

Die Delaminierungsprüfung – eine empirische Analyse

M. Brandstätter, K. Entacher, S. Wieselthaler

An die Herstellung von Brettschichtholz werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Aus Gründen der Qualitätssicherung werden bei den Herstellern laufend interne Kontrollen entsprechend den Normen durchgeführt. Die Normkonformität ist darüber hinaus von einer „überwachenden Stelle“ zu überprüfen, um ein Gütezeichen führen zu können. Die Holzforschung Austria (HFA) führt als akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle zweimal jährlich solche Überprüfungen ohne Voranmeldung durch.

Die Mitgliedsbetriebe des Österreichischen Leimbauverbandes (ÖLV) werden nach den Anforderungen der ÖNORM EN 386 und auf die Erfüllung der „Technischen Vorschriften des ÖLV“ kontrolliert. Geprüft werden Produktionsabläufe und Eigenüberwachung. Es werden Proben von Keilzinkenverbindungen und Trägerquerschnitten entnommen und im Labor auf Festigkeit und Verleimungsqualität untersucht.

Prinzip der Delaminierungsprüfung

Zur Kontrolle der Verleimungsqualität der Lamellen dient unter anderem die Delaminierungsprüfung, bei der im Holz innere Spannungen durch ein Feuchtegefälle erzeugt werden. Dies verursacht Zugspannungen in den Leimfugen, die bei ungenügender Güte der Verleimung zu einer Öffnung der Leimfugen (Delaminierung) führen. Die Länge der offenen Leimfugen wird gemessen, der Gesamtprozentsatz dieser Delaminierung zur Gesamtleimfuge und der Höchstprozentsatz der Delaminierung von einzelnen Leimfugen werden berechnet.

Von jeder Überprüfung wird ein Bericht erstellt. Die verwendeten Delaminierungsdaten (etwa 1300 Datensätze aus dem Zeitraum 1994 - 1999) stammen von 26 Betrieben, wobei 15 davon dem ÖLV angehören. Im Rahmen einer Diplomarbeit am Holztechnikum Kuchl (Wieselthaler, 2000) wurden diese Daten EDV-mäßig erfasst und statistisch ausgewertet. Die vorliegende Arbeit umfasst einen Teil der empirischen Untersuchungen mit spezieller Zielrichtung „Unterschieds- und Verteilungsuntersuchungen“.

Laut ÖNORM EN 391 werden drei Delaminierungsverfahren unterschieden. Die beiden Verfahren A und B sind für Leime des Typs I

nach ÖNORM EN 301 geeignet, und das Verfahren C für Leime des Typs II nach ÖNORM EN 301. Je nach Verfahren und Prüfreihe muss der Gesamtprozentsatz der Delaminierung jedes Querschnitt-Probekörpers geringer sein als die in Tabelle 1 angegebenen Grenzwerte. Für den Höchstprozentsatz der Delaminierung einer Einzelfuge gilt ein Grenzwert von 40% bei allen drei Verfahren.

Vorbereitung der Prüfkörper

Jeder Prüfkörper soll von einem vollständigen Querschnitt des zu prüfenden Bauteils stammen, wobei rechtwinkelig zur Faser geschnitten wird. Beim Schnitt muss eine glatte Oberfläche erzeugt werden. Die Länge des Prüfkörpers in Faserrichtung muss 75 ± 5 mm betragen. Ist die Breite größer als 300 mm, darf der Prüfkörper aufgeteilt werden, wobei die entstehenden Teile noch eine Breite von mindestens 130 mm haben müssen. Das gleiche gilt bei einer Höhe von über 600 mm, wobei die Einzelteile dann mindestens 300 mm hoch sein müssen.

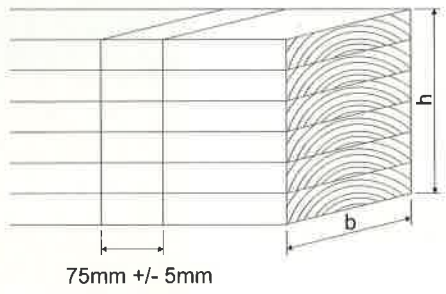


Abb. 1: Jeder Prüfkörper soll von einem vollständigen Querschnitt des zu prüfenden Bauteils stammen

Tabelle 2. Anzahl der Prüfreiheiten für die verschiedenen Prüfverfahren

Verfahren	Prüfreiheiten	zusätzl. Prüfr.
A	2	1
B	1	1
C	1	0

Die Anzahl der Prüfreiheiten (Tab. 2) richtet sich nach dem Verfahren. Wenn der Gesamtprozentsatz der Delaminierung den Höchstwert (siehe Tab. 1) übersteigt, wird

bei Verfahren A und B eine zusätzliche Prüfreiheit durchgeführt.

Da in dieser Arbeit nur auf das Verfahren A eingegangen wird, wird auf die Beschreibung von B und C verzichtet (für Details siehe ÖNORM EN 391).

Durchführung von Verfahren A

Die Proben werden in geeignetem Abstand voneinander in ein Druckgefäß (Abb. 2) gelegt und mit Wasser ($10^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$) bedeckt.

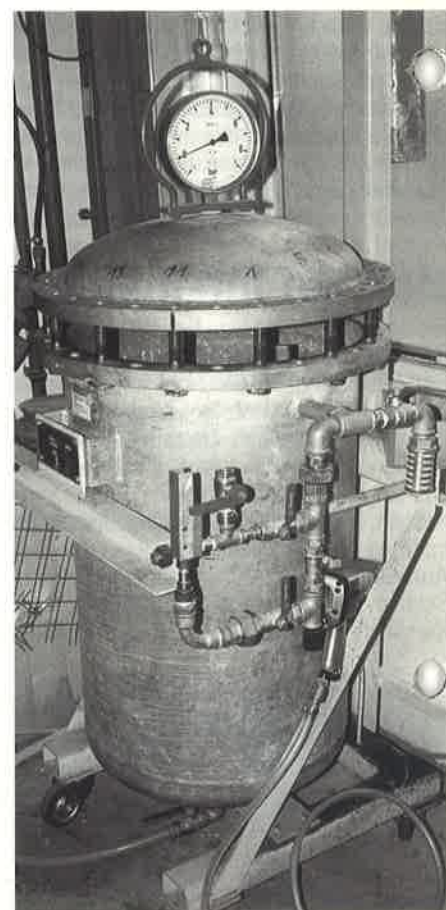


Abb. 2: Druckkessel

Dann wird für fünf Minuten ein Unterdruck (Vakuum) von 70 bis 85 kPa erzeugt. Anschließend wird eine Stunde lang ein Überdruck von 500 bis 600 kPa erzeugt. Dieser Vakuum/Druck-Zyklus wird einmal wiederholt. Danach werden die Prüfkörper 21 bis 22 Stunden bei $60 - 70^{\circ}\text{C}$ Lufttemperatur, maximal 15% relativer Luftfeuchte und 2 m/s bis 3 m/s Luftgeschwindigkeit getrocknet (Abb. 3). Die Proben müssen mit den Hirnholzflächen parallel zum Luftstrom liegen und einen Abstand von mindestens 50 mm voneinander haben. Danach wird an beiden Querschnittsflächen die Länge der offenen Leimfugen (in mm) gemessen (Abb. 4).

Tabelle 1. Höchstwert für den Gesamtprozentsatz der Delaminierung

Verfahren	gültig für Leimtyp	Höchstzulässiger Gesamtprozentsatz der Delaminierung nach der Anzahl der Prüfreiheiten		
		Prüfreihe 1	Prüfreihe 2	Prüfreihe 3
A	I	–	5	10
B	I	4	8	–
C	II	10	–	–

Tabelle 3. Anzahl der Datensätze sortiert nach Aushärteverfahren und Leimsystemen

	Probenanzahl	Kaltaushärtung	Warmaushärtung	HF-Aushärtung
UF	28	28	0	0
MUF	778	335	140	161
PRF	381	282	20	0
PUR	154	154	0	0

Die Prozentsätze der Delaminierung werden folgendermaßen berechnet:

- Gesamtprozentsatz der Delaminierung

$$GD = 100 * \frac{l_{tot, delam}}{l_{tot, glueine}}$$

$l_{tot, delam}$... Gesamtdelaminierungslänge aller Leimfugen des Prüfkörpers in mm

$l_{tot, glueine}$... Gesamtlänge der Leimfugen an beiden Hirnholzflächen des Prüfkörpers in mm

- Höchstprozentsatz der Delaminierung

$$HD = 100 * \frac{l_{max, delam}}{2 * l_{glueine}}$$

$l_{max, delam}$... Höchstlänge der Delaminierung einer Leimfuge des Prüfkörpers in mm (an beiden Querschnittsflächen gemessen)

$l_{glueine}$... Länge einer Leimfuge, im Regelfall die Breite des Prüfkörpers



3: Trockenkammer mit Prüfkörpern

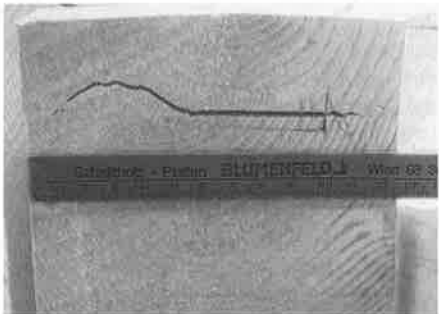


Abb. 4: Längenmessung der offenen Leimfuge

Empirische Auswertung

Aus den 1347 Datensätzen wurden nur jene Proben ausgewählt, die nach Verfahren A delaminiert wurden. Weiters wurden nur die Ergebnisse der Delaminierung nach dem ersten Zyklus (2 Prüfreihe) ausgewertet. Die Delaminierungsdaten liegen im MS Excel vor und wurden nach Leimsystem, Produkt, Aushärteverfahren, Breite der Proben, Holzart,

Datum sowie den Werten der Gesamtdelaminierung und der Höchstdelaminierung der Einzelfuge kodiert.

Vergleich nach Aushärteverfahren

Je nach Temperatur beim Härten und Abbinden unterscheidet man folgende Aushärteverfahren:

- Kaltaushärtung: bei Temperaturen bis zu 30°C. Die Reaktion wird durch einen Härter oder Katalysator ausgelöst.
- Aushärtung bei erhöhter Temperatur („Warmaushärtung“): bei einer Temperatur zwischen 30°C und 90°C mit oder ohne Zugabe von Härtern. Die Härtung wird durch die Temperatur beschleunigt.
- Hochfrequenzaushärtung (HF): Die Temperaturerhöhung wird bei der HF-Aushärtung durch dielektrische Erwärmung mittels Hochfrequenzenergie erreicht.

Die Unterschiede der Aushärteverfahren wurden mittels Box-Plots dargestellt (Abb. 5), die Box (oder der Kasten) kennzeichnet den Kern der Verteilung. Das obere Ende der Box definiert das 75%-Quantil, und das untere Ende das 25%-Quantil der Daten. Somit liegen 50% der Daten innerhalb der Box. Die Linie im Kasten kennzeichnet den Median. Liegt der Median im Zentrum der Box, so ist die Verteilung im Kern symmetrisch, andernfalls liegt eine Rechts- oder Linksschiefe vor. Die Grenzbereiche außerhalb der Box (Zäune) dienen der Auszeichnung von Ausreißern. Für die Berechnung dieser Zäune, siehe Hartung (1995). Für die folgende Untersuchung wurde nur Fichte herangezogen, die mit Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harzleim (MUF) verleimt wurde. Die Anzahl der Daten ist in Abbildung 5 bei der Gesamtdelaminierung angegeben (in Klammern unterhalb der Bezeichnung der Aushärteverfahren).

Gesamtdelaminierung (GD) und Höchstdelaminierung der Einzelfuge (HD) verhalten sich von der Verteilung her analog (Abb. 5, die Boxen zeigen dasselbe Verschiebungsverhalten). Auffällig ist, dass bei GD ein viel größerer Prozentsatz der Proben über dem geforderten Grenzwert liegt (die höchstzulässigen Grenzwerte bei GD sind eindeutig schärfer definiert). Bei Warmaushärtung berührt die Box bei der GD bereits die Grenzwertmarkierung, was bedeutet, dass ein sehr großer Anteil von etwa 25% der

Tabelle 4. Prozentsätze der Daten über dem Grenzwert nach dem ersten Zyklus (5% bei GD, 40% bei HD)

	GD	HD
Hochfrequenz	11,0	0,6
Warmaushärtung	24,8	10,5
Kaltaushärtung	10,0	1,7

Daten über diesem Grenzwert liegt (Abb. 5 und Tabelle 4).

Weiters kann man mittels der Box-Plots schön erkennen, dass sich die Daten der Hochfrequenz- und Kaltaushärtung sehr ähnlich verhalten, die Daten der Warmaushärtung heben sich deutlich von den anderen beiden ab und liefern die schwächsten Ergebnisse. Die eindeutige Verschiebung der Daten wurde durch einen Kruskal-Wallis Test (Hartung, 1995) hochsignifikant bestätigt.

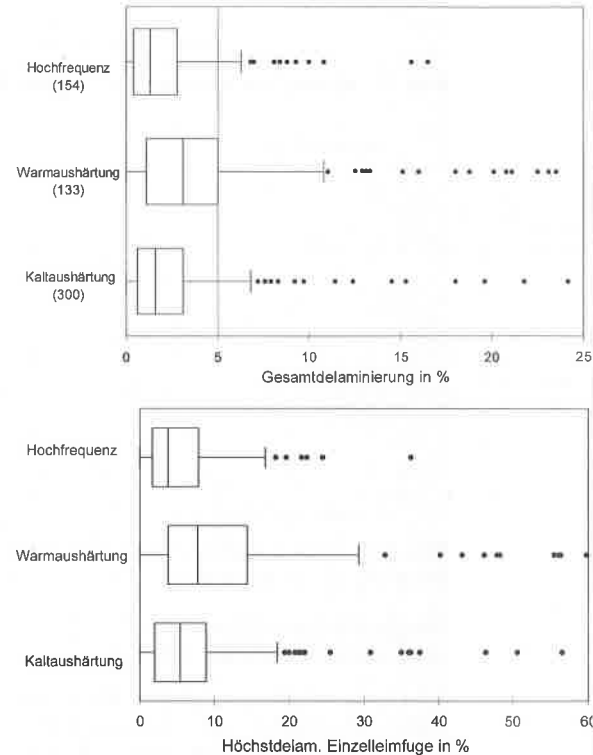


Abb. 5: Vergleich nach Aushärteverfahren (MUF, Fichte)

Vergleich nach Leimsystemen

Folgende Leimsysteme wurden ausgewertet: Melamin-Harnstoff-Formaldehydharzleim (MUF), Phenol-Resorcin-Formaldehydharzleim (PRF) und Polyurethanklebstoff (PUR). Die Anzahl der Daten ist in Abbildung 6 in Klammern unterhalb dem Leimsystem angegeben.

Wie aus den Box-Plots ersichtlich, liefern die Leimsysteme signifikant unterschiedliche Ergebnisse in den Delaminierungsprüfungen. Ein zusätzlich durchgeführter Kruskal-Wallis Test (Hartung, 1995) bestätigte dies. Die PUR-Klebstoffe ergaben eindeutig die größten Prozentsätze über den in der Norm geforderten Werten (im ersten Zyklus, Tab. 5):

Tabelle 5. Prozentsätze der Daten über dem Grenzwert

	GD	HD
PUR	16,4	2,6
PRF	2,7	0,0
MUF	10,0	1,7

Wieder ist erkennbar, dass der Grenzwert bei Gesamtdelaminierung wesentlich schärfer definiert ist als bei der Höchstdelaminierung der Einzelfuge.

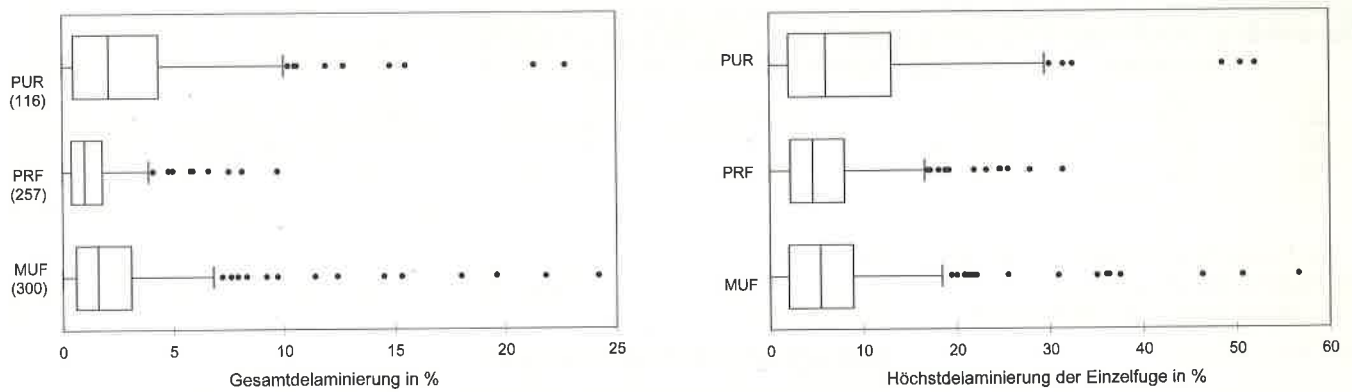


Abb. 6: Leimsysteme verhalten sich unterschiedlich bei der Delaminierungsprüfung (Kaltaushärtung, Fichte)

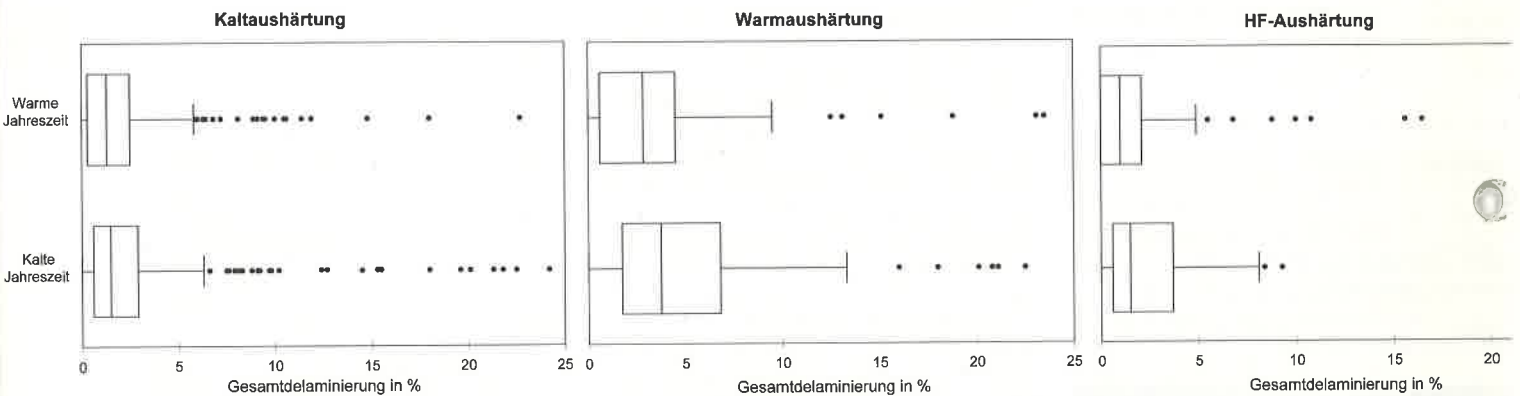


Abb. 7: Bei Kaltaushärtung kein Unterschied zwischen kalter und warmer Jahreszeit, doch bei Warm- und Hochfrequenzaushärtung kommt es zu Verschiebungen

Vergleich zwischen kalter und warmer Jahreszeit

Für diesen Vergleich wurde das Jahr in eine warme (Mai-Oktober) und eine kalte Jahreszeit (November-April) eingeteilt und jedes Aushärteverfahren einzeln betrachtet. Aus den Graphiken (Abb. 7) ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse bei Kaltaushärtung zwischen kalter und warmer Jahreszeit kaum unterscheiden. Bei Warm-aushärtung und Hochfrequenzaushärtung treten Verschiebungen auf, wobei bei Warm-aushärtung in der kalten Jahreszeit eindeutig die schlechtesten Ergebnisse vorliegen.

Einfluss der Breite auf die Delaminierung

Die Auswertungen lieferten auch interessante Ergebnisse zum Einfluss der Breite auf die Delaminierung. Die Daten wurden hinsichtlich der Probenbreiten in die in der Tabelle 6 angegebenen Klassen eingeteilt (es wurde ver-

sucht eine homogene Datenanzahl pro Klasse zu erreichen), und der Einfluss auf Gesamtdelaminierung und Höchstdelaminierung der Einzelfuge wurde untersucht. Keine wesentlichen Unterschiede sind bei der Gesamtdelaminierung zu erkennen, bei der Höchstdelaminierung zeigt sich jedoch ein eindeutiger Aufwärtstrend der Mediane und Mittelwerte mit steigender Breite (siehe Tab. 6 und Abb. 8).

Anmerkungen zur Verteilung der Delaminierungsdaten

Etwas problematisch für eine geeignete Verteilungsanpassung ist, dass Daten mit Wert Null auch alle Delaminierungen enthalten, die kleiner als 3 mm und 5 mm von der nächsten entfernt sind (siehe ÖNORM EN 391), womit der Bereich in der engeren Umgebung von Null schlecht beschrieben wird. Es stellt sich die Frage, ob für Daten, die (auch sehr kleine) Delaminierungen aufweisen, ein Verteilungsmodell mit stetigem Verlauf durch den Ursprung verwendet werden soll (Annahme: Es treten mikroskopisch kleine Delaminierungen auf). Oder muss man davon ausgehen, dass Delaminierungen nur ab einer bestimmten Größe auftreten (d.h. die Dichte der Verteilung ist im Nullpunkt echt größer Null.)?

Nimmt man an, dass die Dichte der Verteilung durch den Nullpunkt geht, liefert eine Anpassung durch eine Gammaverteilung sehr zufrieden stellende Resultate. Abbildung 9 stellt die Verteilung der Daten bezüglich Höchstdelaminierung der Einzelfuge dar. Zur Erreichung einer homogenen Situation wurden nur Daten mit Wert $HD \neq 0$ verwendet – eingeschränkt auf ein spezielles Produkt des Leimsystems PRF, auf Kaltaushärtung und auf die Holzart Fichte. Dies ergab 177 Daten. Die erste Graphik zeigt die empirische Verteilungsfunktion (Punkte) und die Anpassung durch die Verteilungsfunktion einer Gammaverteilung, die mittels der Maximum-Likelihood Methode (Hartung, 1995) „geschätzt“ wurde. Die gepunkteten Linien grenzen einen 95%-Konfidenzstreifen für die Parameterschätzung der Gammaverteilung ein. Die zweite Graphik zeigt ein Histogramm der Daten und die Dichtefunktion der Gammaverteilung. Sehr gute Anpassungen durch Gammaverteilungen wurden auch für Gesamtdelaminierung sowie andere Leimsysteme und Aushärteverfahren erreicht.

Zusammenfassung
Die Auswertung der von der Holzforschung Austria im Zeitraum 1994-1999 erhaltenen Daten zur Delaminierungsprüfung nach

Tabelle 6. Breitenklassen

Klasse	Datenanzahl	Bereich (mm)	Mittelwert bei HD	Median bei HD
1	93	bis 90	4,9	3,1
2	134	90-100	9	5,0
3	106	101-118	8	4,8
4	147	119-125	6,5	5,0
5	81	126-139	7,3	4,2
6	114	140	7,9	5,7
7	121	141-158	8	6,7
8	153	159-160	8,9	5,6
9	136	161-180	9,7	6,4
10	84	ab 181	11,6	7,7

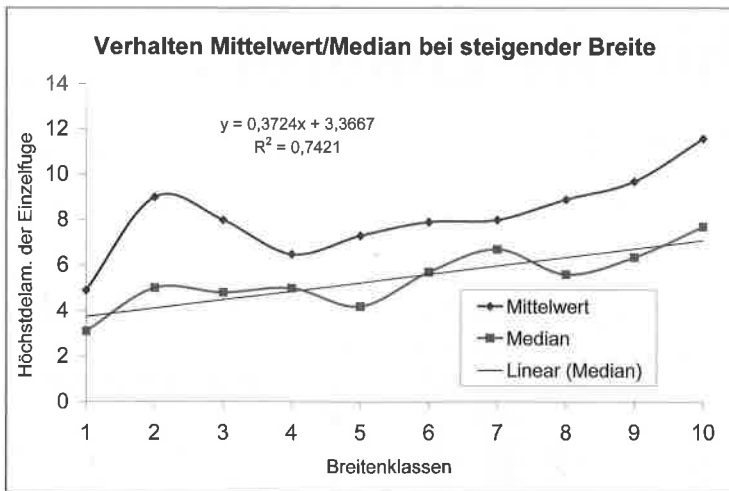


Abb. 8: Breiteneinfluss bei Höchstdelaminierung

ÖNORM EN 391 ergaben interessante Einblicke in das Verhalten der Delaminierung bei unterschiedlichen Aushärteverfahren und Leimsystemen. Weiters konnten ein Einfluss der Breite bei der Höchstdelaminierung der Einzelfuge und Unterschiede bei der Verarbeitung bei kalter und warmer Jahreszeit festgestellt werden. Die Resultate zeigen bei allen untersuchten Varianten deutlich, dass die Grenzwerte für Gesamtdelaminierung schärfer definiert sind als jene für Höchstdelaminierung.

Beim Vergleich der Leimsysteme zeigt sich, dass für Polyurethan-verleimte Proben die Anforderungen der EN 391 schwieriger zu erfüllen sind als für Harnstoff-Melamin- bzw. Phenol-Resorcin-verleimte Träger.

Bei Kaltaushärtung und Hochfrequenz-aushärtung wurden sehr geringe Delaminierungen festgestellt. Bei der Aushärtung unter erhöhter Temperatur (Warm-aushärtung) sind die Delaminierungswerte im Durchschnitt deutlich höher als bei den erstgenannten.

Erste Untersuchungen zur Verteilung der Delaminierungsdaten ergaben eine sehr gute Beschreibung durch Gammaverteilungen.

Eine detaillierte Verteilungsuntersuchung der Delaminierungsdaten wäre eine genauere Analyse des Auftretens kleinster Delaminierungen nötig. Abschließend kann festgestellt werden, dass die Delaminierungsprüfung eine sehr effiziente Methode ist, um allfällige Mängel der Brettschichtholzverklebung aufzuzeigen.

Dr. Manfred **Brandstätter**, Dipl.-Ing. (FH) Susanne **Wieselthaler**, Holzfor-schung Austria, Franz Grill-Straße 7, A-1030 Wien; Dr. Karl **Entacher**, Holztechnikum Kuchl, Markt 136, A-5431 Kuchl

Literatur

Hartung, J. (1995): Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 10. Auflage, Oldenbourg Verlag München Wien.

Technische Vorschriften Holzleimbau: Österreichischer Holzleimbauverband, Wien, 1996.

Wieselthaler, S. (2000): Statistische Auswertung von Delaminierungsprüfungen im Holzleimbau, Diplomarbeit, Fachhochschul-Studiengang „Holztechnik und Holzwirtschaft“, HTK Kuchl.

ÖNORM EN 301: Klebstoffe für tragende Holzbauteile,

Phenoplaste und Aminoplaste
Klassifizierung und Leistungsanforderungen, Deutsche Fassung EN 301 : 1992
ÖNORM EN 302: Klebstoffe für tragende Holzbauteile, Prüfverfahren
ÖNORM EN 386: Brettschichtholz – Leistungs- und Mindestanforderungen an die Herstellung
ÖNORM EN 391: Brettschichtholz – Delaminierungsprüfung von Leimfugen

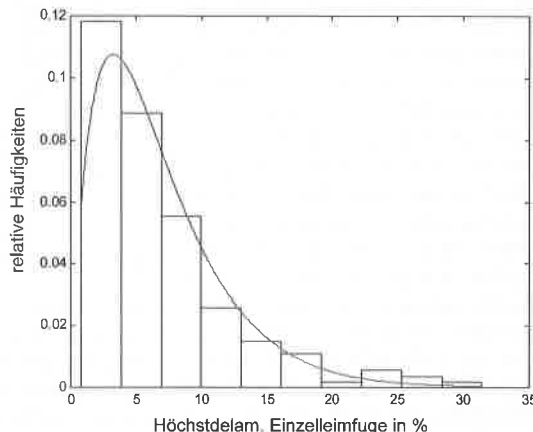
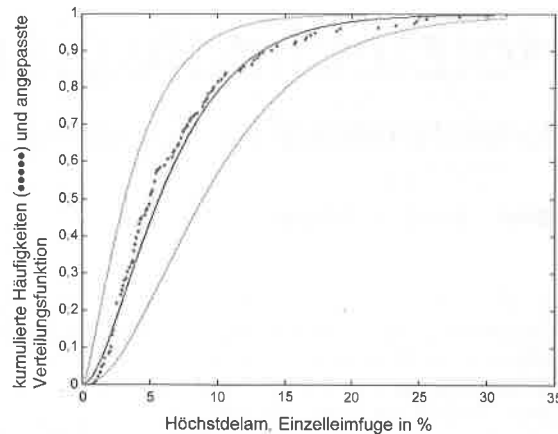


Abb. 9: Verteilungsanpassung einer Gammaverteilung an HD-Daten



Umdasch Aktiengesellschaft, A-3300 Amstetten, Reichsstraße 23

With its two areas of business - 'Doka Schalungstechnik' (concrete formwork systems) and 'Umdasch Shop Concept' (shop-fittings) - and its worldwide workforce of some 3900 people, the Umdasch Group is one of Europe's premier timber-processing companies.

In memory of its founder Josef Umdasch, the Umdasch Group has endowed the

2001 Josef Umdasch Prize

at the 'Universität für Bodenkultur Wien' (University of Agricultural Sciences Vienna) - worth ATS 200,000 (approx. USD 15,000). The prize is open to entrants from all nations.

This prize is offered for outstanding achievements in the field of timber and forestry sciences, in particular with regard to economy in the use of timber, quality amelioration and environmental issues in connection with the processing and utilization of wood. Other eligible topics are new cultivation processes, environmentally compatible timber production and new afforestation techniques and measures to combat forest die-back.

The Josef Umdasch Prize may be awarded to one or more entrants who can submit completed scientific papers or otherwise demonstrate pioneering practical work in the above fields.

Closing date: 30th April 2001

Entries - in either English or German - should be submitted to the office of the Rector of 'Universität für Bodenkultur Wien' at Gregor-Mendel-Strasse 33, A-1180 Vienna, Austria.

