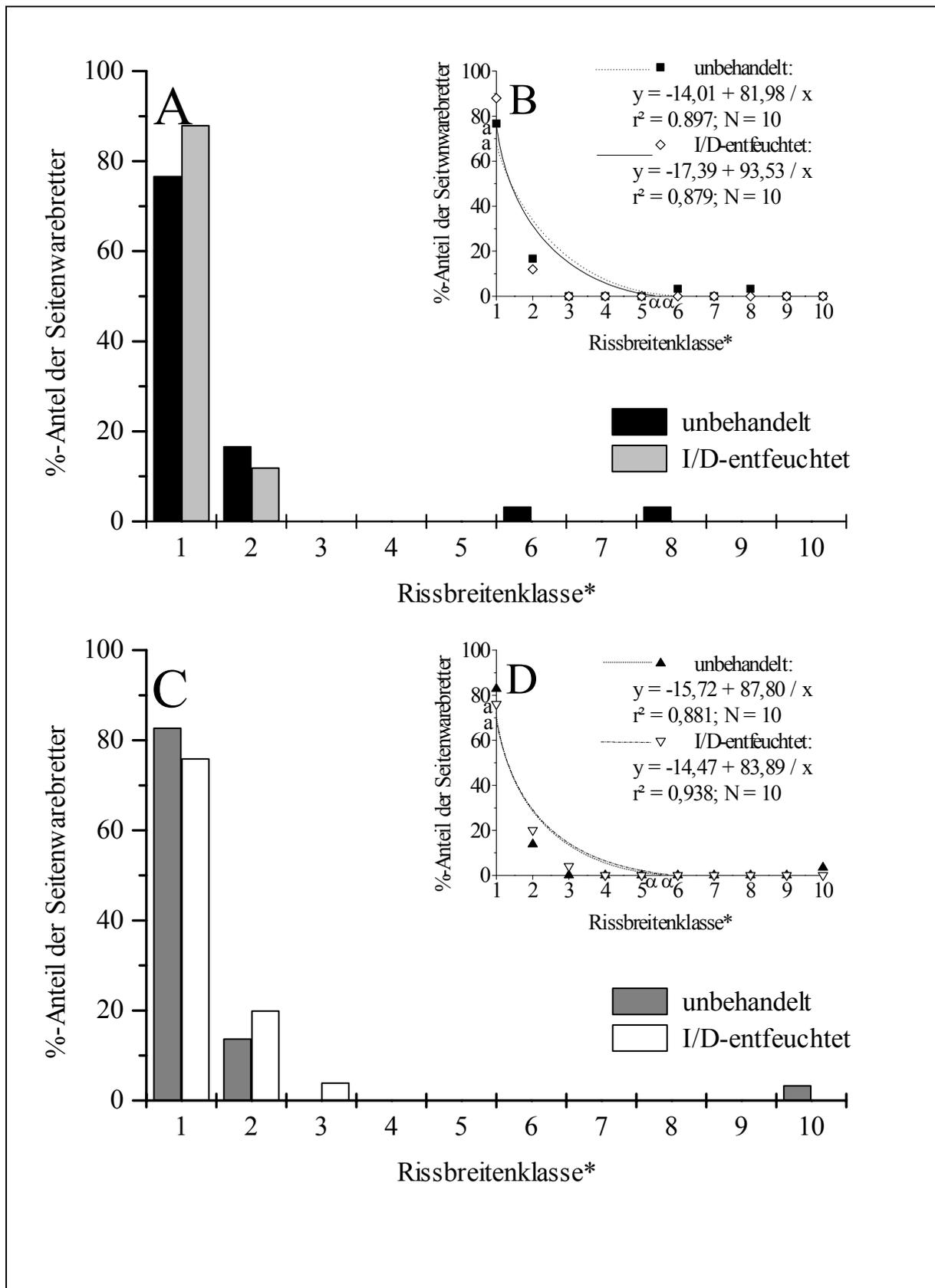
3.2.2.3 Rissflächen

Den meisten Seitenwarebrettern ließen sich keine Rissflächen zuordnen. So waren vor und nach der technischen Endtrocknung ca. 80 % aller Seitenwarebretter frei von flächenhaften Rissen. Sehr große Risse von 1.000 cm² und mehr traten dagegen nur auf einzelnen Brettern unbehandelter Stämme auf, während die Rissflächen der Seitenbretter I/D-entfeuchteter Stämme vor der Kammertrocknung immer unter 10 cm² und nachher immer unter 100 cm² blieben (Abb. 19 A, C). Wie der t-Test-Vergleich der nicht linearen Häufigkeitsregressionen I/D-entfeuchteter und unbehandelter Seitenwarebretter nahelegt, übte die mechanische Stammholzentfeuchtung dennoch keinen deutlichen Einfluss auf die Rissflächen vor oder nach der Kammertrocknung aus (Abb. 19 B, D).

Im Gegensatz zur Seitenware reagierten die Kernbretter vor der technischen Endtrocknung deutlich auf die I/D-Entfeuchtung des Stammholzes. So waren ca. 1/3 mehr Kernbretter I/D-entfeuchteter Stämme als unbehandelter Stämme frei von flächenhaften Rissen. Sehr große Risse von über 1.000 cm² traten nur auf einzelnen Brettern unbehandelter Stämme auf. (Abb. 20 A). Auf diese Unterschiede weist der Vergleich der nicht linearen Häufigkeitsregressionen von I/D-entfeuchteten und unbehandelten Kernbrettern hin. Die signifikant unterschiedlichen y-Achsenabschnitte machen auf deutlich unterschiedliche Anteile von Kernbrettern ohne Risse und die signifikant unterschiedlichen Steigungen auf deutlich unterschiedliche Anteile sehr flächig gerissener Bretter aufmerksam (Abb. 20 B).

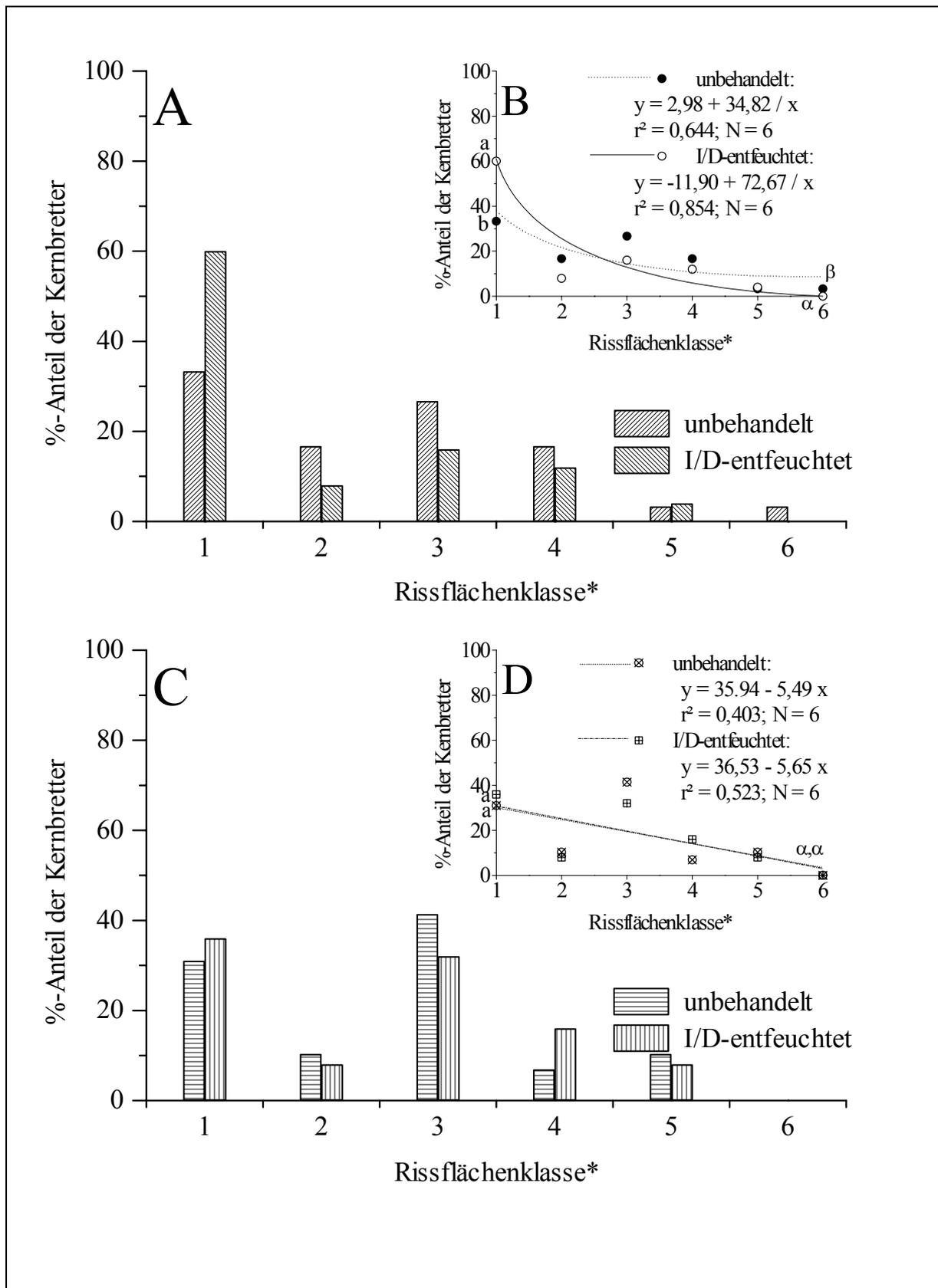
Allerdings verschwanden diese Unterschiede nach der technischen Endtrocknung (Abb. 20 D). Dementsprechend zeigten sich ca. 36 % aller endgetrockneten Kernbretter unabhängig von der I/D-Stammholzentfeuchtung frei von Rissen, während einzelne Bretter Risse von bis zu 1.000 cm² trugen (Abb. 20 C).

Legende zu **Abb. 19** und **Abb. 20**: Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfachteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Die Rissflächen von insgesamt 110 Brettern wurden durch Länge und maximale Breite der Risse bestimmt (vgl. Kap. 2.3.3). Die brettbezogenen Rissflächen wurden vor und nach der technischen Endtrocknung getrennt durch Anpassung nicht linearer (Abb. 19 B, D; 20 B) bzw. linearer (Abb. 20 D) Regressionen ausgewertet. Signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Regressionen wurden durch t-Tests der y-Achsenabschnitte (lateinische Indices) und Steigungen (griechische Indices) analysiert (vgl. Kap. 2.4).



* Rissflächenklasse (RFK) 1 ohne flächenhafte Risse, RFK 2 Rissfläche $\leq 1 \text{ cm}^2$, RFK 3 Rissfläche $\leq 10 \text{ cm}^2$, RFK 4 Rissfläche $\leq 100 \text{ cm}^2$, RFK 5 Rissfläche $\leq 1.000 \text{ cm}^2$, RFK 6 Rissfläche $> 1.000 \text{ cm}^2$.

Abb. 19: Anteilmäßige Häufigkeit der Seitenwarebretter mit unterschiedlichen Rissflächen vor (A, B) und nach der Endtrocknung (C, D).



* Rissflächenklasse (RFK) 1 ohne flächenhafte Risse, RFK 2 Rissfläche $\leq 1 \text{ cm}^2$, RFK 3 Rissfläche $\leq 10 \text{ cm}^2$, RFK 4 Rissfläche $\leq 100 \text{ cm}^2$, RFK 5 Rissfläche $\leq 1.000 \text{ cm}^2$, RFK 6 Rissfläche $> 1.000 \text{ cm}^2$.

Abb. 20: Anteilmäßige Häufigkeit der Kernbretter mit unterschiedlichen Rissflächen vor (A, B) und nach der Endtrocknung (C, D).

3.2.3 Verformungen des Schnittholzes

Neben den Schnittholzrisen stellt die Verformung ein wesentliches Qualitätsmerkmal für Buchenschnittholz dar (DIN E. V., 1988, EHLEBRACHT, 2000). Deshalb wurden die I/D-behandelten und unbehandelten Bretter der Seitenware und aus dem Stammzentrum entsprechend Kap. 2.3.4 hinsichtlich Längs- und Querkrümmung, Verdrehungswinkel α und Verdrehung begutachtet.

3.2.3.1 Längskrümmung

Fast alle Bretter hatten sich der Länge nach gebogen. Lediglich 1 % der Schnittware war vollkommen gerade. Die meisten Bretter wiesen Längskrümmungen bis zu 1 cm / 2 m auf. Nur 5 % waren stärker gebogen, keines jedoch über 1,5 cm / 2 m. Vor diesem Hintergrund stellte die Längskrümmung kein wirksames Sortierkriterium für das untersuchte Buchenschnittholz dar (vgl. Kap. 2.3.4).

Entsprechend den Ergebnissen einer Voruntersuchung unterschieden sich die Längskrümmungen der Seitenware- und Kernbretter vor bzw. nach der technischen Endtrocknung signifikant voneinander (vgl. Kap. 2.3.4; Abb. 12). Deshalb wurde der Einfluss der mechanischen Stammholzentfeuchtung auf die Längskrümmung der Bretter differenziert nach Lage der Bretter im Stamm und ihren Trocknungszustand analysiert.

Die Längskrümmungen der Seitenwarebretter I/D-entfeuchteter und un behandelter Stämme verteilten sich vor der Kammertrocknung normal auf den Bereich von 0-1,5 cm (Abb. 21 A). I/D-entfeuchtete Seitenwarebretter wiesen vor der Endtrocknung im Mittel ca. $0,5 \text{ cm} \pm 0,25 \text{ cm}$ und un behandelte $0,65 \text{ cm} \pm 0,28 \text{ cm}$ Längskrümmung auf. Der Unterschied von ca. 25 % ließ sich in einer Varianzanalyse zwar nicht mit 95 %iger, aber mit über 90 %iger Wahrscheinlichkeit belegen (Abb. 21 B).

Auch nach der technischen Endtrocknung verteilten sich die Längskrümmungen der Seitenwarebretter annähernd normal auf den Bereich von bis zu 1,5 cm (Abb. 21 C). Die mittleren Längskrümmungen lagen mit $0,6 \text{ cm} \pm 0,29 \text{ cm}$ I/D-vor behandelter Bretter und $0,56 \text{ cm} \pm$

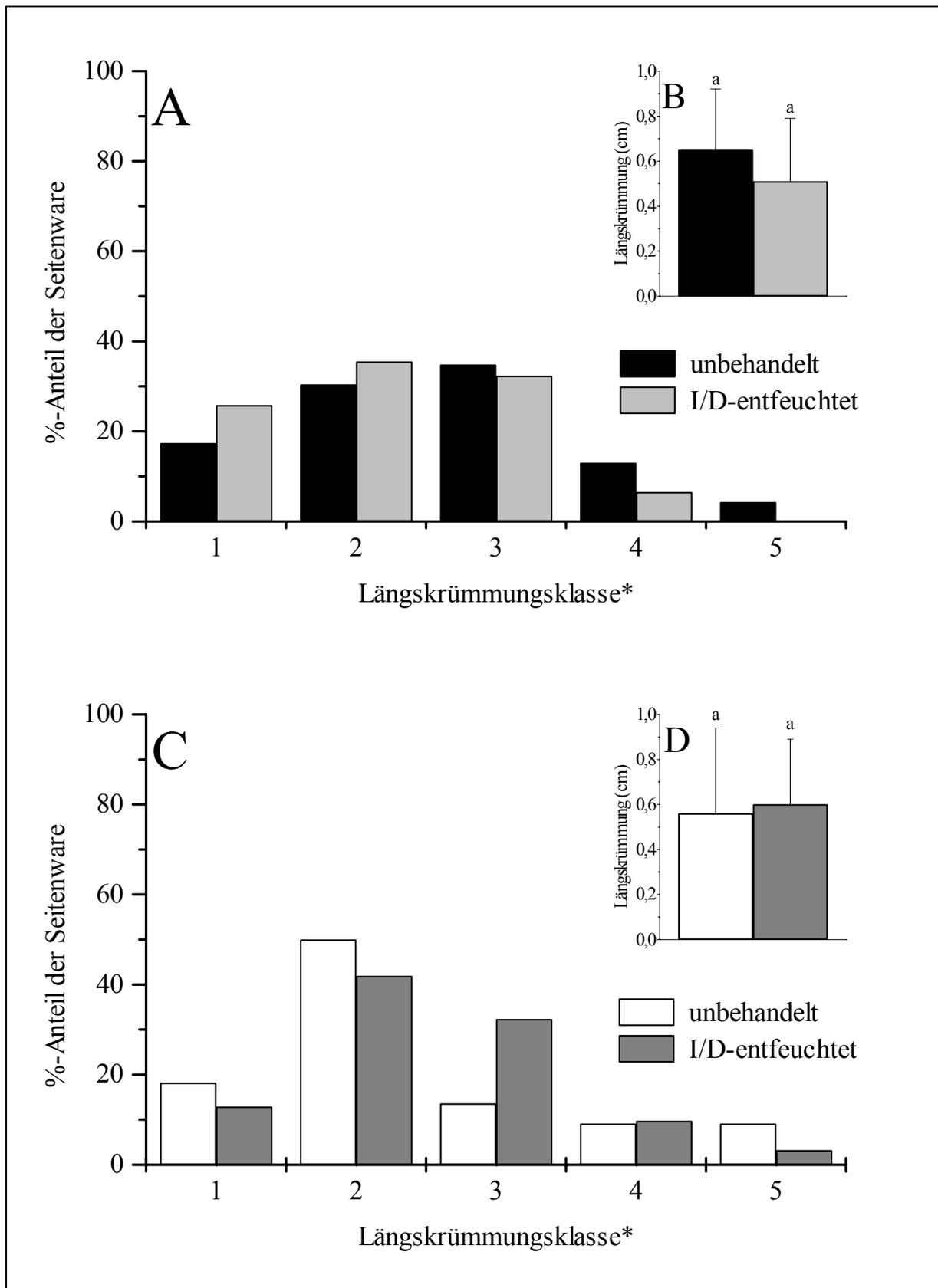
0,38 cm unbehandelter Bretter deutlich näher beieinander. Dementsprechend zeigte auch die Varianzanalyse, dass sich die Längskrümmungen I/D-entfeuchteter und unbehandelter Seitenwarebretter nach der Endtrocknung nicht voneinander unterschieden (Abb. 21 D). Offensichtlich hatte die I/D-Behandlung lediglich oberhalb des Fasersättigungspunktes einen gewissen Einfluss auf die Längskrümmung der Seitenwarebretter.

Im Gegensatz zu den Seitenwarebrettern hatten sich die meisten Kernbretter vor der technischen Endtrocknung lediglich leicht bis zu 0,3 cm der Länge nach gekrümmt. In der Regel wurden keine Längskrümmungen von über 0,9 cm beobachtet. Lediglich ein I/D-entfeuchtetes Brett wies in dieser Hinsicht einen Wert von fast 1,5 cm auf (Abb. 22 A).

Anscheinend waren I/D-entfeuchtete Bretter um ca. 10 % häufiger gegenüber unbehandelten Kernbrettern vor der Kammertrocknung bis 0,3 cm gering längs gekrümmt. Andererseits zeigten unbehandelte Kernbretter ca. 20 % häufiger als I/D-entfeuchtete merkbare Längskrümmungen von bis zu 0,6 cm (Abb. 22 A). Wie t-Tests zum Vergleich von y-Achsenabschnitten und Steigungen der Häufigkeitsregressionen zeigten, ließen diese Beobachtungen keine Rückschlüsse auf signifikante Unterschiede zwischen den Längskrümmungen I/D-entfeuchteter und unbehandelter Kernbretter vor der technischen Endtrocknung zu (Abb. 22 B).

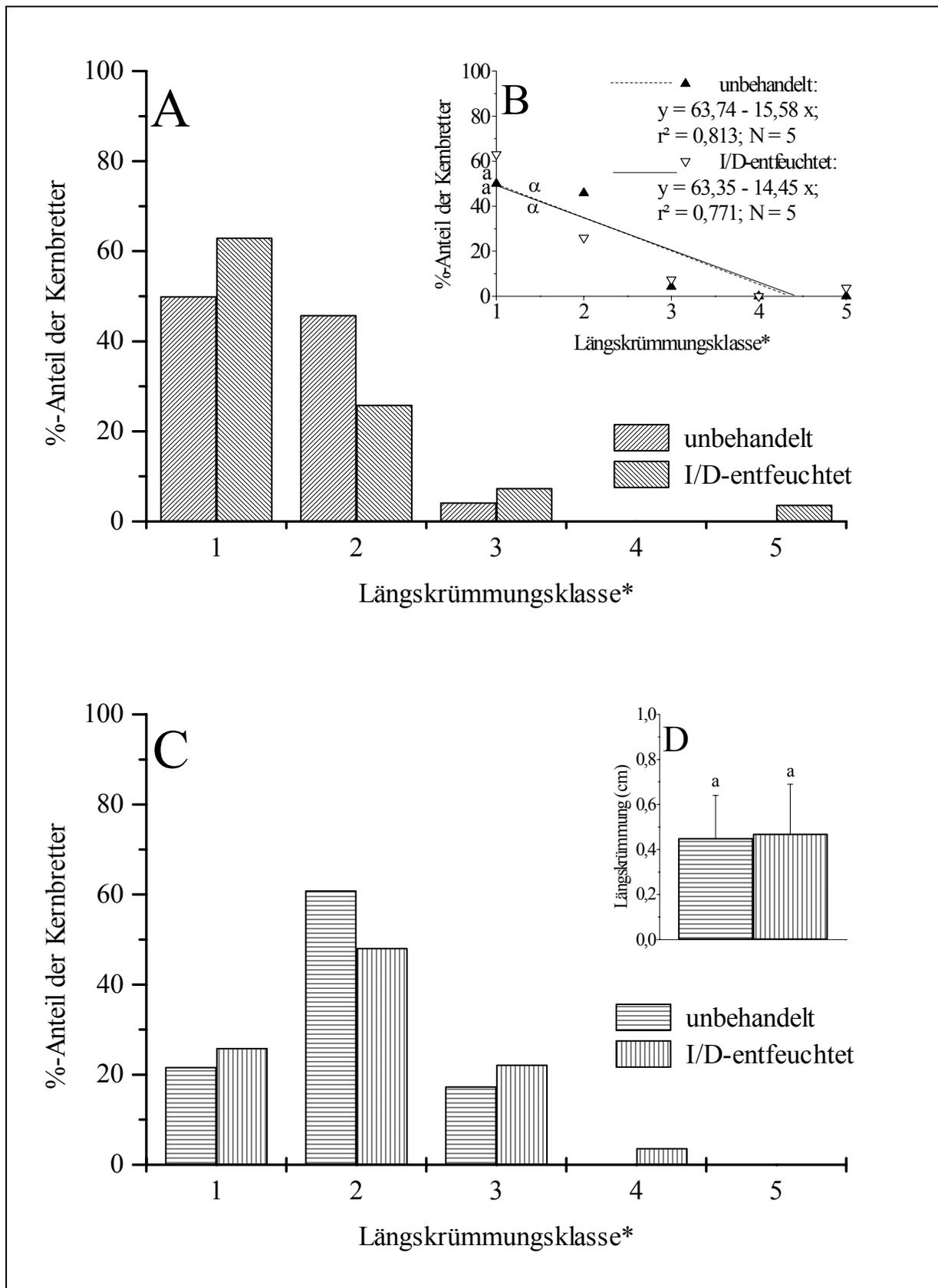
Nach der technischen Endtrocknung waren Kernbretter mit merklichen Längskrümmungen bis zu 0,6 cm am häufigsten. Die annähernd normal verteilten Längskrümmungen erreichten im Einzelfall bis zu 1,2 cm (Abb. 22 C). Im Mittel hatten sich I/D-entfeuchtete endtrockene Kernbretter um $0,47 \text{ cm} \pm 0,22 \text{ cm}$ und unbehandelte um $0,45 \text{ cm} \pm 0,19 \text{ cm}$ der Länge nach gebogen. Dementsprechend wies eine Varianzanalyse darauf hin, dass die mechanische Stammholzentfeuchtung offensichtlich keinen Einfluss auf die Längskrümmungen der endgetrockneten Kernbretter hatte (Abb. 22 D).

Legende zu Abb. 21 und Abb. 22: Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäemt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Die auf die Brettlänge bezogenen Längskrümmungen von insgesamt 110 Brettern wurden als Pfeilhöhen (cm) bestimmt (vgl. Kap. 2.3.4). Die Längskrümmungen wurden vor und nach der technischen Endtrocknung getrennt durch Varianzanalyse ausgewertet, wenn sie sich normal verteilten (Abb. 21 B,D, 22 D) und durch t-Tests linearer Häufigkeitsregressionen, wenn sie sich asymptotisch verteilten (Abb. 22 B). Wie die einheitlichen Indices der Mittelwerte (Abb. 21 B, D, 22 D) bzw. einheitlichen lateinischen Indices der y-Achsenabschnitte und griechischen Indices der Steigungen (Abb. 22 B) zeigen, ließen sich keine signifikanten Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Längskrümmungen von Brettern mit bzw. ohne I/D-Behandlung beobachten (vgl. Kap. 2.4).



* Längskrümmungsklasse (LKK) 1 Längskrümmung bis zu 0,3 cm / 2 m, LKK 2 bis zu 0,6 cm, LKK 3 bis zu 0,9 cm, LKK 4 bis zu 1,2 cm, RLK 5 bis zu 1,5 cm.

Abb. 21: Anteilmäßige Häufigkeit unterschiedlich stark längs gekrümmter Seitenwarebretter vor (A, B) und nach der technischen Endtrocknung (C, D).



* Längskrümmungsklasse (LKK) 1 Längskrümmung bis zu 0,3 cm / 2 m, LKK 2 bis zu 0,6 cm, LKK 3 bis zu 0,9 cm, LKK 4 bis zu 1,2 cm, RLK 5 bis zu 1,5 cm.

Abb. 22: Anteilmäßige Häufigkeit unterschiedlich stark längs gekrümmter Kernbretter vor (A, B) und nach der technischen Endtrocknung (C, D).

3.2.3.2 Querkrümmung

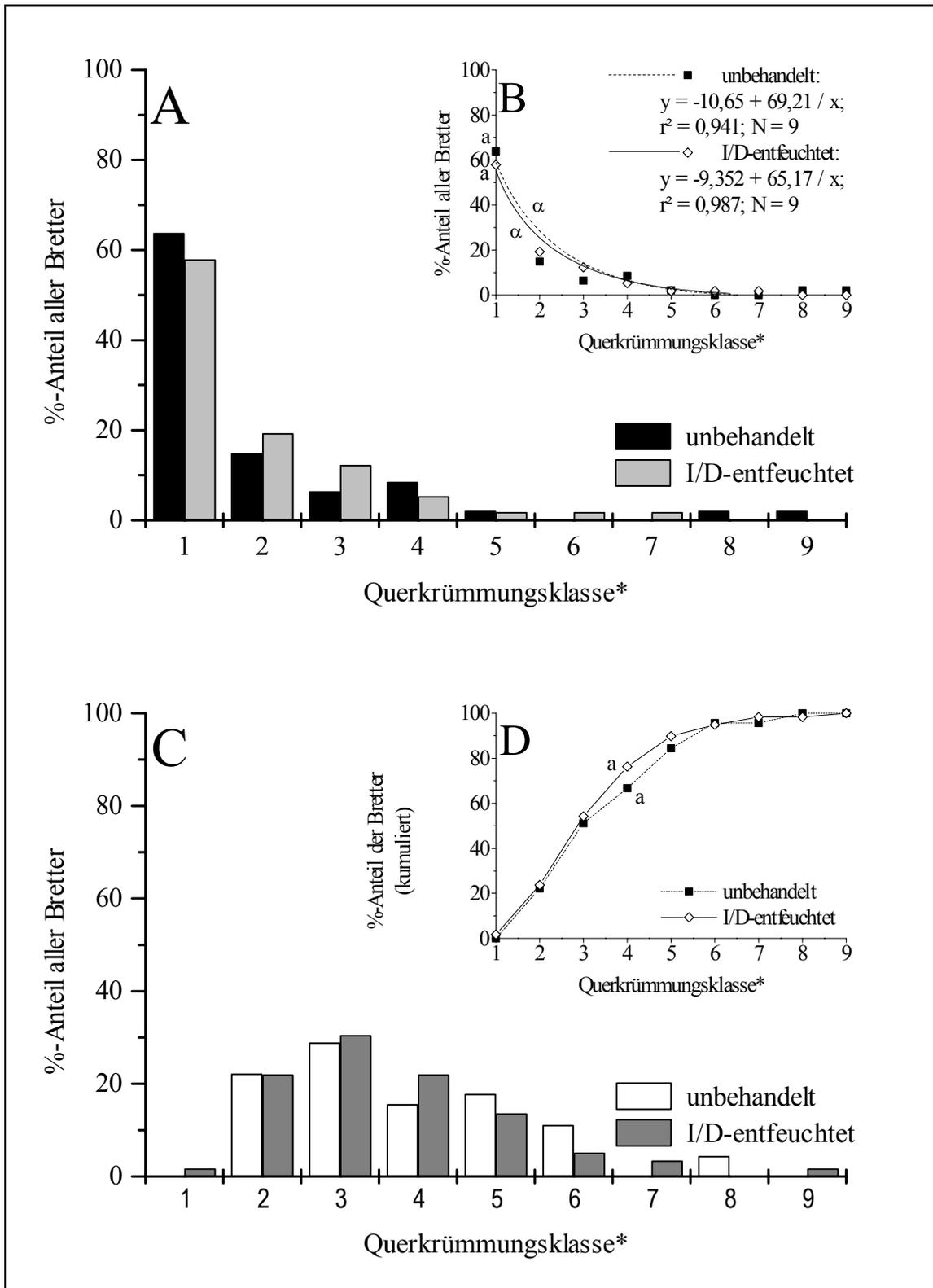
Alle Bretter wiesen mindestens geringe Querkrümmungen auf. Deshalb ließen sie sich nicht nach DIN 68 369 sortieren. Im Gegensatz dazu lässt die EN-Sortierung geringe Querkrümmungen zu, so dass sich die Bretter dieser Untersuchung zumindest vor der Kammertrocknung EN-Schnittholzklassen zuordnen ließen. Nach der technischen Endtrocknung wurden fast alle Bretter in die EN-Schnittholzklasse 4 eingewertet, so dass sich die Querkrümmung nicht mehr für eine Qualitätsdifferenzierung eignete (vgl. Kap. 2.3.4).

Entsprechend einer Vorauswertung unterschieden sich die Querkrümmungen der Seiten- und Kernbretter nicht deutlich voneinander. Andererseits hatten sich die Bretter nach der Endtrocknung signifikant stärker quer gekrümmt (vgl. Kap. 2.3.4; Abb. 12). Dementsprechend wurde der Einfluss der mechanischen Stammholzentfeuchtung auf die Schnittholzquerkrümmung nicht nach der Lage der Bretter im Stamm, sondern nur nach ihrem Trocknungszustand differenziert analysiert.

Vor der Endtrocknung wiesen die meisten Bretter lediglich geringe Querkrümmungen auf (Abb. 23 A). So waren ca. 60 % aller Bretter mit weniger als 0,3 cm nur gering quer zur Faserrichtung gebogen. Sehr große Querkrümmungen traten dagegen nur vereinzelt auf (Abb. 23 A).

Die y-Achsenabschnitte und Steigungen der Häufigkeitsregressionen von I/D-entfeuchteten und unbehandelten Brettern unterschieden sich vor der technischen Endtrocknung nicht signifikant voneinander (Abb. 23 B). Offensichtlich übte die I/D-Entfeuchtung vor der Kammertrocknung keinen bedeutenden Einfluss auf die Brettkrümmung quer zur Faserrichtung aus. Dementsprechend sortierten sich die unbehandelten und I/D-entfeuchteten Bretter nur gering unterschiedlich in die EN-Schnittholzklassen (Tab. 7).

Nach der technischen Endtrocknung hatten sich die Querkrümmungen deutlich verstärkt, so dass die Bretter am häufigsten ca. 0,6-0,9 cm gebogen waren (Abb. 23 C). Wie ein Kolmogorov-Smirnov-Test zeigte, ähnelten die kumulierten Querkrümmungsklassenhäufigkeiten I/D-behandelter und unbehandelter Bretter einander stark (Abb. 23 D). Dementsprechend kann nicht von einem Einfluss der mechanischen Stammholzentfeuchtung auf die Querkrümmung der kammergetrockneten Bretter ausgegangen werden.



* Querkrümmungsklasse (QKK) 1 Querkrümmung bis zu 0,3 cm / 2 m, QKK 2 bis zu 0,6 cm, QKK 3 bis zu 0,9 cm, QKK 4 bis zu 1,2 cm, QKK 5 bis zu 1,5 cm, QKK 6 bis zu 1,8 cm, QKK 7 bis zu 2,1 cm, QKK 8 bis zu 2,4 cm, QKK 9 bis zu 2,7 cm.

Abb. 23: Anteilmäßige Häufigkeit unterschiedlich stark quer gekrümmter Bretter vor (A, B) und nach der technischen Endtrocknung (C, D).

Legende Abb. 23: Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Die Querkrümmungen wurden von insgesamt 110 Brettern entsprechend Kap. 2.3.4 mit einem FRITS bestimmt. Die auf 2 m Brettbreite bezogenen Querkrümmungen wurden vor der technischen Endtrocknung durch Anpassung nicht linearer Regressionen mit t-Tests der Regressionskennwerte (Abb. 23 B) und nach der technischen Endtrocknung mit einem Kolmogorov-Smirnov-Test (Abb. 23 D) ausgewertet. Abb. 23 B: Einheitliche lateinische und griechische Indices weisen darauf hin, dass sich die y-Achsenabschnitte und Steigungen der beiden Regressionen nicht signifikant ($p \leq 0,05$) voneinander unterscheiden. Abb. 23 D: Einheitliche lateinische Indices weisen darauf hin, dass sich die kumulierten Häufigkeitskurven nicht signifikant ($p \leq 0,05$) voneinander unterscheiden.

Mechanische Stammholzentfeuchtung	%-Anteile an EN-Schnittholzklassen		
	1+2	3	4
ohne	57,4	8,5	34,0
mit	45,6	8,8	45,6

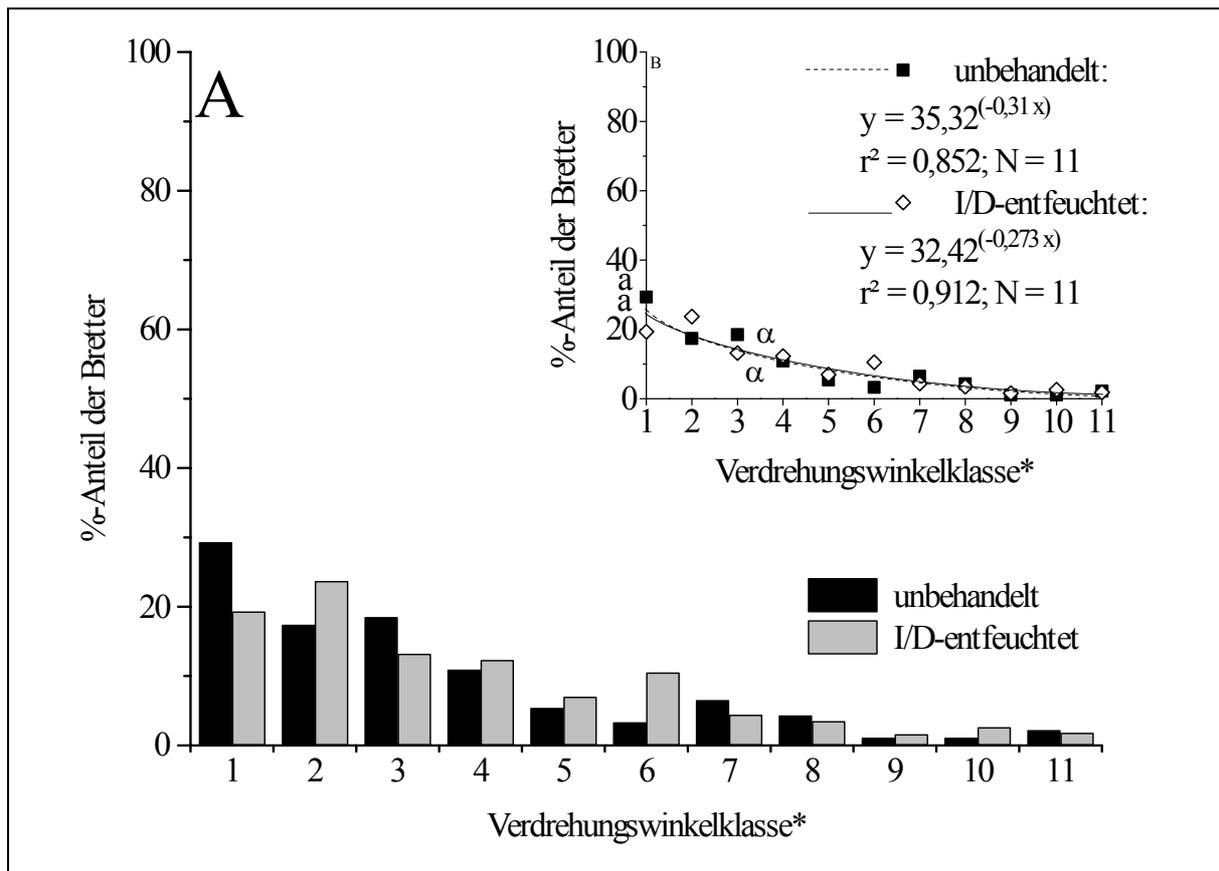
Tab. 7: %-Anteile der Bretter unbehandelter und I/D-entfeuchteter Buchenstämmen an den EN-Schnittholzklassen.

Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden vor der technischen Endtrocknung untersucht (vgl. Kap. 2.2.3). Insgesamt wurden 110 Bretter eingewertet. Alle Bretter wurden entsprechend ihren Querkrümmungen nach EN 975-1 4 Schnittholzklassen zugewiesen (EHLEBRACHT, 2000; vgl. Kap. 2.3.3).

3.2.3.3 Verdrehungswinkel

Entsprechend einer Voruntersuchung hatten weder die technische Endtrocknung noch die Lage der Bretter im Stamm einen merklichen Einfluss auf die Verdrehungswinkel (vgl. Kap. 2.3.4, Abb. 12). Deshalb wurden nur die Verdrehungswinkel nach der Kammertrocknung ausgewertet. Außerdem wurde nicht zwischen Seitenware- und Kernbrettern differenziert.

Über 2/3 aller Bretter wiesen lediglich kleine Verdrehungswinkel bis maximal 3° auf. Nur einzelne Bretter hatten Abweichungswinkel zwischen den beiden Stirnkanten von bis zu 12° ausgebildet (Abb. 24 A). Entsprechend der Häufigkeitsregression hatte die Stammholz-Vor-entfeuchtung keinen Einfluss auf die Verdrehungswinkel (Abb. 24 B).



* Verdrehungswinkelklasse (VWK) 1 $\alpha \leq 1^\circ$, 2 $\alpha \leq 2^\circ$, 3 $\alpha \leq 3^\circ$, 4 $\alpha \leq 4^\circ$, 5 $\alpha \leq 5^\circ$, 6 $\alpha \leq 6^\circ$, 7 $\alpha \leq 7^\circ$, 8 $\alpha \leq 8^\circ$, 9 $\alpha \leq 9^\circ$, 10 $\alpha \leq 10^\circ$, 11 $\alpha \leq 11^\circ$

Abb. 24: Anteilmäßige Häufigkeit der Bretter unterschiedlicher Verdrehungswinkel α .

Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämmen wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Die Verdrehungswinkel α von insgesamt 110 Brettern wurde entsprechend Kap. 2.3.4 mit einem FRITS bestimmt. Die Verdrehungswinkel wurden durch Anpassung nicht linearer Regressionen (Abb. 24 B) ausgewertet. Einheitliche lateinische und griechische Indices weisen darauf hin, dass sich die y-Achsenabschnitte und Steigungen der beiden Regressionen nicht signifikant ($p \leq 0,05$) voneinander unterscheiden.

3.2.3.4 Verdrehung

Wie eine Voruntersuchung gezeigt hatte, unterschieden sich die Verdrehungen von Kern- und Seitenwarebrettern sowie der Bretter vor bzw. nach der technischen Endtrocknung signifikant voneinander (vgl. Kap. 2.3.4; Abb. 12). Deshalb wurden die Bretter differenziert nach ihrer Herkunft im Stamm und ihrem Trocknungszustand analysiert. Eine Einwertung nach DIN 68 369 schien dagegen nicht sinnvoll, weil sich alle Bretter mindestens gering verdreht hatten (vgl. Kap. 2.3.4).

Die meisten Seitenware- und Kernbretter waren vor der Endtrocknung bis zu 3 cm und nach der Endtrocknung bis zu 4-5 cm verdreht (Abb. 24 A, C, 25 A, C). Die größten Verdrehungen wurden mit bis zu ca. 7,5 cm bei den endgetrockneten Kernbrettern beobachtet (Abb. 25 C).

Die Verdrehungen der Seitenwarebretter verteilten sich vor der technischen Endtrocknung normal auf den Bereich 0-6 cm (Abb. 24 A). Im Mittel waren die I/D-entfeuchteten Bretter mit ca. $2,7 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ um ca. 20 % weniger verdreht als die unbehandelten mit ca. $3,2 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ (Abb. 24 B). Entsprechend der Varianzanalyse unterschieden sich die I/D-entfeuchteten und unbehandelten Seitenwarebretter vor der technischen Endtrocknung aber nicht mit 95 %iger, sondern lediglich mit 90 %iger Wahrscheinlichkeit voneinander. Weil die meisten Verdrehungen die EN-Qualitäten 1 und 2 nicht ausschlossen, wirkte sich dieser Vorteil nicht auf die Qualitätssortierung der Seitenware vor der Kammertrocknung aus (Tab. 8).

Nach der technischen Endtrocknung waren die Seitenwarebretter bis zu 7 cm verdreht (Abb. 24 C). Entsprechend dem Kolmogorov-Smirnov-Test der nicht normal verteilten Verdrehungen dieser Bretter unterschieden sich I/D-entfeuchtete und unbehandelte Seitenwarebretter im endgetrockneten Zustand nicht mehr voneinander (Abb. 24 D). Dies zeigen auch die identischen EN-Qualitätssortierungsergebnisse (Tab. 8).

Auch die Verdrehungen der Kernbretter verteilten sich vor der Kammertrocknung nicht normal, sondern deutlich linksschief im Bereich bis zu 6 cm (Abb. 25 A). In diesem Fall wies der Kolmogorov-Smirnov-Test darauf hin, dass I/D-entfeuchtete und unbehandelte Bretter gleich stark verdreht waren. Dementsprechend entfielen sowohl bei unbehandelten als auch bei I/D-entfeuchteten ungetrockneten Kernbrettern um die 95 % auf die EN-Schnittholzklassen 1 und 2 (Tab. 8).

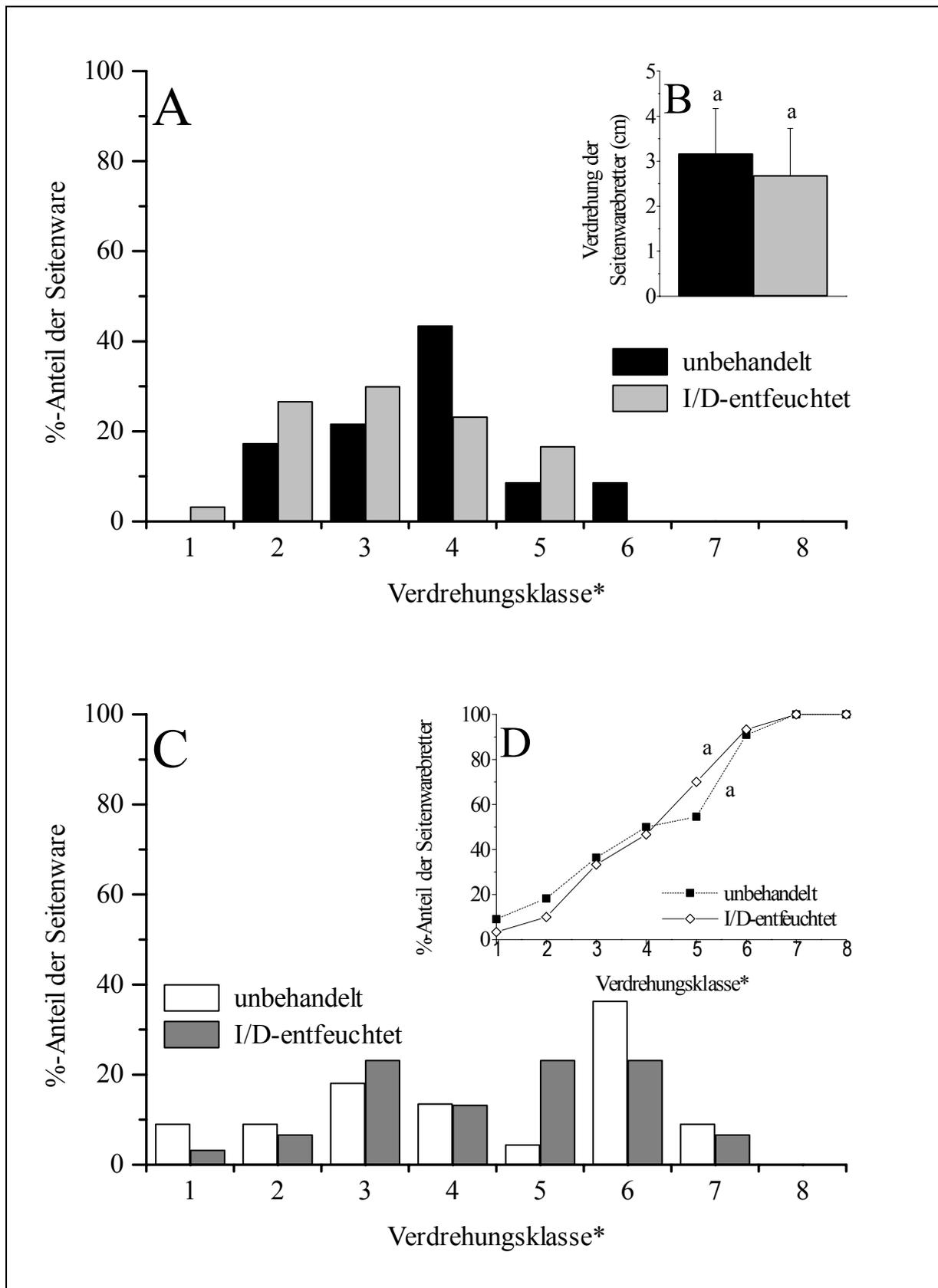
Wie bei der Seitenware hatten die Verdrehungen der Kernbretter nach der technischen Endtrocknung auf bis zu 8 cm zugenommen (Abb. 25 C). Die normalverteilten Verdrehungen wiesen im Durchschnitt für unbehandelte Kernbretter ca. $4 \text{ cm} \pm 1,6 \text{ cm}$, für I/D-entfeuchtete ca. $3,4 \text{ cm} \pm 1,9 \text{ cm}$ auf. Die tendenziell geringere Verdrehung I/D-entfeuchteter Kernbretter nach der Endtrocknung um ca. 10 % ließ sich jedoch nicht mit Sicherheit belegen (Abb. 25 D). Dennoch bewirkte sie bei der EN-Qualitätssortierung, dass 20 % mehr I/D-entfeuchtete als unbehandelte endgetrocknete Kernbretter den Schnittholzklasse 1 und 2 zugeordnet werden konnten (Tab. 8).

Lage der Bretter im Stamm	Trocknungs- zustand	I/D-Ent- feuchtung	% -Anteile der EN-Schnittholzklassen	
			1+2	3
Seiten- ware	vorge-	ohne	82,6	17,4
	trocknet	mit	83,3	16,7
	kammer-	ohne	50,0	50,0
	trocken	mit	50,0	50,0
Kern- bretter	vorge-	ohne	95,8	4,2
	trocknet	mit	92,9	7,1
	kammer-	ohne	47,8	52,2
	trocken	mit	67,9	32,1

Tab. 8: %-Anteile der Buchenbretter unbehandelter bzw. I/D-vorentfeuchteter Stämme an den EN-Schnittholzklassen.

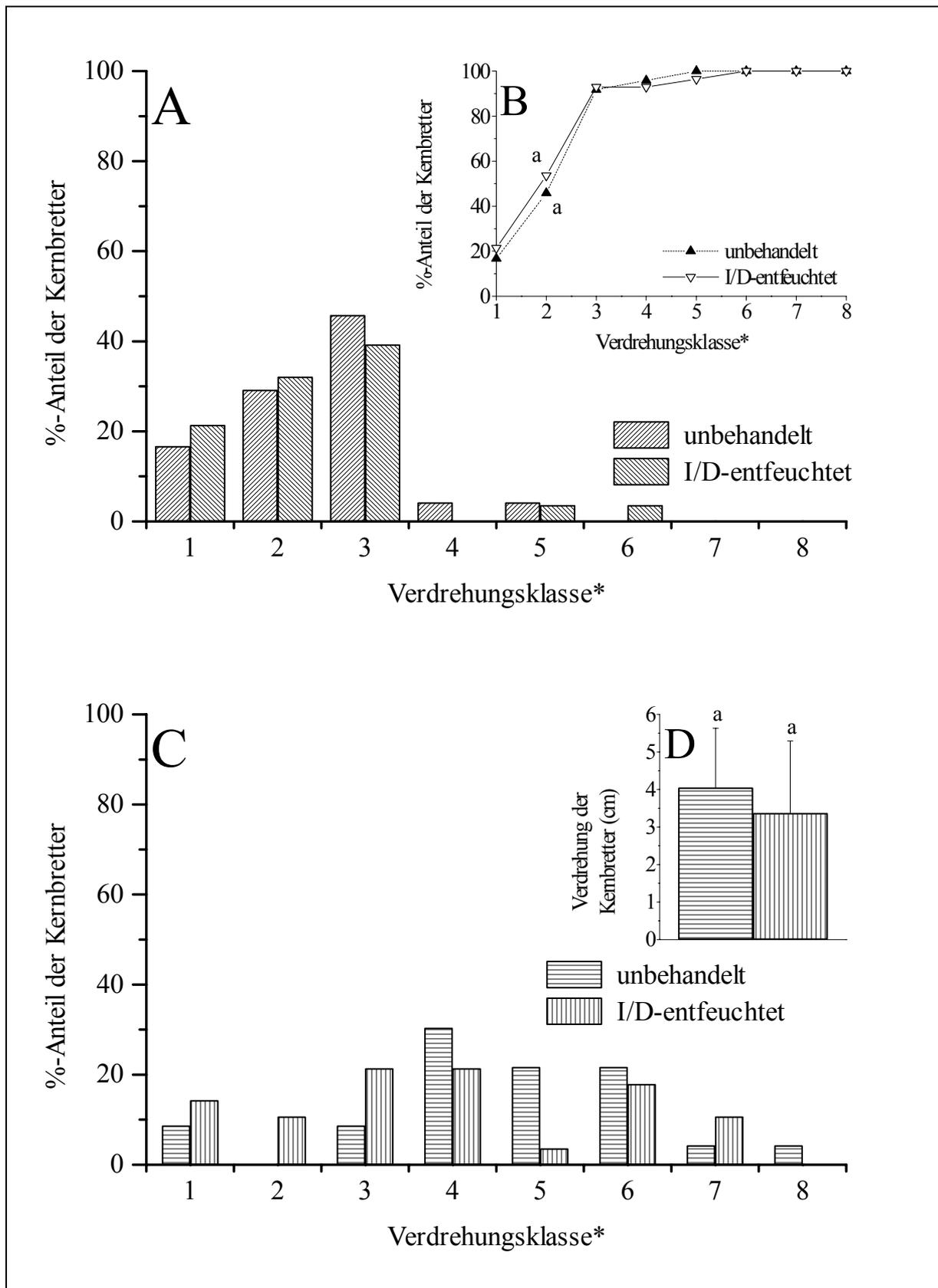
Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämme wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Insgesamt wurden 110 Bretter untersucht. Alle Bretter wurden entsprechend ihren Verdrehungen nach EN 975-1 in Schnittholzklassen eingewertet (EHLEBRACHT, 2000; vgl. Kap. 2.3.3).

Legende zu **Abb. 24** und **Abb. 25**: Die frischen bzw. entsprechend Kap. 2.2.1 mechanisch entfeuchteten Buchenstämme wurden eingeschnitten und besäumt (vgl. Kap. 2.2.2). Die Bretter wurden technisch endgetrocknet (vgl. Kap. 2.2.3). Die Verdrehungen wurden von insgesamt 110 Brettern mit einem FRITS als Pfeilhöhen bestimmt (vgl. Kap. 2.3.4). Die Verdrehungen wurden vor und nach der technischen Endtrocknung getrennt durch Varianzanalyse (Abb. 24 B; 25 D) bzw. Kolmogorov-Smirnov-Tests (Abb. 24 D, 25 B) ausgewertet. Wie die einheitlichen Indices zeigen, ließen sich keine signifikanten Unterschiede ($p \leq 0,05$) zwischen den Brettern I/D-vorentfeuchteter und unbehandelter Stämme beobachten.



* Verdrehungsklasse (VK) 1 Verdrehung bis zu 1 cm, VK 2 bis zu 2 cm, VK 3 bis zu 3 cm, VK 4 bis zu 4 cm, VK 5 bis zu 5 cm, VK 6 bis zu 6 cm, VK 7 bis zu 7 cm, VKK 8 bis zu 8 cm.

Abb. 24: Anteilmäßige Häufigkeit unterschiedlich stark verdrehter Seitenwarebretter vor (A, B) und nach der technischen Endtrocknung (C, D).



* Verdrehungsklasse (VK) 1 Verdrehung bis zu 1 cm, VK 2 bis zu 2 cm, VK 3 bis zu 3 cm, VK 4 bis zu 4 cm, VK 5 bis zu 5 cm, VK 6 bis zu 6 cm, VK 7 bis zu 7 cm, VKK 8 bis zu 8 cm.

Abb. 25: Anteilmäßige Häufigkeit unterschiedlich stark verdrehter Kernbretter vor (A, B) und nach der technischen Endtrocknung (C, D).

4 Diskussion

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, zu prüfen, ob sich das I/D-Verfahren zur mechanischen Stammholz-Vorentfeuchtung eignet, die Qualität von Buchenschnittholz aus schwachem Stammholz zu verbessern. Zu diesem Zweck wurden Ergebnisse über den Einfluss der I/D-Stammholzentfeuchtung auf die Holzfeuchteverteilung über den Stammquerschnitt (vgl. Kap. 3.1), die Längszugspannungen im Stamm (vgl. Kap. 3.2.1) sowie auf die Qualität des Schnittholzes dieser Stämme erarbeitet (vgl. Kap. 3.2.2 – 3.2.3). Die Ergebnisse werden im folgenden vergleichend zu veröffentlichten Erkenntnissen diskutiert.

4.1 Holzfeuchteverteilung im Stammholz

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden Xylemsaftwägung, elektrische Widerstandsmessung und Darrmethode als Verfahren zur Holzfeuchtebestimmung miteinander verglichen. Die elektrische Widerstandsmessung ergab bei Messungen oberhalb des Fasersättigungspunktes signifikant geringere Stammholzfeuchten als die Xylemsaftwägung, die wahrscheinlich die gleichen Ergebnisse wie die Darrmethode als Referenzverfahren lieferte (vgl. Kap. 3.1.1.1).

Mit diesen Ergebnissen übereinstimmend stellt GRAMMEL (1989) fest, dass sich die elektrische Widerstandsmessung nicht für die Holzfeuchtebestimmung oberhalb der Fasersättigung eignet. Er begründet dies ebenso wie QUER (1997) und EHLEBRACHT (2000) damit, dass der Ohm'sche Widerstand im Holz oberhalb der Fasersättigung bei wachsender Holzfeuchte nur noch wenig abnimmt.

Dementsprechend wurde die elektrische Widerstandsmessung als Methode für die Holzfeuchtebestimmung verworfen und stattdessen auf die Darrmethode zurückgegriffen. Diese Methode machte deutlich, dass es mit dem I/D-Verfahren gelungen ist, das Stammholz um über 10 % auf ca. 50 % Holzfeuchte vorzutrocknen (vgl. Kap. 2.2.1). STAHL (2000) und SCHILL und STAHL (1996) konnten Buchenholz bis auf ca. 50-55 % mechanisch vortrocknen und erreichten damit ähnliche Ergebnisse wie in der vorliegenden Untersuchung. Darüberhinaus zeigten die Autoren, dass sich das I/D-Verfahren zur mechanischen Vorentfeuchtung einiger anderer Holzarten eignet. So ließen sich Waldkiefern- (*Pinus sylvestris* L.) und Mont-

ereykiefernholz (*Pinus radiata* D. Don) bei 40 bar Inkubationsdrücken um 45-65 % auf bis zu 40 % und Fichtenholz (*Picea abies* (L.) Karst.) um 30-40 % auf 50-80 % Holzfeuchte entwässern (SCHILL und STAHL, 1996; KREBER *et al.*, 2001). Offensichtlich eignet sich das I/D-Verfahren grundsätzlich zur Holzfeuchteabsenkung. Allerdings wirft die Behandlung von ringporigen Holzarten wie beispielsweise Eichenholz (*Quercus spec.*) Probleme auf, weil sich nur der unverthyllte Splint vortrocknen lässt (SCHILL und STAHL, 1996).

Das I/D-Verfahren ermöglichte eine signifikante Stammholzvortrocknung innerhalb von 2 Tagen. Die Holzfeuchte nahm um ca. 5 % / Tag ab (vgl. Kap. 2.2.1). Ähnliche Ergebnisse berichten SCHILL und STAHL (1996) mit Entfeuchtungsgradienten von 0,8-2,2 % / h für Ahornrundholz (*Acer pseudoplatanus* L. und *A. platanooides* L.). Für Kiefernholz sieht STAHL (2000) die Trocknungsgeschwindigkeit gegenüber der herkömmlichen Lufttrocknung um ca. den Faktor 10 erhöht. Offensichtlich kann die mechanische Stammholzvortrocknung dazu beitragen, dass die Schnittholzgebrauchsfeuchte deutlich früher als üblich erreichbar wird.

Im Vergleich dazu erscheinen andere Verfahren zur Stammholzvortrocknung wesentlich weniger effektiv. So benötigt beispielsweise entrindetes, lagengepoltertes Fichtenstammholz 3-4 Monate, um bei einer täglichen Feuchteabnahme von ca. 0,4 % eine Zielfeuchte von 30-45 % zu erreichen (SCHUMACHER *et al.*, 1998; EISENBARTH und ENCKE, 2000). Bekronte Fichtenganzbäume waren selbst nach ca. 5 Monaten Lagerung im Bestand noch nicht merklich getrocknet (KLAIBER *et al.*, 2002).

Wie diese Untersuchung zeigte, schwanken die Holzfeuchten I/D-behandelter Stämme um ca. 1/3 weniger als bei unbehandelten Stämmen (vgl. Kap. 3.1.2). Abweichend von diesen Ergebnissen weisen SCHILL und STAHL (1996) darauf hin, dass Buchenkantholz kaum radiale Feuchtegradienten aufweist. Dennoch stellte auch STAHL (2000) eine radiale Vergleichmäßigung der Holzfeuchteverteilung in Buchenrundholz um ca. 30 % fest. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass sich die Stammholzvortrocknung vergleichmäßigend auf die Holzfeuchteverteilung auswirkt.

Auch die Feuchtigkeit anderer Holzarten lässt sich anscheinend effektiv durch die mechanische Stammholzvortrocknung vergleichmäßigen. So ließen sich radiale Holzfeuchtegradienten in Fichtenholz von 16-53 % vor der I/D-Entfeuchtung auf 3,5-4 % danach reduzieren (SCHILL und STAHL, 1996). Für Kiefernholz berichtet ZURLO (1995; zit. in SCHILL und STAHL, 1996) vom I/D-bedingten Rückgang der Holzfeuchtegradienten von 2,5 auf 1 % / cm und SCHILL und STAHL beobachteten 1996 eine Halbierung dieses Kennwertes durch die genannte Behandlung. Auch KREBER *et al.* (2001) erreichten mit 100 bar-Inkubationen von Monterey-

kiefern longitudinal ausgeglichene Holzfeuchten. Übereinstimmend sprechen alle Berichte davon, dass die Vergleichmäßigung der Holzfeuchteverteilung oberhalb der Fasersättigung dazu beitragen könnte, die Qualität der technischen Endtrocknung merklich zu erhöhen. Insbesondere für Buchenholz weisen SCHILL und STAHL (1996) darauf hin, dass die Feuchtegradienten ein Ursache für qualitätsmindernde Spannungen im Holz darstellen.

4.2 Längszugspannungen im Stammholz

Die Längszugspannungen riefen nach der Extensiometer-Bohrmethode (ARCHER, 1987 B) in den untersuchten Buchenstämmen Dehnungen von durchschnittlich 56 μm hervor (vgl. Kap. 3.2.1). FOURNIER *et al.* (1994) maßen mit derselben Methode an ca. 50 jährigen Buchen ähnliche Längszugdehnungen von ca. 20-80 μm . Vergleichbare Längszugdehnungen stellten die Autoren auch bei Edelkastanie (*Castanea sativa* L., 40-120 μm) und der tropischen Laubbaumart Walaba (*Eperua falcata*, 40-100 μm) fest. Andererseits weisen andere Laubbaumarten mitunter höhere Längszugdehnungen auf. So lagen die mit derselben Methode ermittelten Längszugdehnungen von Eukalyptushybriden einer unbekanntenen Provenienz (Klon PF 1(UAIC-CTFT Kongo)) und eines Pappelhybriden (*Populus x euamericana* cv I.214) nach FOURNIER *et al.* (1994) mit 40-120 μm bzw. 40 –80 μm zwar in einem ähnlichen Bereich, erreichten aber in anderen Untersuchungen mit durchschnittlich ca. 90 μm (Eukalyptushybride) und durchschnittlich bis zu 200 μm (Pappelhybride) doppelt bis vierfach so große Längszugdehnungen (CASTÉRA, *et al.*, 1994; BAILLIÈRES *et al.*, 1995; GRZESKOWIAK *et al.*, 1996). Im Gegensatz dazu zählt KUBLER (1987) die Buche neben den Eukalyptusarten zu den spannungsreichsten Baumarten. Allerdings zeigen OKUYAMA *et al.* (1994) am Beispiel von 7 Laubbaumarten der nordamerikanischen Ostküste, dass die Längszugspannungen nur zum Teil baumartenspezifisch sind. Die Autoren weisen auf andere wichtige Einflussgrößen wie Zelluloseanteil und –kristallisation sowie Längsneigung der Mikrofibrillen hin.

Zwischen den Längszugspannungen I/D-entfeuchteter und unbehandelter Buchenstämmen lassen sich keine Unterschiede nachweisen, obgleich die Stämme signifikant unterschiedliche Feuchten und Feuchtegradienten aufwiesen (vgl. Kap. 3.1.2, 3.2.1). Vielmehr waren alle Stämme unabhängig von der I/D-Behandlung nach der Entspannung um durchschnittlich 56 μm bei ähnlichen Streuungen gedehnt (vgl. Kap. 3.2.1). Offensichtlich übten weder Holz-

feuchte noch Holzfeuchteverteilung einen merklichen Einfluss auf die Längszugspannungen aus. Dementsprechend lassen sich die Spannungen nicht mit dem Schwinden des Holzes infolge Wasserverlust, sondern eher mit den wachstumsbedingten Holzspannungen in Verbindung bringen (MAYER-WEGELIN, 1955). Diese Spannungen werden dadurch hervorgerufen, dass sich die ausreifenden Holzfasern gegen den Druck ausgereifter Zellen im Stamminnern längs kontrahieren. Dies wirkt sich über den Stammquerschnitt in einem Stamminnendruck und –außenzug aus (KUBLER, 1987).

4.3 **Schnittholzrisse**

Vor der technischen Endtrocknung waren 80-90 % der Bretter frei von Rissen oder wiesen lediglich kürzere Risse bis 50 cm Gesamtlänge auf (vgl. Kap. 3.2.2.1). Anscheinend gehört die Rissbildung nicht zu den schwerwiegenden Qualitätsproblemen von fasergesättigtem Buchenschnittholz. Damit übereinstimmend konnte EHLEBRACHT (2000, 2001) an ungetrocknetem Schnittholz aus schwachen Buchenstämmen überhaupt keine Risse beobachten. Wie QUER (1997) zeigte, trifft diese Beobachtung auch für Eschenschnittholz zu.

Die Kernbretter waren signifikant stärker als die Seitenbretter gerissen (vgl. Kap. 3.2.2.1). Die gleiche Beobachtung machten QUER (1997) bei Eschen-, KÄRKI (2002) bei Zitterpappel- (*Populus tremula* L.) sowie SANDBERG (1997) bei Fichten- und Waldkiefern Schnittholz. Dies wird zum Teil mit der zum Mark hin zunehmenden Faserneigung und Jahrringkrümmung (PERSTORPER *et al.*, 2001), zum Teil durch Wachstumsspannungen (ARCHER, 1987 A) erklärt.

Seitenbretter I/D-behandelter Stämme waren vor der Kammertrocknung signifikant öfter rissfrei bzw. hatten signifikant kürzere Risse als Seitenbretter unbehandelter Stämme (vgl. Kap. 3.2.2.1). Auf den Kernbrettern I/D-behandelter Stämme blieben die Risse vor der Endtrocknung signifikant öfter geschlossen bzw. öffneten sich nicht so weit wie auf Kernbrettern unbehandelter Stämme (vgl. Kap. 3.2.2.2). Offensichtlich hat die I/D-Entfeuchtung dazu beigetragen, oberhalb der Fasersättigung Holzspannungen durch ungleich verteilte Holzfeuchte abzubauen. Die Holzspannungen durch ungleich verteilte Holzfeuchte ruft bei der Trocknung aufgrund der Anisotropie des Holzes kleinräumig ungleichmäßige Volumenänderungen her-

vor (HALE, 1957, BRUNNER, 1987). Dieser Effekt verstärkt sich dadurch, dass Buchenholz schon bei weniger als 80 % Holzfeuchte merklich zu schwinden beginnt (BARISKA, 1966).

In ähnlicher Weise sehen SVENSSON und MÄRTENSSON (2002) Holzfeuchtegradienten zwischen Kern und Splint als Ursache für Holzspannungen in Nadelhölzern. Auch KÄRKI (2002) weist darauf hin, dass solche Spannungen zu Schrittholzrissen führen können.

Auf den trockenen Buchenbrettern ließen sich mehr und längere Risse als auf den frischen Buchenbrettern beobachten (vgl. Kap. 3.2.2.1). In ähnlicher Weise stellt QUER (1997) fest, dass getrocknetes Eschenschnittholz häufiger als frisches gerissen ist. RICHTER und SELL (1995) machten bei Nadel-Bauholz (Fichte und Tanne) die gleiche Beobachtung. Nach KEYLWERTH (1966) entstehen solche Risse im Verlaufe der technischen Trocknung durch Zugspannungen im Holz, die von Holzfeuchtegradienten induziert werden. Die Zugspannungen entstehen demzufolge letztendlich dadurch, dass die Oberflächenschichten des Holzes zuerst die Fasersättigung unterschreiten und verstärkt schwinden, während sie durch die feuchten Holzschichten darunter abgesperrt sind (BRUNNER, 1987). Im Gegensatz dazu war das von EHLEBRACHT (2001) untersuchte Buchenschnittholz aus schwachem Stammholz selbst im getrockneten Zustand frei von Rissen.

Die Risse von trockenen Brettern I/D-behandelter und unbehandelter Stämme unterschieden sich in der Regel nicht mehr signifikant voneinander. Die trockenen Seitenbretter I/D-entfeuchteter Stämme waren jedoch signifikant öfter und länger gerissen als die unbehandelten Stämme (vgl. Kap. 3.2.2.1). Anscheinend wirkte sich die gleichmäßige Holzfeuchteverteilung vor der Kammertrocknung nicht positiv auf die Risse der getrockneten Bretter aus. Demgegenüber erhofften sich SCHILL und STAHL (1996) von vergleichmäßigten Holzfeuchten oberhalb der Fasersättigung eine gute Ausgangssituation für eine weitere thermische Trocknung. Andererseits konnten FRÜHWALD und STAHL (1999) übereinstimmend mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung keine signifikante Verbesserung der Trocknungseigenschaften von I/D-entfeuchtetem Fichtenholz feststellen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung deuten an, dass die Rissentstehung im getrockneten Buchenschnittholz weniger von der Holzfeuchteverteilung als vielmehr von holz-immanenten Bestimmungsgründen abhängt. Die Buchenbretter dürften eher entsprechend der Anisotropie des Holzes gerissen sein. Als Anisotropie wird die „Verschiedenartigkeit der Holzeigenschaften in den verschiedenen Schnittebenen als Folge (...) des strukturellen Feinbaus der Zellen“ bezeichnet (GRAMMEL, 1989). Insbesondere verlaufen die Mikrofibrillenbündel der S₂-Zellwandschicht von Holzzellen genetisch bedingt eher parallel zu Tangential-

als zu Radialzellwänden. Deshalb schrumpfen die Tangentialwände stärker als die Radialwände, wenn der Wassergehalt sinkt (GU *et al.*, 2001; BEAULIEU *et al.*, 2002). Dies führt zu Spannungen, die bei der Holz Trocknung unterhalb der Fasersättigung Risse hervorrufen können (NEČESANÝ, 1966).

Wie die überproportionale Zunahme der Risslängen auf Schnittholz I/D-entfeuchteter Stämme im Vergleich zu unbehandelten Kontrollen andeutet, könnte einer an den Feuchtezustand des Schnittholzes angepassten Trocknungstechnik eine große Bedeutung für die Trocknungsqualität zukommen. Damit übereinstimmend sieht KÄRKI (2002) einen ausschlaggebenden Einfluss der Trocknungstechnik auf die Qualität von getrocknetem Zitterpappelschnittholz (*Populus tremula* L.). Die Trocknungstechnik bestimmt das Holzfeuchtegefälle, das für die Trocknungsspannungen ausschlaggebend ist (BRUNNER, 1987). Vor diesem Hintergrund spricht EHLEBRACHT (2000, 2001) von der Vakuumtrocknung im Vergleich zur Konvektionstrocknung, wie sie in dieser Untersuchung angewandt wurde, als schonender Technik. Andererseits konnten BEAULIEU *et al.* (2002) für Weißfichtenbretter (*Picea glauca* (Moench) Voss) keinen Zusammenhang zwischen Trocknungstechnik und Schnittholzqualität erkennen.

4.4 Schnittholzverformungen

Die meisten Buchenbretter dieser Untersuchung wiesen schon vor der technischen Endtrocknung Längskrümmungen bis zu 1 cm / 2 m auf, während längskrümmungsfreie Bretter sehr selten waren (vgl. Kap. 3.2.3.1). Damit übereinstimmend beobachtete auch EHLEBRACHT (2000) auf fast allen Buchenbrettern und QUER (1997) auf fast allen Eschenbrettern Längskrümmungen der Breitseiten. Zum gleichen Ergebnis kommt KÄRKI (2002) für besäumte Zitterpappelbretter. Offensichtlich gehören Längskrümmungen zu den verbreiteten Qualitätsproblemen von Laubschnittholz.

Zumindest die ungetrockneten Seitenbretter I/D-behandelter Stämme waren wahrscheinlich um ca. 25 % weniger der Länge nach gebogen als diejenigen der unbehandelten Stämme (vgl. Kap. 3.2.3.1). Anscheinend hatte die einheitliche Holzfeuchte die Längskrümmung der Seitenbretter verkleinert. Demgegenüber beobachteten KLAIBER und SEELING (2002) keinen Einfluss der Stammholzvortrocknung auf die Längskrümmung von Fichtenschnittholz, obwohl die Vorbehandlung zur Vergleichmäßigung der Holzfeuchte beigetragen hatte.

Auch nach der technischen Endtrocknung ließen sich in Übereinstimmungen mit den Erkenntnissen EHLEBRACHTS (2000) an Buchen und QUERS (1997) an Eschenschnittholz an fast allen Brettern Längskrümmungen beobachten. Deren Ausmaße hatten aber nicht trockenungsbedingt zugenommen (vgl. Kap. 3.2.3.1). Zum gleichen Ergebnis kommt EHLEBRACHT (2000, 2001) für vakuumgetrocknetes Buchenschnittholz. Offensichtlich übt die Kammertrocknung keinen bestimmenden Einfluss auf die Längskrümmung von Buchenschnittholz aus. Damit übereinstimmend stellt DANVIND (2002) auch bei Fichten fest, dass die trockenungsbedingte Schnittholzlängskrümmung nicht mit der Holzfeuchte zusammenhängt. Vielmehr verweist ÖHMAN (1999) in diesem Zusammenhang auf die Bedeutung des Druckholzes für die Schnittholzlängskrümmung. Für diese Baumart steht fest, dass sich Schnittholz umso stärker der Länge nach verbiegt, je größer sein Druckholzanteil ist (BERNHART, 1965; SANDBERG, 1997). Vergleichbare Erkenntnisse liegen für Laubhölzer jedoch nicht vor.

Nach der Kammertrocknung unterschieden sich die Längskrümmungen der Bretter I/D-entfeuchteter und unbehandelter Stämme nicht voneinander (vgl. Kap. 3.2.3.1). Dies weist darauf hin, dass die Längskrümmungen wie die Risse weniger von der Holzfeuchte und den Trocknungsbedingungen als vielmehr von der inneren Holzstruktur abhängen (s. o.).

Querkrümmungen ließen sich auf den Buchenbrettern vor der technischen Endtrocknung anders als Längskrümmungen nur in geringem Umfang beobachten. Die meisten Bretter wiesen lediglich geringe Querkrümmungen von unter 0,3 cm / 2 m auf (vgl. Kap. 3.2.3.2). In ähnlicher Weise stellt EHLEBRACHT (2000, 2001) Querkrümmungen nur an ca. 40 % des von ihm untersuchten, nicht getrockneten Buchenschnittholzes fest. SANDBERG (1997) findet besonders dann Querkrümmungen auf den Brettern von Waldkiefern und Fichten, wenn die Jahrringe in den Brettern aufgrund kleiner Radien stark gebogen sind. Andererseits ließen sich die Querkrümmungen in der vorliegenden Untersuchung nicht nach der Herkunft der Bretter aus Stammzentrum (stark gebogene Jahrringe) oder –mantel (wenig gebogene Jahrringe) differenzieren.

Nach der technischen Endtrocknung hatten die Querkrümmungen der Bretter dieser Untersuchung deutlich auf 0,6-0,9 cm / 2 m zugenommen (vgl. Kap. 3.2.3.2). Auch EHLEBRACHT (2000, 2001) zeigte, dass sich nach Vakuumtrocknung nicht nur der Anteil der quergekrümmten Buchenbretter, sondern auch die durchschnittliche Querkrümmung ungefähr verdoppelt hatten. Dies weist darauf hin, dass die Querkrümmung von Buchenschnittholz offensichtlich mit der Holzfeuchte zusammenhängt. Für Fichten- und Waldkiefern Schnittholz er-

klärt SANDBERG (1997) die gleiche Beobachtung mit der Anisotropie des Holzes, d. h. dass Holz beim Trocknen in tangentialer Richtung stärker als in radialer schwindet (HALE, 1957).

Weder vor noch nach der Kammertrocknung ließ sich in der vorliegenden Untersuchung ein Einfluss der mechanischen Stammholzvortrocknung auf die Querkrümmungen der Buchenbretter feststellen (vgl. Kap. 3.2.3.2). Dies stimmt mit der Schlussfolgerung überein, dass Schnittholzquerkrümmungen nicht von der Holzfeuchteverteilung, sondern von der Anisotropie der Holzzellen und der Holzfeuchte abhängen.

Nach der technischen Endtrocknung wiesen über 2/3 aller untersuchten Buchenbretter Verdrehungswinkel von unter 3 ° auf (vgl. Kap. 3.2.3.3). Von KLAIBER und SEELING (2002) untersuchtes kammertrockenes Fichtenkantholz hatte sich mit durchschnittlich 4,5-6,9 ° etwas stärker verdreht. Das von KLAIBER und SEELING untersuchte Holz war nach unterschiedlichen Stammholzvortrocknungsstrategien eingeschnitten und technisch endgetrocknet worden. Obwohl die Vortrocknung in Krone die Holzfeuchte wesentlich gleichmäßigte hatte, übte dies keinen signifikanten Einfluss auf die Kanthölzer aus. Damit übereinstimmend waren Buchenbretter aus I/D-entfeuchteten bzw. unbehandelten Stämmen um die gleichen Winkel verdreht. Anscheinend hängt dieser Kennwert nicht mit der Holzfeuchteverteilung im Holz zusammen.

Vor der Kammertrocknung hatten sich die meisten Seitenbretter bei einem Mittelwert von ca. 2,9 cm / 2 m bis zu 4 cm / 2 m und die meisten Kernbretter bis zu 3 cm / 2 m verdreht (vgl. Kap. 3.2.3.4). Diese Werte liegen um den Faktor 10 höher als bei EHLEBRACHT (2000), dessen Buchenbretter aus schwachem Stammholz lediglich um ca. 0,25 cm / 2 m und dessen Eichenbretter nur um 0,08 cm / 2 m oberhalb der Fasersättigung verdreht waren. Anscheinend lassen sich zwischen unterschiedlichen Buchen sehr verschiedene Verdrehungen beobachten. Während der bestimmende Einfluss des Druckholzanteils auf die Verdrehung von Nadelholzbrettern mehrfach belegt ist, ist bisher nicht bekannt, warum sich Laubholzbretter verdrehen (SANDBERG, 1997; ÖHMAN, 1999; PERSTORPER *et al.*, 2001; JOHANSSON *et al.*, 2001; DONALDSON und TURNER, 2001).

Nach der technischen Endtrocknung hatten die Verdrehungen der Seitenbretter um ca. 30 % und der Kernbretter um ca. 60 % zugenommen (vgl. Kap. 3.2.3.4). Damit übereinstimmend beobachtete EHLEBRACHT (2000), dass sich die Verdrehung von Buchenschnittholz unterhalb der Fasersättigung etwa verdoppelte und von Eichenschnittholz verdreifachte. Bei Eschenschnittholz wies QUER (1997) auf eine leichte Zunahme der Verdrehung mit der Trocknung um ca. 30 % hin. Nach KLAIBER und SEELING (2002) verdreht sich auch Fichtenschnittholz durch die Kammertrocknung. Offensichtlich hängt die Verdrehung von der Holzfeuchte

und/oder den Trocknungsbedingungen ab. Darauf weisen JOHANSSON *et al.* (2001) für Fichtenholz hin. Demgegenüber sieht ÖHMAN (1999) keinen Zusammenhang zwischen den Trocknungsbedingungen und der Verdrehung von Fichtenschnittholz. Damit übereinstimmend haben sich konvektionsgetrocknete Eschenbretter nicht stärker als vakuumgetrocknete verdreht (QUER,1997). Dementsprechend scheint die Verdrehung des Schnittholzes nicht von den Trocknungsbedingungen, sondern eher von der Holzfeuchte abzuhängen.

Die I/D-Vorentfeuchtung hat wahrscheinlich die Verdrehung der Seitenbretter vor und der Kernbretter nach der Kammertrocknung reduziert. Dies deutet an, dass die Verdrehung zwar von der Anisotropie des Holzes bestimmt wird, der Holzfeuchtegradient aber dennoch einen Einfluss ausübt. Dieser Anschauung entsprechend verdreht sich Schnittholz besonders stark, wenn seine Anisotropiespannungen durch kleinräumig ungleichmäßige Holzfeuchten verstärkt werden. Andererseits hat sich Fichtenschnittholz auch dann nicht weniger verdreht, wenn es aufgrund einer Stammholzvortrocknung ausgeglichene Holzfeuchtegradienten aufwies (KLAIBER und SEELING, 2002).

4.5 Qualitätssortierung

Die Buchenbretter ließen sich in der vorliegenden Studie wirksam anhand ihrer Risse in DIN-Güte- bzw. EN-Schnittholzklassen sortieren (vgl. Kap. 3.2.2.1). Offensichtlich bildeten die Schnittholzrisse in dieser Studie ein wichtiges Sortiermerkmal. Auf die besondere Bedeutung der Risse beim Einschnitt von schwachem Laubholz, darunter auch Buchen weisen FISCHER und JOCHUM (1996) hin. Im Gegensatz dazu kam den Rissen in der Untersuchung von EHLEBRACHT (2000) keine Bedeutung zu, weil das von ihm untersuchte Buchenschnittholz nicht gerissen war. Andererseits definierte QUER (1997) in seinem Sortiervorschlag auch für Eschenschnittholz Risse als sortierwirksames Merkmal und EHLEBRACHT und BLEILE (2000) beurteilen die Rissbildung als häufigsten Fehler von trockenen Brettern aus schwachem Eichenstammholz. Vor diesem Hintergrund dürfte es sinnvoll sein, Schnittholzrisse als Qualitätskriterium von Laubschnittholz zu berücksichtigen.

Die I/D-Entfeuchtung wirkte sich günstig auf die Qualität des Buchenschnittholzes aus. So lag der DIN-Güteklasse I- bzw. EN-Güteklassen 1+2-Anteil kammertrockener Seitenware I/D-vorentfeuchteter Stämme im Vergleich zu den herkömmlich verarbeiteten Brettern jeweils um

ca. 13 % höher (vgl. Kap. 3.2.2.1). Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Stammholzvorentfeuchtung nach dem I/D-Verfahren einen wichtigen Bestimmungsgrund der Schnittholzqualität besonders im Hinblick auf die Verwendung von schwachem Stammholz merklich verbessert hat.

Die I/D-Entfeuchtung hat besonders die Risse der Seitenbretter verringert (vgl. Kap. 3.2.2.1). Die Seitenware bildet in der Regel die wertvollsten Buchenschnittholzsortimente (Holly, 2000, mündl. Mitt.). Dies wird besonders bei Schnittholz aus stärkerem Stammholz deutlich. Aber auch im vorliegenden Fall dürfte sich der rissreduzierende I/D-Einfluss auf die Stammholzwertschöpfung vorteilhaft auswirken (vgl. Kap. 4.6). Demgegenüber dürfte weniger von Bedeutung sein, dass die I/D-Behandlung kaum Einfluss auf die risslängenbedingte Güteklassenverteilung der kammertrocknen Kernbretter hat (vgl. Kap. 3.2.2.1, 4.6).

Die Längskrümmungsgrenzwerte der DIN- und EN-Normen für die Güteklasse I bzw. Schnittholzklassen 1+2 wurden selbst nach der Kammertrocknung nicht überschritten (vgl. Kap. 3.2.3.1). Andererseits entsprach keine Querkrümmung der kammertrockenen Bretter den DIN- oder EN-Güteanforderungen (vgl. Kap. 3.2.3.2). Dementsprechend hatte die I/D-Behandlung hinsichtlich dieser beiden Kennwerte keinen sortierwirksamen Einfluss auf die Bretter. Im Gegensatz dazu ließen sich gegenüber unbehandelten Stämmen ca. 20 % mehr kammertrockene Kernbretter I/D-entfeuchteter Stämme entsprechend ihren Verdrehungen in die EN-Güteklassen 1+2 sortieren (vgl. Kap. Kap. 3.2.3.4). Dies deutet an, dass die I/D-Behandlung verformungsbedingten Qualitätsmängeln mindestens teilweise sortierwirksam entgegenwirken kann.

Neben Rissen kommen Schnittholzverformungen gerade bei der Verwendung von schwachem Laubstammholz vor. Beispielsweise zeigten über 26 % der untersuchten Eichenbretter aus schwachem Stammholz in einer Studie von EHLEBRACHT und BLEILE (2000) erhebliche Längskrümmungen, fast 56 % erhebliche Querkrümmungen und ca. 38 % erhebliche Verdrehungen. FISCHER und JOCHUM (1996) wiesen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass den Trocknungsverformungen bei Schnittholz aus Buche, Esche und Ahorn besonders dann eine große Bedeutung zukommt, wenn schwaches Stammholz das Ausgangsmaterial bildet. Andererseits definierte QUER (1997) solche Fehler in seinem Sortiervorschlag für Eschenschnittholz nicht als sortierwirksames Merkmal.

Nach der EU-Norm reicht es für eine Qualitätsabstufung von Buchenschnittholz aus, wenn ein Brett eine Qualitätsanforderung nicht erfüllt. Ähnliches gilt für die DIN-Norm. In der vorliegenden Untersuchung waren alle Bretter stärker als nach diesen Sortiervorschriften zulässig

quergekrümmt (vgl. Kap. 3.2.3.2). Dementsprechend ließ sich bei synthetischer Betrachtung kein Brett entsprechend den Sortiervorschriften qualitativ einstufen. Dies führt nach EHLEBRACHT (2000) beispielsweise dazu, dass solches Schnittholz lediglich als Palettenholz weiterverwendet werden kann. Davon abgesehen hat die vorliegende Studie jedoch gezeigt, dass die mechanische Stammholzentfeuchtung die Schnittholzqualität durch die Reduktion von Rissen und Verdrehungen merklich verbessert hat. Dies bestätigt die Anschauung SCHILLS und STAHL (1996), derzufolge I/D-bedingt geringere Holzfeuchtegradienten eine wichtige Voraussetzung für eine höhere Trocknungsqualität darstellen könnten.

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Buchenschnittholz entsprechend der DIN 68 369 bzw. EN 975-1 sortiert. Diese Normen beziehen sich auf die Sortierung von Blockware, bei der die Qualitätsmerkmale nicht brettweise, sondern für ganze Blöcke bestimmt werden, so dass sich Fehler und Qualitäten über mehrere Bretter hinweg ausgleichen können. Weil die Brettqualitäten in dieser Untersuchung nicht ausgeglichen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der I/D-Entfeuchtung auf die Schnittholzqualität bei Vernachlässigung der Querkrümmung unterschätzt wurde. Offensichtlich geht vom Verfahren zur mechanischen Stammholzentfeuchtung ein merkliches Potenzial zur Verbesserung der Qualität technisch getrockneten Schnittholzes aus.

4.6 Ökonomische Betrachtung

Einerseits dürfte die I/D-Entfeuchtung eine merkliche Qualitätsverbesserung von Schnittware aus schwachem Buchenstammholz erwarten lassen, andererseits setzt sie beträchtliche Investitionen voraus (STAHL, 1999). Weil dies einschneidende Folgen für die betriebliche Kostenstruktur haben kann, muss neben Risiko und sonstigen Investitionswirkungen die Wirtschaftlichkeit der I/D-Entfeuchtung geschätzt werden (SPEIDEL, 1984).

Während das wesentliche Risiko der I/D-Technik in einer fehlerhaften Beurteilung seiner Leistungsfähigkeit gesehen werden kann, könnte dieses Verfahren zusätzlichen Nutzen durch die Weiterverwendung des anfallenden Xylemsaftes bringen (CSÖGÖR und POSTEN, 2001). Um die Wirtschaftlichkeit der neuen Technik zu schätzen, eignet sich unter anderem die „Gewinnvergleichsrechnung“, bei der die Gewinne von Buchenschnittware aus herkömmlicher Produktion und aus I/D-entfeuchteten Stämmen miteinander verglichen werden. Als Ge-

winne gelten in diesem Zusammenhang die Erlöse abzüglich der verfahrensbedingten Kosten (SPEIDEL, 1984). Die Schnittholzproduktion wird bei 60 %iger Ausbeute jeweils auf 1 m³ schwaches Buchenstammholz bezogen, wie es in dieser Studie untersucht wurde (vgl. Kap. 2.1).

Die Erlöse für Buchenschnittholz setzen sich aus einem Anteil für die Seitenware und einem Anteil für die Ware aus dem Kernbereich des Stammes zusammen. Der spannungsreiche und astige Kernbereich der Buchen stimmt in etwa mit dem Holz, das in der Jungbestandsphase bis zum Abschluss der Schaftreinigung und der Seitenbereich mit dem Holz, das seit Beginn der Durchforstungsphase bis zum Erntezeitpunkt zugewachsen ist, überein. Unter der Voraussetzung einer Lichtwuchsdurchforstung kann zu Beginn der Durchforstungsphase bei einer Bestandesoberhöhe von ca. 17 m für den Grundflächenmittelstamm mit einem BHD von ca. 12 cm und einem Mitteldurchmesser des 3 m langen Erdstammstücks von ca. 10-11 cm gerechnet werden (MLWF, 1980, ALTHERR, 1981). Diesem Kernbereich stehen in der vorliegenden Untersuchung Seitenbereiche von jeweils ca. 7,5 cm gegenüber (vgl. Kap. 2.1). Dementsprechend lassen sich aus den schwachen Buchenstämmen ca. 16 % Kernbretter und 84 % Seitenwarebretter gewinnen.

Die Seitenware wird in der Regel höher bewertet, weil sie weniger astig und spannungsärmer ist und gegebenenfalls keinen Rotkern als Farbfehler aufweist. So lässt sich für lufttrockene fehlerfreie Seitenware derzeit ca. 350,- € / m³ erzielen, während Fehler zu Abwertungen um ca. 100,- € / m³ führen. Als ausschlaggebender Fehler gelten in der Praxis Schnittholzrisse, während Verformungen wenig Beachtung finden. Die Ware aus dem Stammzentrum wird dagegen in der Regel ohne Qualitätssortierung für ca. 200,- € / m³ verkauft (ANONYMUS, mündl. Mitt., 2000-2002³). I/D-bedingte Erlösdifferenzierungen konzentrieren sich deshalb auf die Qualität der Seitenware.

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich für die bessere Seitenwarequalität I/D-entfeuchteter Stämme gegenüber herkömmlich verarbeitetem Holz ca. 10,- € / fm Stammholz mehr Erlösen (Tab. 9). Dem stehen in einer Anlage zur mechanischen Holzentfeuchtung von jährlich 4.000 fm Stammholz Verfahrenskosten von ca. 23,- € / fm gegenüber (STAHL, 1999). Daraus lässt sich trotz der Qualitätsverbesserung eine I/D-bedingte Gewinnminderung von über 10,- € / fm Stammholz ableiten. Offensichtlich rechtfertigen die besseren Seitenwarequalitäten nicht den Einsatz der I/D-Technik, sofern eine Anlage in der genannten Größenordnung zugrunde ge-

³ Die betreffenden Aussagen stammen von Laubholzsägern. Die Quellen bleiben zum Datenschutz ungenannt.

legt wird. Über Anlagen anderer Größen lässt das zur Zeit zugängliche Zahlenmaterial keine Aussagen zu.

	Seitenware					
Qualität	unbehandelter Stämme			I/D-entfeuchteter Stämme		
	Anteil (%)	Volumen (m³ / fm*)	Erlös (€ / fm)	Anteil (%)	Volumen (m³ / fm*)	Erlös (€ / fm)
ohne Risse	60	0,302	105,70	80	0,403	141,05
mit Rissen	40	0,201	50,25	20	0,100	25,-
Summe			155,95			166,05

* bei 60 %iger Ausbeute

Tab. 9: Anteile fehlerfreier und gerissener lufttrockenere Seitenwarebretter und stammholzbezogene Schnittwareerlöse unbehandelter und I/D-entfeuchteter Buchenstämme.

Die Angaben beziehen sich auf schwaches Buchenstammholz (vgl. Kap. 2.1). Die Anteile nicht gerissener und gerissener Seitenwarebretter wurden Abb. 15 entnommen. Als Anteil der Seitenware am gesamten Schnittholz wurde 84 % bestimmt. Für fehlerfreie Seitenware wurde ein Verkaufspreis von 350,- € / m³ und für gerissene Seitenware von 250,- € / m³ unterstellt (Anonymus, mündl. Mitt., 2000-2002³).

Neben der Schnittholzqualität werden der I/D-Technik weitere wirtschaftliche Vorteile zugesprochen. So kann die mechanische Stammholz (-vor-) entfeuchtung den Trocknungsprozess stark verkürzen. Dies führt zu einer geringeren Kapitalbindung im Sägewerk für die Lagerhaltung von Rohmaterial und/oder Produkten (STAHL, 2000). Darüberhinaus deutet sich an, dass die Kosten der I/D-Entfeuchtung unter denen der konventionellen oder der Vakuumtrocknung von Schnittholz liegen können (BRUNNER, 1999; zit. in STAHL, 1999). Diese Vorteile können abweichend von der ökonomischen Aussage dieser Studie zu anderen Ergebnissen führen. Sie lassen sich jedoch derzeit nicht beurteilen, weil sie gezielte Untersuchungen zu den alternativen Buchen-Trocknungstechniken erfordern.

5 Zusammenfassung

Schnittholzverformungen und -risse stellen ein Problem für die Qualität von technisch getrocknetem Laubschnittholz dar. Dieses Problem tritt besonders bei der Verwendung von schwachem Buchenstammholz als Ausgangsmaterial auf. Deshalb konnten diese Stammholzsortimente kaum an der zunehmenden Wertschätzung für Buchenholz während der vergangenen 10 Jahre teilhaben.

Andererseits wurde in der jüngeren Vergangenheit an der Universität Karlsruhe ein Verfahren zur mechanischen Stammholzentfeuchtung entwickelt, das sich nicht nur zur Vortrocknung bis in den Fasersättigungsbereich, sondern auch zum Holzfeuchteausgleich eignet. Dies könnte eine wichtige Voraussetzung sein, die Trocknungsqualität auf dem Wege der Spannungsverminderung wirksam zu verbessern

Deshalb war es das Ziel dieser Studie, den Einfluss der mechanischen Stammholzentfeuchtung auf die Qualität von technisch getrocknetem Schnittholz aus schwachem Buchenstammholz zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden 30 frische und 30 I/D-behandelte Stammholzabschnitte schwacher Buchen eingeschnitten, besäumt und technisch endgetrocknet. Zu allen Versuchszeitpunkten wurden Kennwerte zur Holzfeuchte und Holzfeuchteverteilung ermittelt. Vor und nach der Kammertrocknung wurden Kennwerte zur Rissbildung und Verformung der Bretter erhoben.

In der vorliegenden Untersuchung hat das I/D-Verfahren die Holzfeuchten der Buchenstämme signifikant abgesenkt und die Holzfeuchte signifikant ausgeglichen. Dies führte vor der Kammertrocknung dazu, dass die Seitenbretter I/D-entfeuchteter Stämme weniger als die unbehandelten Stämme gerissen waren und die Risse der Kernbretter weniger weit aufklafften. Nach der technischen Endtrocknung waren Bretter I/D-entfeuchteter Stämme stärker als die unbehandelten Stämme gerissen. Dies führte dazu, dass deutlich mehr Bretter I/D-entfeuchteter als unbehandelten Stämme rissbedingt in geringe Schnittholz- bzw. Güteklassen nach EU- und DI-Normen eingeordnet wurden.

Darüberhinaus zeigten Seitenbretter I/D-entfeuchteter Stämme vor der Kammertrocknung wahrscheinlich geringere Längskrümmungen und Verdrehungen als diejenigen unbehandelten Stämme, während alle Bretter hinsichtlich Querkrümmungen und Verdrehungswinkeln gleich waren. Nach der Kammertrocknung waren die Kernbretter I/D-entfeuchteter Stämme tendenziell weniger als diejenigen unbehandelten Stämme verdreht. Während sich die Längs- und

Querkrümmungen der Bretter in dieser Studie nicht als Sortiermerkmale eigneten, um die Bretter nach Schnittholz- bzw. Güteklassen zu differenzieren, ließen sich im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollen ca. 20 % mehr I/D-behandelte kammertrockene Kernbretter aufgrund ihrer geringeren Verdrehungen in die EU-Güteklassen 1+2 einordnen.

Auch wenn das I/D-Verfahren die Schnittholzqualität insbesondere oberhalb der Fasersättigung erlöswirksam steigert, rechtfertigen die derzeit zugänglichen ökonomischen Kennwerte keine I/D-Anlage zur Schnittholzaufwertung. Allerdings könnte das I/D-Verfahren im Vergleich zu anderen Verfahren der Schnittholztrocknung kostengünstiger sein.

6 Literatur

ALTHERR, E. (1981): Erfahrungen bei der Anwendung quantifizierter Durchforstungshilfen in Buchenbeständen. *AFZ* **31**: S. 552-554.

ANONYMUS (1990): Konservierung und Lagerung von Sturmholz. *Forstliche Versuchsanstalt Aktuell März* 1990: S. 2.

ANONYMUS (2002): *Stresses in beech – executive summary*. Freiburg: Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft. Internet-Adresse: www.uni-freiburg.de/fobawi/. Internetsitzung vom 28.10.2002. 10 S.

ANONYMUS (2003): Europäische Parketthersteller mit leichtem Umsatz-Minus. *HZB* **129**: S. 126.

ANTHES, H., GIHR, L. und BECKER, M. (1993): *Untersuchungen zur Absatzsituation und Marktchancen von schwachem Buchen- und Eichen-Stammholz*. Freiburg: Selbstverlag der Universität Freiburg. 118 S.

ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (Hrsg.) (1985): *Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland*. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH. 170 S.

ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (Hrsg.) (1996): *Forstliche Standortsaufnahme*. Eching: IHW-Verlag & Verlagsbuchhandlung. 352 S.

ARCHER, R. (1987 A): On the origin of growth stresses in trees. *Wood Sci. Technol.* **21**: S. 139-154.

ARCHER, R. (1987 B): *Growth stresses and strains in trees*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag. 240 S.

BAILLIERES, H., CHANSON, B., FOURNIER, M., TOLLIER, M. T. und MONTIES, B. (1995): Structures, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'*Eucalyptus*. *Ann. Sci. For.* **52**: S. 152-172.

BARISKA, M. (1966): Über den Einfluss der Teerölimprägnierung auf das Schwindverhalten von Buchenholz. *HaRuW* **24**: S. 18-24.

- BEAULIEU, J., GIRARD, B. und FORTIN, Y. (2002):** Effect of drying treatments on warping of 35-year-old white spruce seed sources test in a provenance trial. *Ann. Sci. For.* **59**: S. 503-509.
- BERNHART, A. (1965):** Frischfeuchtigkeit und Schwindverhalten von Fichtenholz. *Forstwiss. Cbl.* **84**: S. 347-356.
- BES-BOLLMANN (Hrsg.) (1996):** *Standard-Trocknungsprogramme für die Tromatic-C System 310 MS V 2.0 Trockenkammer.* Bollmann Elektronik Systeme. 1 S.
- BMELF (Hrsg.) (1992):** *Bundeswaldinventur – Eine Wertung -.* Bonn: BMELF. 29 S.
- BOSSHARD, H. (1974):** *Holzkunde Band 2.* Basel und Stuttgart: Birkhäuser Verlag. 312 S.
- BRUNNER, R. (Hrsg.) (1987):** *Die Schnittholztrocknung.* Hannover: Buchdruckwerkstätten Hannover GmbH. 322 S.
- BURSCHEL, P. und HUSS, J. (1987):** *Grundriß des Waldbaus.* Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. 352 S.
- CASTÉRA, P., NEPVEU, G., MAHÉ, F. und VALENTIN, G. (1994):** A study on growth stresses, tension wood distribution and other related wood defects in poplar (*Populus x euamericana* cv I.214): end splits, specific gravity and pulp yield. *Ann. Sci. For.* **51**: S. 301-313.
- CSÖGÖR, Z. und POSTEN, C. (2001):** Biologische Wirkungen von Holzsaft aus Buchen und Fichte. *Chemie Ingenieur Technik* **73**: S. 389-393.
- DANVIND, J. (2002):** PLS prediction as a tool for modelling wood properties. *HaRuW* **60**: S. 130-140.
- DIN E. V. (Hrsg.) (1988):** *Normen über Holz.* 5. Auflage. Berlin und Köln: Beuth Verlag GmbH. 242 S.
- DINWOODIE, J. (1966):** Growth stress in timber – a review of literature. *Forestry* **39**: S. 162-170.
- DONALDSON, L. A. und TURNER, J. P. C. (2001):** The influence of compression wood and microfibril angle on the occurrence of distortion in window frames made from radiata pine (*Pinus radiata*). *HaRuW* **59**: S. 163-168.
- EHLEBRACHT, V. (1995):** *Alternative Bearbeitungsmöglichkeiten für schwaches Buchenstammholz als Voraussetzung [für] eine bessere Vermarktung.* Göttingen: Institut für Forstbenutzung. 117 S. + IV Anhänge.

- EHLEBRACHT, V. (1997):** *Neue Technologien für den Einschnitt von schwachem Laubstammholz unter besonderer Berücksichtigung der Rotbuche (Fagus sylvatica L.).* Göttingen: Institut für Forstbenutzung. 45 S.
- EHLEBRACHT, V. (2000):** *Untersuchung zur verbesserten Wertschöpfung bei der Schnittholzerzeugung aus schwachem Buchenstammholz (Fagus sylvatica L.).* Inauguraldissertation an der Universität Freiburg. Hamburg: Verlag Dr. Kovač. 253 S. + 3 Anhänge.
- EHLEBRACHT, V. (2001):** *Ansätze für ein Wertschöpfungskonzept für schwaches Laubholz.* Freiburg: Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft. 224 S + 2 Verzeichnisse.
- EHLEBRACHT, V. und BLEILE, K (2000):** *Produktion von keilverzinktem Bauholz aus schwach dimensioniertem Eichen-Stammholz.* Freiburg: Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft. 78 S.
- EISENBARTH, E. und ENCKE, B.-G. (2000):** Vortrocknung von Fichtenstammholz zur Erzeugung von Qualitäts-Bau-Holz. *AFZ/Der Wald* **55**: S. 668-669.
- FISCHER, H. W. und JOCHUM, M. (1996):** *Neue Verwendungsmöglichkeiten von Laubschwachholz.* Trippstadt: Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz (heute: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft). 18 S.
- FORSTDIREKTION RHEINHESSEN-PFALZ (Hrsg.) (1999):** *Forsteinrichtung des Staatswaldes Rheinauewald.* Neustadt / Weinstraße: Forstdirektion Rheinhessen-Pfalz.
- FOURNIER, M., CHANSON, B., THIBAUT, B. und GUITARD, D. (1994):** Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. Observations sur différentes espèces. *Ann. Sci. For.* **51**: S. 249-266.
- FRÜHWALD, A. und STAHL, M. (1999):** *I/D-Permeabilität.* Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Fr 1252/1-2. Hamburg und Karlsruhe: Ordinariat für Holztechnologie und Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik. 15 S.
- GANN MESS- UND REGELTECHNIK GMBH (Hrsg.) (1995):** *Betriebsanleitung HYDROMETTE M 4050.* Stuttgart: Selbstverlag der Firma. 164 S.
- GRAMMEL, R. (1989):** *Forstbenutzung.* Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. 193 S.
- GROSSER, D. und ZIMMER, B. (1998):** *Einheimische Nutzhölzer und ihre Verwendung.* München: Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung. 51 S.

- GRZESKOWIAK, V., SASSUS, F. und FOURNIER, M. (1996):** Coloration macroscopique, retraits longitudinaux de maturation et de séchage du bois de tension du peuplier (*Populus x euamericana* cv I.214). *Ann. Sci. For.* **53**: S. 1083-1097.
- GU, H., ZINK-SHARP, A. und SELL, J. (2001):** Hypothesis on the role of cell wall structure in differential transverse shrinkage of wood. *HaRuW* **59**: S. 436-442.
- HALE, J. (1957):** The anatomical basis of threedimensional changes of wood in response to changes in moisture content. *For. Prod. J.* **7**: S. 140-144.
- JAAKKO PÖYRY GMBH (Hrsg.) (2000):** *Analyse der Struktur und Wettbewerbsfähigkeit der Sägeindustrie in Rheinland-Pfalz*. Trippstadt: Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz (heute: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz). 759 S.
- KÄRKI, T. (2002):** Drying quality of European aspen (*Populus tremula*) timber. *HaRuW* **60**: S. 369-371.
- KAUMAN, W. (1964):** Einflußgrößen bei der Entstehung des Zellkollaps und seine Rückbildung. *HaRuW* **22**: S. 183-196.
- KEYLWERTH, R. (1966):** Praxis und Fortschritte der Holz Trocknung. *HaRuW* **24**: S. 205-211.
- KLAIBER, V., SEELING, U. und MUTZ, R. (2002):** Holzfeuchte in Fichtenstämmen (*Picea abies* (L.) Karst.) bei Ganzbaumlagerung im Bestand. *Schweiz. Z. Forstwes.* **153**: S. 210-218.
- KNIGGE, W. und SCHULZ, H. (1966):** *Grundriss der Forstbenutzung*. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. 584 S.
- KREBER, B., STAHL, M. R. und HASLETT, A. N. (2001):** Application of a novel de-watering process to control kiln brown stain in radiata pine. *HaRuW* **59**: S. 29-34.
- KUBLER, H. (1987):** Growth stresses in trees and related wood properties. *Forestry Abstracts* **48**: S. 131-189.
- MADDERN HARRIS, J. und MEYLAN, B. (1965):** The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. *Holzforschung* **19**: 144-153.
- MAIER, T. und ENGELS, J. (2003):** *Bericht der regionalen Buchenmarktstudie im Rahmen des Buchen-Interreg III A Projektes der Länder Luxemburg und Rheinland-Pfalz – Teil 1* -. Trippstadt und Luxemburg: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz und Administration d'Eaux et Forêts. 44 S.
- MAYER-WEGELIN (1955):** Spannungen und Spannungsrisse im Holz des stehenden und gefällten Stammes. *Mitt. ÖGfH* **7**: S. 17-23.

- MAYER-WEGELIN, H. und MAMMEN, E. (1954):** Spannungen und Spannungsrisse im Buchenstammholz. *AFJZ* **125**: S. 287-297.
- MLWF (Hrsg.) (1980):** *Hilfstabellen für die Forsteinrichtung (zur FA 72)*. Grünstadt: Druck und Verlag Emil Sommer. 255 S.
- NEČESANÝ, V. (1966):** Der Anteil von Zellwand und Mittellamelle am Schwind- und Quellmaß des Holzes. *HaRuW* **24**: 470-473.
- PATTERSON, D. (1998):** Inside-out beams from small diameter Appalachian hardwoods logs. *For. Prod. J.* **48**: S. 76-80.
- ÖHMAN, M. (1999):** Correspondences between manually estimated compression wood in Norway spruce and the warp of the sawn timber. *HaRuW* **57**: S. 391-396.
- OKUYAMA, T., YAMAMOTO, H., YOSHIDA, M., HATTORI, Y. und ARCHER, R. R. (1994):** Growth stresses in tension wood: role of microfibrils and lignification. *Ann. Sci. For.* **51**: S. 291-300.
- PERSTORPER, M., JOHANSSON, M., KLIGER, R. und JOHANSSON, G. (2001):** Distortion of Norway spruce timber. *HaRuW* **59**: S. 94-103).
- PLATON, V. (1959):** Internal stresses in beechwood and means for their reduction. *Ind. Lemn.* **7**: S. 441-447.
- QUER, M. (1997):** *Einfluß unterschiedlicher waldbaulicher Behandlungsmodelle auf die Verwertung und Verarbeitung von Eschenschnittholz (Fraxinus excelsior L.)*. Inauguraldissertation an der Universität Göttingen. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger. 220 S. + 42 S. Anhänge.
- RICHTER, K. und SELL, J. (1995):** Rahmenbedingungen für die Bereitstellung von ausreichend trockenem und masshaltigem Konstruktionsholz. *Schweiz. Z. Forstwes.* **146**: S. 3-12.
- SANDBERG, D. (1997):** Radially sawn timber – the influence of annual ring orientation on crack formation and deformation in water soaked pine (*Pinus sylvestris* L.) and spruce (*Picea abies* Karst.) timber. *HaRuW* **55**: S. 175-182.
- SCHILL, V. und STAHL, M. R. (1996):** *Umsetzung eines neuen Holz Trocknungsverfahrens vom Labor- in den Pilotmaßstab*. Karlsruhe: Selbstverlag der Universität Karlsruhe. 95 S.
- SCHUMACHER, P., MAKAS, M., WEGENER, G., EISENBARTH, E., EDELMANN, P. und BÜCKING, M. (1998):** Vorgetrocknetes Fichtenstammholz hoher Qualität. *HZB* **124**: S. 2110-2111.

SEELING, U. und MERFORTH, C. (2000): FRITS – a new equipment to measure distortion. *HaRuW* **58**: S. 338-339

SPEIDEL, G. (1984): *Forstliche Betriebswirtschaftslehre*. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. 226 S.

STAHL, M. (1999): *Das I/D-Verfahren zur Rund- und Schnittholztrocknung*. Kurzfassung eines Vortrages auf dem 1. Trippstadter Sägewerkertag am 13.11.1999. Trippstadt: Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz (heute: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft). 1 S.

STAHL, M. (2000): *Das Inkubations-/Dekompressionsverfahren zur Holzentfeuchtung*. Inauguraldissertation an der Universität Karlsruhe. Jockgrim: Verlag Mario Stahl. 143 S. einschl. Anhang.

SZÖKE, B. (1960): Einige Betriebsversuche und –erfahrungen bei der Schnittholztrocknung. *Holzforschung und Holzverwendung* **12**: S. 115-119.

ZMP (2001): Index monatlicher Erzeugerpreise forstwirtschaftlicher Produkte im Staatswald. *Holz Journal* **5/2001**: S. 6.

ZURLO, H. (1995): *Abschlussbericht des 30. Internationalen Seminars für Forschung und Lehre an der Universität Karlsruhe*. Karlsruhe: Universität.

7 Abkürzungen

7.1 Kennwerte und Namen

BMELF	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
FRITS	Freiburg's Improved Timber Scan
MLWF	Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz
p	Wahrscheinlichkeit

7.2 Zeitschriften

AFZ/Der Wald	Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald
AFJZ	Allgemeine Forst- und Jagdzeitung
Ann. Sci. For.	Annales des Sciences Forestières
For. Prod. J.	Forest Products Journal
Forstwiss. Cbl.	Forstwissenschaftliches Centralblatt
HaRuW	Holz als Roh- und Werkstoff
HZB	Holz-Zentralblatt
Ind. Lemn.	Industria Lemnului
Mitt. ÖgfH	Mitteilungen der österreichischen Gesellschaft für Holzforschung
Schweiz. Z. Forstwes.	Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen
Wood Sci. Technol.	Wood Science and Technology