



# **ALTERUNGSMECHANISMEN VON KLEBSTOFFEN FÜR TRAGENDE HOLZBAUTEILE**

## **Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur  
Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht am

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik,  
Institut für Holzforschung der Universität für Bodenkultur Wien

Eingereicht von:

**SERKAN ÖZDEMİR**

Betreuer: Privatdozent Dipl.-Ing. Dr.nat.tech. Ulrich MÜLLER

Mitbetreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.tech. Wolfgang GINDL

## **Danksagung**

Am Ende des Studiums beziehungsweise mit Abschluss der Masterarbeit ist es an der Zeit sich bei all jenen Menschen zu bedanken die einen mehr oder weniger großen Anteil am Gelingen der oben genannten Arbeit hatten.

Mein größter Dank gilt hier meinen Eltern Sedat und Sabiha ÖZDEMİR, meiner Schwester Ass. Prof. Dr. med. Sibel KUL und meinem Bruder Dipl. Ing. Serdar ÖZDEMİR, die mir alle durch ihre unermüdliche und vor allem finanzielle Unterstützung das Studium ermöglichten und mir immer hilfreich zur Seite standen und stehen.

Für die gute fachliche und sehr kollegiale Betreuung gilt ein besonderer Dank meinem Betreuer Privatdozent Dipl.-Ing. Dr.nat.tech. Ulrich MÜLLER, der mich in der anstrengenden Zeit immer unterstützt und motiviert hat.

Weiterer Dank geht an meinen Mitbetreuer ao. Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.tech. Wolfgang GINDL für die fachliche Unterstützung im Rahmen der Masterarbeit.

Mein Dank gilt auch D.Dipl.-Ing. ÖKSÜZ Kerem Ilyas für die Unterstützung bei der Korrektur der Masterarbeit. Dr. Jürgen FOLRICH und Robert STINGL möchte ich für die Unterstützung bei der Durchführung von Versuchen und für die Herstellung von Proben danken.

Bedanken möchte ich mich auch Mitarbeitern der Kompetenzzentrum Holz GmbH. (Wood K-Plus) für die freundliche Unterstützung.

## Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit war mittels verschiedener mechanischer Prüfungen (Längszugscher- Schäftzug- und Querszugprüfung) die Dauerhaftigkeit von Klebfugen nach zyklischer Klimabelastung zu untersuchen. Die Proben wurden mit drei verschiedenen Klebstoffen (MUF, PRF und 1K PUR), die für tragende Bauteile zugelassen sind, verklebt und mittels zyklisch veränderten Klimabedingungen belastet. Ein Zyklus der künstlichen Alterung besteht aus drei Phasen: Befeuchtung (50°C / 95% r.L.), Frostlagerung (-20°C / langsam abfallender Feuchtigkeit) und Trocknung (75°C und 15% r.L.). Nach 12 bzw. 24 Klimazyklen wurden die Restfestigkeit der Proben mittels Universalprüfmaschine untersucht und mit unbelasteten Referenzproben verglichen. Entgegen der ursprünglichen Annahme konnte nach 12 Klimazyklen ein tendenzieller Anstieg der Festigkeitswerte der verklebten Proben beobachtet werden. Dies kann durch eine Nachhärtereaktion der untersuchten Klebstoffe erklärt werden. Erst nach 24 Klimazyklen sind tendenzielle Alterungserscheinungen bei den verklebten Proben zu erkennen. Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählten Klimazyklen prinzipiell geeignet sind, die Alterungsmechanismen von Klebfugen zu beschleunigen. Für eine eindeutige Unterscheidung zwischen den verschiedenen Klebstoffen ist es aber notwendig die Zahl der Zyklen signifikant zu erhöhen. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um Veränderungen an der Grenzphase Holz – Klebstoff zu untersuchen.

**Schlagwörter:** Einkomponenten Polyurethan, Dauerhaftigkeit, Klebstoffe, Künstliche Alterung, Längszugscherfestigkeit, Melamin-Harnstoff-Formaldehyd, Querszugfestigkeit, Phenol-Resorcinol-Formaldehyd, Schäftzugfestigkeit

## **Abstract**

The objective of this work was to investigate the durability of adhesive joints after cyclic climatic exposure by using different test methods (lap joint test, scarf joint test and tensile test perpendicular to grain). The samples were bonded with three different adhesives (MUF, PRF und 1K-PUR), which are admitted for load-bearing timber structures and subsequently loaded by cyclic modified climatic conditions. One cycle of accelerate aging consists of three stages: wetting (50°C / 95%r.L.), freeze storage (at -20°C / slowly descending moisture) and drying (75°C / 15%r.L.). Residual strength of samples after 12 and 24 climatic cycles was compared with the strength of untreated samples, which were investigated by universal testing machine. Against primary expectation it has observed, that the strength of bonded samples increased after 12 climate cycles. This might be caused by post-curing of adhesives. Aging effects of adhesive were observed only after 24 climatic cycles. The results of this study showed that the selected climate cycles are basically suitable in order to accelerate aging mechanism of adhesives. However, for a clear differentiation between different types of adhesives is necessary to increase the number of cycles significantly. Further examinations are necessary to investigate changes on interphase between wood and adhesive.

**Keywords:** adhesive, artificial aging, durability, melamine-urea-formaldehyde, one-part polyurethane, phenol-resorcinol-formaldehyde, shear strength of lap joint, shear strength of scarf joint, shear strength of transverse joint

## Inhaltverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1.       | Einleitung.....   | 11 |
| 1.1.     | Geschichte der Holzklebstoffe für tragende Zwecke.....      | 11 |
| 1.2.     | Eigenschaften der Holzbauleime für tragende Zwecke.....     | 12 |
| 1.2.1.   | Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffe .....              | 12 |
| 1.2.1.1. | Herstellung und Aushärtung .....                            | 13 |
| 1.2.2.   | Phenol-Resorzin-Formaldehyd-Klebstoff .....                 | 14 |
| 1.2.2.1. | Herstellung und Aushärtung .....                            | 15 |
| 1.2.3.   | Polyurethan-Klebstoffe .....                                | 16 |
| 1.2.3.1. | Einkomponenten Polyurethan-Klebstoffe.....                  | 16 |
| 1.2.3.2. | Herstellung und Aushärtung .....                            | 17 |
| 1.3.     | Alterungsmethoden.....                                      | 18 |
| 1.4.     | Holz als Füge­teilwerkstoff für tragende Holzbauteile ..... | 24 |
| 1.4.1.   | Verhalten des Holzes unter Klimaeinflüssen.....             | 24 |
| 1.5.     | Zielsetzung .....   | 26 |
| 2.       | Material und Methode .....                                  | 27 |
| 2.1.     | Material.....   | 27 |
| 2.1.1.   | Klebstoffe.....   | 27 |
| 2.1.2.   | Holz .....  | 28 |
| 2.2.     | Probengestaltung.....                                       | 28 |
| 2.2.1.   | Längszugscherproben nach ÖNORM EN 302-1 (2004) .....        | 30 |
| 2.2.2.   | Schäftproben in Anlehnung an DIN 53 253 (1964) .....        | 30 |
| 2.2.3.   | Querzugproben in Anlehnung an EN 319 (1993).....            | 33 |
| 2.3.     | Behandlung der Proben .....                                 | 34 |
| 2.3.1.   | Vorversuch.....   | 34 |
| 2.3.2.   | Künstliche Alterung.....                                    | 35 |
| 2.4.     | Bestimmung der Klebefestigkeit .....                        | 37 |
| 2.5.     | Bestimmung der Holzbruchanteiles .....                      | 38 |
| 2.6.     | Statistischen Methoden .....                                | 38 |
| 3.       | Ergebnisse.....   | 39 |
| 3.1.     | Längszugscherprüfung nach ÖNORM EN 302-1 (2004) .....       | 39 |
| 3.2.     | Schäftzugprüfung in Anlehnung an DIN 53 253.....            | 43 |
| 3.3.     | Querzugprüfung in Anlehnung an EN 319 .....                 | 47 |
| 4.       | Diskussion .....  | 52 |
| 4.1.     | Probengeometrie .....                                       | 52 |

|      |                            |    |
|------|----------------------------|----|
| 4.2. | MUF- Verklebung.....       | 54 |
| 4.3. | PRF- Verklebung .....      | 56 |
| 4.4. | 1K-PUR- Verklebung .....   | 57 |
| 5.   | Schlussfolgerungen .....   | 61 |
|      | Literaturverzeichnis ..... | 62 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Methylenbrücken a) zwischen Harnstoff und Formaldehyd und b) zwischen Melamin und Formaldehyd (Dunky 2002) .....  | 13 |
| Abbildung 2: Netzwerkstruktur eines MUF-Klebstoffes (Quelle: Zeppenfeld, Grunwald 2005).....   | 14 |
| Abbildung 3: Methylenbrücken zwischen Phenol und Formaldehyd (Dunky 2002).....   | 15 |
| Abbildung 4: Reaktion von Isocyanat mit Wasser und Umsetzung zu Polyharnstoff .....  | 17 |
| Abbildung 5: Die Einflussfaktoren, die auf die Alterungs- bzw. Witterungsbeständigkeit von Holz und Holzwerkstoffen einwirken.....   | 18 |
| Abbildung 6: Nummerierung der Proben.....  | 28 |
| Abbildung 7: Schnittmuster für Längszugscherproben aus den verklebten Holzbrettern nach ÖNORM EN 302-1 (2004) und gemischte Nummerierung auf einem Holzbrett entsprechend der Behandlungsart ..... | 29 |
| Abbildung 8: Schnittmuster für Schäftproben in Anlehnung an DIN 53 253 (1964) und gemischte Nummerierung auf einem Holzbrett entsprechend der Behandlungsart.....                                  | 29 |
| Abbildung 9: Schnittmuster für Querkzugproben und gemischte Nummerierung auf einem Holzbrett entsprechend der Behandlungsart .....   | 29 |
| Abbildung 10: Darstellung der Zugscherprobengeometrie nach ÖNORM EN 302-1 (2004).....  | 30 |
| Abbildung 11: Darstellung der Schäftprobengeometrie in Anlehnung an die ehemalige DIN 53 253 (1964) .....  | 32 |
| Abbildung 12: Schematische Darstellung der Pressvorrichtung für die Herstellung der Schäftproben.....  | 32 |
| Abbildung 13: Darstellung der Querkzugproben in Anlehnung an EN 319 .....  | 33 |
| Abbildung 14: Grafische Darstellung der Klimastufen und der zugehörigen gemessenen Holzfeuchte.....  | 35 |
| Abbildung 15: Grafische Darstellung der Klimastufen .....  | 36 |
| Abbildung 16: Positionierung der Proben in den Prüfmaschinen, a: Längszugscherprobe, b: Schäftprobe, c: Querkzugprobe.....   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 17: Zugscherfestigkeit der MUF- PRF- und PUR-Verklebungen nach EN 302-1 in den einzelnen Alterungsstufen .....                                 | 40 |
| Abbildung 18: Mittlere Zugscherfestigkeiten der von einem mit MUF-Klebstoff verklebten Brett herausgeschnittenen Proben in einzelnen Alterungsstufen ... | 41 |
| Abbildung 19: Mittlere Zugscherfestigkeiten der von von einem mit PRF-Klebstoff verklebten Proben in einzelnen Alterungsstufen .....                     | 41 |
| Abbildung 20: Mittlere Zugscherfestigkeiten der von einem mit MUF-Klebstoff verklebten Proben in einzelnen Alterungsstufen .....                         | 42 |
| Abbildung 21: Holzbruchanteil der Verklebungen der Referenzproben und der unterschiedlich lang gealterten Proben bei der Längszugscherprüfung .....      | 42 |
| Abbildung 22: Zugfestigkeit der MUF- PRF- und PUR-Verklebungen in den einzelnen Alterungsstufen bei geschäftete Probengeometrie .....                    | 43 |
| Abbildung 23: Darstellung von Gruppierung der Schäftproben auf Schnittmuster .....   | 44 |
| Abbildung 24: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen der geschäfteten Proben, verklebt mit MUF-Klebstoff .....                | 45 |
| Abbildung 25: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen der geschäfteten Proben, verklebt mit PRF-Klebstoff.....                 | 45 |
| Abbildung 26: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen der geschäfteten Proben, verklebt mit PUR-Klebstoff .....                | 46 |
| Abbildung 27: Holzbruchanteil der Verklebungen in einzelnen Alterungsstufen bei der Schäftzugprüfung .....   | 47 |
| Abbildung 28: Querzugfestigkeit der MUF- PRF- und PUR-Verklebungen in den einzelnen Alterungsstufen.....   | 48 |
| Abbildung 29: Darstellung der Gruppierung der Querzugproben auf Schnittmuster .....  | 49 |
| Abbildung 30: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen bei Querzugproben, verklebt mit MUF-Klebstoff.....                       | 49 |
| Abbildung 31: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen bei Querzugproben, verklebt mit PRF-Klebstoff .....                      | 50 |
| Abbildung 32: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen bei Querzugproben, verklebt mit PUR-Klebstoff.....                       | 50 |
| Abbildung 33: Holzbruchanteil der Verklebungen in einzelnen Alterungsstufen bei Querzugprüfung .....   | 51 |



Abbildung 34: Beispiel einer versagten Querzugprobe mit Bruchfläche weit  
entfernt von der Klebfuge ..... 51

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Bewitterungsversuche von verklebten Holzbauteilen (NK: Normklima, J: Jahr, Lag.: Lagerung) .....  | 19 |
| Tabelle 2: Zusammenstellung der Untersuchungen zur Bestimmung der Wirkungen einzelner Einflussfaktoren auf die Holzverklebungen (NK: Normklima, RT: Raumtemperatur, W: Wasserlagerung, WD: Wasserdampf, h: Stunde, T: Tag, M: Monat, J: Jahr).....             | 20 |
| Tabelle 3: Beschleunigte Alterungsprüfungen unter zyklische Klimabedingungen (NK: Normklima, RT: Raumtemperatur, W: Wasserlagerung, WD: Wasserdampf, h: Stunde, T: Tag, M: Monat, J: Jahr).....  | 21 |
| Tabelle 4: Zusammenstellung der Verklebungsbedingungen, des Mischungsverhältnisses (GT) und der Auftragsmenge .....  | 27 |
| Tabelle 5: Klimatisierungsstufen eines Zyklus.....   | 36 |
| Tabelle 6: Verwendete Prüfmaschinen und deren Einstellungen .....  | 37 |
| Tabelle 7: Übersicht der Ergebnissen der Längszugscherprüfung ( $\tau$ : Mittelwert der Zugscherfestigkeit, s: Standardabweichung, $\epsilon$ : Dehnung) .....   | 39 |
| Tabelle 8: Übersicht der Ergebnissen der Schäftzugprüfung ( $\tau$ : Mittelwerte der Zugscherfestigkeit, s: Standardabweichung) .....  | 43 |
| Tabelle 9: Übersicht der Ergebnissen der Querszugprüfung ( $\sigma$ : Zugfestigkeit s: Standardabweichung) .....   | 47 |
| Tabelle 10: Die Änderungen der Festigkeitswerten je nach Klebstoffart und Alterungsdauer (+): signifikante Zunahme, (-): signifikante Abnahme, (0): keine signifikante Änderung, R: Referenzproben, 12W.: 12-wöchige Alterung, 24W.: 24-wöchige Alterung ..... | 52 |

# 1. Einleitung

## 1.1. Geschichte der Holzklebstoffe für tragende Zwecke

Für Holzverbindungen kommen verschiedene Verbindungsmittel, wie Bolzen, Dübel, Nägel, Schrauben sowie Klebstoffe in Frage. Die ersten, schon in historischen Zeiten eingesetzten Leime, waren aus tierischen (Grundsubstanzen vorwiegend Eiweißverbindungen) oder pflanzlichen (vorwiegend auf Basis von Kohlenhydraten oder natürlichem Kautschuk) Rohstoffen aufgebaut. Die Eigenschaften dieser Produkte waren im Vergleich zu modernen Klebstoffen sehr inhomogen (Schremser 2000).

Ende des 17. Jahrhunderts wurde erstmals versucht dieses Manko durch eine industrielle Produktion zu beheben. 1906 gilt, mit der Entwicklung des Brettschichtholzes, als Anfang des modernen Holzleimbaues (Schremser 2000).

Bis zum zweiten Weltkrieg wurden Kaseinleime zur Verklebung von tragenden Holzbauteilen verwendet. Wegen ihrer niedrigen Feuchtebeständigkeit dürfen sie für tragende Holzbauteile nur verwendet werden, wenn die Leimfuge ständig gegen Eindringen freien Wassers geschützt ist.

Der erste säurehärtende Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff (UF) zum Verleimen von Holz (insbesondere für die Verklebung von Sperr- und Furnierholz) wurde 1929 patentiert. UF-Klebstoffe sind empfindlich gegen Einwirkung von Feuchtigkeit und Wasser, insbesondere bei höheren Temperaturen. Deswegen sind die UF-Klebstoffe nur im Innenbereich für tragende Holzbauteile geeignet und zugelassen. Zu Beginn des zweiten Weltkrieges folgten die artverwandten Melamin-Formaldehyd-Klebstoffe (MF) (Zeppenfeld und Grunwald 2005).

Die säurehärtenden Phenol-Formaldehyd-Klebstoffe (PF) wurde erst Ende 30er Jahre des letzten Jahrhunderts zur Kaltverklebung von Holz (Flugzugsperrholz) eingesetzt. Flüssige alkalische PF-Klebstoffe sind erst seit etwa 1940 in Gebrauch (Zeppenfeld und Grunwald 2005).

Die den PF-Klebstoffen sehr ähnlichen Resorcin-Formaldehyd-Klebstoffe (RF) wurden in der Holzverklebung erstmals 1943 in USA in Bereichen eingesetzt, wo von Holzklebstoffen für tragende Verbindungen insbesondere im Flugzeug- und Schiffsbau hohe Feuchtebeständigkeit gesucht wurden, die auch bei Raumtemperatur abbinden können (Zeppenfeld und Grunwald 2005).

Die Polyurethanklebstoffe (PUR) wurden für Holzverklebung erstmals in den 1940er Jahren (Flugzeugbau) eingesetzt. Nach der ersten bauaufsichtlichen Zulassung von Isocyanat-Klebstoffen 1973 werden sie in stetig steigendem Umfang für die Herstellung von Holzverklebungen verwendet (Zeppenfeld und Grunwald 2005). Vor rund 20 Jahren begann der Einsatz von feuchtevernetzenden Einkomponenten-Polyurethanklebstoffen (1K-PUR) für die Herstellung von verklebten tragenden Holzbauteilen in Europa. Die Entwicklung

ging von der Schweiz aus, wobei hier hauptsächlich Pilotobjekte errichtet wurden (Radovic, Rothkopf 2003). In der Zwischenzeit werden 1K-PUR-Klebstoffe auf einer breiten Basis im Holzleimbau eingesetzt.

Klebstoffe auf Basis von Epoxiden wurden erstmals im Jahr 1938 hergestellt und bisher zu Verklebung von Holz nur in speziellen Fällen (z.B. für Reparaturverklebung in tragenden Bereich) eingesetzt (Zeppenfeld und Grunwald 2005).

## **1.2. Eigenschaften der Holzbauleime für tragende Zwecke**

Bei der Herstellung von tragenden Holzbauteilen sind gegenwärtig vor allem Melamin- und Polyurethanklebstoffe von großer Bedeutung. Obwohl Klebstoffe auf Phenol- und Resorzinbasis in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts den größten Marktanteil hatten, werden diese wegen der rötliche Klebfuge heute nur in geringeren Mengen verwendet. Trotzdem stellen diese noch immer eine wichtige Klebstoffgruppe für tragenden Zweck im Holzbau dar (Kraus und Oberdorfer 2005).

Die Sicherheit der verleimten Holzbauteile für tragenden Zweck wird durch eine umfassende Qualitätskontrolle von Produkt und Klebstoffen gewährleistet. Dafür verwendete Klebstoffe haben die Anforderungen nach ÖNORM EN 301 zu erfüllen. Die Prüfverfahren für die Untersuchungen der Klebstoffe sind in ÖNORM EN 302 (Teil 1 bis 4) beschrieben.

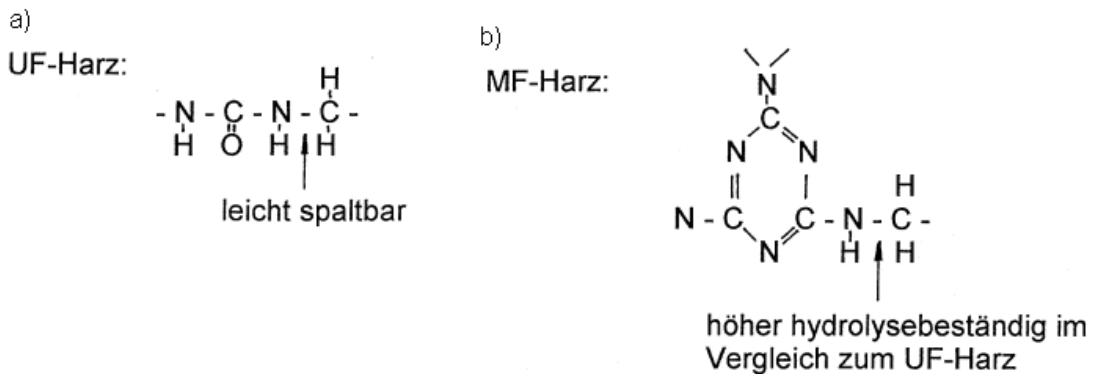
In der vorliegenden Arbeit wurden die folgenden drei Klebstoffe auf Melamin-/Harnstoff-, Phenol-/Resorcin- und Polyurethanbasis ausgewählt. Alle drei Klebstoffe sind nach ÖNORM EN 302 geprüft und nach EN 301 zur Verwendung von tragenden Bauzwecken im Außenbereich zugelassen.

### **1.2.1. Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffe**

Die UF-Klebstoffe sind empfindlich gegen Einwirkung von Feuchtigkeit und Wasser, insbesondere bei höheren Temperaturen. Dabei wird eine chemische Zersetzung und nachfolgender entsprechender Festigkeitsverlust der Klebfuge beobachtet. Die niedrige Resistenz der UF-Klebstoffe gegen Hydrolyse kann durch die Mischung von Melamin in verschiedenen Formen erhöht werden. Trotz der besseren Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse werden reine MF-Klebstoffe in Holzverklebungen wegen Kostengründen außer für spezielle Anwendungen nicht verwendet. Aufgrund der höheren Kosten wird bei der Klebstoffherstellung bei den MUF Klebern immer so viel Melamin wie nötig, aber so wenig wie möglich verwendet (Dunky und Niemz 2002).

Die Verstärkung des UF-Harzes beruht auf der durch die aromatische Ringstruktur des Melamins bewirkten höheren Hydrolysebeständigkeit der C-N Bindungen zwischen Melamin und der Methylolgruppe sowie der Pufferwirkung und dem damit verbundenen langsamer Abfall des pH-Wertes in der Klebfuge (Abbildung 1). Dieser langsamere pH-Abfall verursacht jedoch

auch ein Absinken der Aushärtegeschwindigkeit und damit ein Ansteigen der Gelierzeit bzw. der erforderlichen Presszeit (Dunky und Niemz 2002).



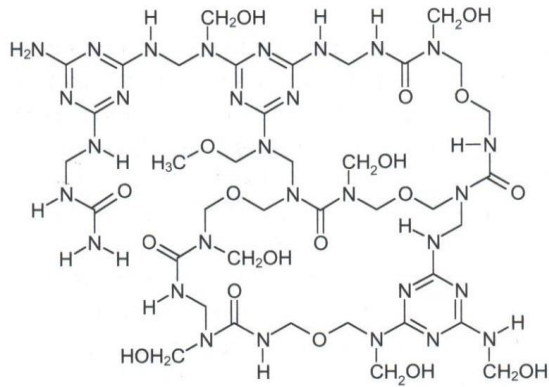
**Abbildung 1: Methylenbrücken a) zwischen Harnstoff und Formaldehyd und b) zwischen Melamin und Formaldehyd (Dunky 2002)**

Deppe und Schmidt (2004) berichtete, dass sich bei der MUF-Verklebung mit steigendem MF-Anteil in der Tendenz ein Festigkeitsabfall eingestellt. Vielleicht war eine starke Versprödung hierfür ursächlich. Im trockenen Zustand wurde das Festigkeitsniveau der PRF-Verleimungen von den MUF-Verklebungen mit hohem MF-Gehalt deutlich übertroffen (Deppe und Schmidt 2004).

Die MUF-Klebstoffe sind heiß- und kalthärtbar. Sie bilden farblose und lichtbeständige Klebfugen. Gegenüber den UF-Klebstoffen zeichnen sie sich durch bessere Feuchte- und Nassbeständigkeit aus. Sie sind weniger rissanfällig, unbrennbar aber auch wesentlich teuer als UF-Klebstoffe. Ausgehärtete Harze sind ungiftig und hygienisch unbedenklich (Zeppenfeld, Grunwald 2005)

#### 1.2.1.1. Herstellung und Aushärtung

MUF-Klebstoffe ähneln vom chemischen Aufbau her den UF-Klebstoffen. Der Harnstoff und das Melamin reagieren mit Formaldehyd unter Ausbildung von Methylolverbindungen. Nachfolgend findet die Kondensationsreaktion statt, dabei bilden sich unter Wasserabspaltung Methylen- bzw. Methylenätherbrücken, gleichzeitig steigen die Molmasse der Ketten und die durchschnittliche Molmasse des Harzes (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Netzwerkstruktur eines MUF-Klebstoffes (Quelle: Zeppenfeld, Grunwald 2005)**

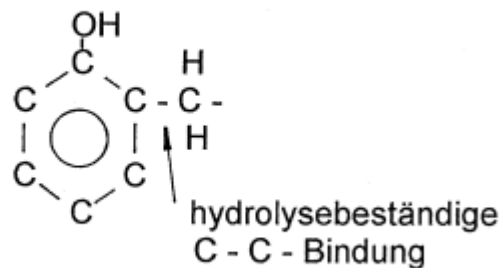
Die bei der Kondensationsreaktion entstehenden Methylen- oder Methylenätherbrücken beeinflussen je nach Ausmaß ihrer Anwesenheit die Eigenschaften des Klebstoffes bzw. der daraus hergestellten Holzwerkstoffe. Die sauerstofffreie Methylenbrücke zeigt im Vergleich zu Methylenätherbrücke eine deutlich höhere Hydrolysebeständigkeit. Methylenbrücken entstehen bevorzugt, wenn der pH-Wert in der sauren Kondensationsphase niedrig ist. Die Bildung von Ätherbrücken kann aber nie völlig ausgeschlossen werden. Da Formaldehyd aber bei den üblichen niedrigen Molverhältnissen ohnedies Mangelware ist und pro Ätherbrücke zwei Formaldehydmoleküle verbraucht werden, ist die Bildung der Ätherbrücke durchwegs unerwünscht. Zusätzlich stellen Ätherbrücken thermisch instabile Strukturen dar (Dunky und Niemz 2002).

Die Aushärtung von MUF- Klebstoffen erfolgt durch Zugabe von Härtern, die mit dem freien Formaldehyd des Klebers reagieren. Die dabei entstehende Säure bewirkt die Initiierung der sauren Aushärtereaktion. Der pH-Wert eines MF- und MUF-Harzes liegt im pH-Bereich 3-4 (Dunky und Niemz 2002).

### 1.2.2. Phenol-Resorzin-Formaldehyd-Klebstoff

Resorzin-Formaldehyd- (RF) und Phenol-Resorzin-Formaldehyd-Klebstoffe (PRF) werden als kalthärtende Bindemittel vor allem im konstruktiven Holzleimbau, für Keilzinkenverbindungen und andere Verklebungen für den Einsatz im Außenbereich eingesetzt. Der Einbau von Resorzin bewirkt eine deutliche Erhöhung der Reaktivität, auch kalthärtende Harze sind somit herstellbar. Die ausgehärteten Klebfugen zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit und durch eine sehr gute Wasser- und Wetterbeständigkeit unter den verschiedensten Klimabedingungen aus. Die C-C-Bindungen zwischen dem phenolischen Kern und Formaldehyd (als Methylenbrücken) sind extrem hydrolysestabil (Abbildung 3) und somit können RF- und PRF-Klebstoffe für tragende Holzbauteile im Außenbereich ohne Probleme verwendet werden (Dunky und Niemz 2002).

PF-Harz:



**Abbildung 3: Methylenbrücken zwischen Phenol und Formaldehyd (Dunky 2002)**

Die Klebfugen aus PRF- bzw. RF-Klebstoffe zeigen besseres elastisches Verhalten gegenüber Klebfugen aus MUF-Klebstoffen, da sie das bei der Kondensationsreaktion freiwerdende Wasser besser zu binden und festzuhalten vermögen. Im Übrigen kann auf Grund des langsames Abbindevermögens von PF- oder RF-Klebstoffen im Vergleich zu den UF- oder MF-Klebstoffen in dem durch Molekülvergrößerung gekennzeichneten Resol- und Resitolzustand ein Teil der durch Schwindung entstehenden Eigenspannungen durch eine noch mögliche plastische Verformung abgebaut werden. Das mit kleinem Schubmodul verbundene große Dehnvermögen einer Phenolharzklebschicht begünstigte das Haftvermögen am Holz (Clad 1965).

Aufgrund des hohen Preises und der beschränkten Verfügbarkeit von Resorzin hat es bereits frühzeitig Anstrengungen gegeben, die herausragenden Eigenschaften des Resorzins und die günstigen Kosten eines Phenolharzes zu verbinden. Dabei genügt es, wenn Resorzin nur an den entscheidenden und bei der Aushärtung reaktiven Stellen vorhanden ist (Dunky und Niemz 2002).

#### 1.2.2.1. Herstellung und Aushärtung

Die Reaktion von Phenol und Resorzin mit Formaldehyd unterliegt den gleichen grundlegenden Bedingungen. Die Reaktion zwischen Resorzin und Formaldehyd ist unter vergleichbaren Bedingungen allerdings 10 bis 15 mal schneller als die Reaktion zwischen Phenol und Formaldehyd. Deswegen werden PRF-Klebstoffe überwiegend durch die Aufpfropfung von Resorzin auf reaktive Methylolgruppen niedrigkondensierter Phenolresole hergestellt, sodass das ganze Formaldehyd nicht mit Resorzin umgesetzt werden und dass keine nicht-reagierten Phenole im Harz verbleiben. Ziel jeder PRF-Weiterentwicklung ist die Optimierung (im Sinne einer Minimierung) des erforderlichen Resorzingehaltes, ohne dass es jedoch zu einer Einschränkung der Anwendungseigenschaften kommt (Dunky und Niemz 2002).

Die Phenolresole werden in zwei Schritten hergestellt. Erster Schritt ist die Methylolierung als nucleophile Anlagerung von Formaldehyd an das in wässriger alkalischer Lösung vorliegende Phenolat-Anion. Zweiter Schritt ist die Kondensationsreaktion, dabei werden die Phenolmethylole zu höhermolekularen Resolen unter Bindung von Methylen- und Methylenätherbrücken weiter kondensiert (Dunky und Niemz 2002).

Die Aushärtung der PRF-Klebstoffe erfolgt durch die weitere Kondensation der Mischung von Phenolresole und Resorzin. Die Ausbildung der Bindefestigkeit erfolgt wie bei allen anderen Kondensationsharzen insbesondere über Nebenvalenzkräfte (van der Waals Kräfte, Wasserstoffbrückenbindungen, elektrostatische Kräfte) zwischen dem Bindemittel und den aktiven Stellen der Holzoberfläche. Unter Berücksichtigung der Wasserabsorption aus der Klebfuge ins Holz, die wiederum von der originären Holzfeuchtigkeit abhängt, bildet sich schließlich die Festigkeit der chemisch ausgehärteten Klebfuge aus (Dunky und Niemz 2002).

### 1.2.3. Polyurethan-Klebstoffe

Polyurethan-Bindemitteln (PUR), auch Polyisocyanatharze genannt, entstehen durch die Reaktion von verschiedenen Isocyanattypen mit Polyolverbindungen. Charakteristisch ist die polare Urethangruppe, die das Haften auf verschiedenen Werkstoffen ermöglicht. Je nach Wahl der Ausgangskomponenten und Grad der Vernetzung lassen sich kautschukartig-elastisch bis spröde-harte Klebfugen erzielen. Je nach den an den Polymerketten vorhandenen Endgruppen ergeben sich reaktive oder physikalisch abbindende Klebstoffe (Dunky und Niemz 2002).

Einige Vorteile der Isocyanatbasis Klebstoffe wurden von Schollenberg (1977) wie folgt beschrieben.

- Isocyanate reagieren einfach mit vielen unterschiedlichen Funktionalgruppen der Fügeteil (z.B. -OH, -SH, -NH, -NH<sub>2</sub> usw.)
- Di- und Polyisocyanate können selbst zu dreidimensionalen Klebstoffen polymerisieren.
- Isocyanate dringen durch die relativ kleine Molekülgröße leicht in unlösliche poröse Strukturen ein.
- Die Reaktion von Di- und Polyisocyanate mit Hydroxylgruppe produzieren strenge, polare, flexible Polyurethane, welche starke Attraktion auf verschiedene Oberflächen aufweist.

#### 1.2.3.1. Einkomponenten Polyurethan-Klebstoffe

Einkomponenten Polyurethan-Klebstoffe (1K-PUR) sind bekannt für ihre exzellente Haftung, Flexibilität, hohe kohäsive Festigkeit und niedrige Temperaturperformance. Sie entwickeln erfolgreich mit feuchten Materialien durch Bildung einfacher Wasserstoffbrücken mit den meistens Werkstoffen eine ausgezeichnete Verbindungen z.B. Textilfaser, Metall, Holz, Glas, Keramik, Kautschuk und Leder (Vick und Okkonen 1998).

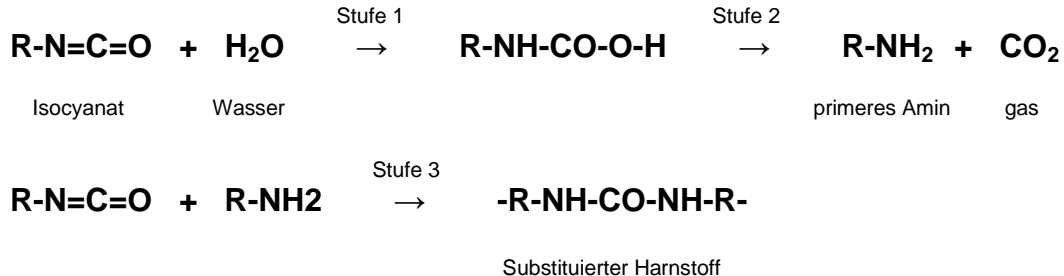
Trotz der schnellen und erfolgreichen Einführung des 1K-PUR-Klebstoffes in die Holzindustrie berichteten Richter und Schirle (2002) über einige Einschränkungen dieses Klebstoffes hinsichtlich der Sicherheit, da



- PUR-Klebstoffe mit zunehmender Temperatur ungünstige Kriecheigenschaften (Nachweis über thermal mechanical analysis, TMA) zeigen,
- PUR-Klebstoffe bei Ausbildung einer dicker Klebfugen bei kombinierter Beanspruchung von Temperatur und Feuchte limitierte Festigkeitseigenschaften aufweisen,
- PUR-Klebstoffe bei der Verklebung von Nadelhölzern mit hohem Extraktstoffanteil unbestimmte Bindungsprobleme aufweisen.

### 1.2.3.2. Herstellung und Aushärtung

Bei der Aushärtung von PUR-Klebstoffen handelt es sich um feuchtigkeitsvernetzende Systeme, deren Reaktionsmechanismus wesentlich nach Abbildung 4 abläuft. Da die einfachen, niedermolekularen Polyisocyanate bei einer Reaktion mit Feuchtigkeit relativ harte und spröde Klebschichten mit niedrigen Festigkeitswerten bilden, geht man bei den Einkomponentensystemen von vernetzten Polymeren, sog. Prepolymeren, aus. Diese Verbindungen werden aus höhermolekularen Polyolen mit einem stöchiometrischen Überschuss an Isocyanat hergestellt. Auf diese Weise liegen Verbindungen vor, die bereits über Urethanbindungen verfügen, die aber andererseits noch reaktionsfähige Isocyanatgruppen (sog. Isocyanatopolyurethane) besitzen, die der Reaktion mit Feuchtigkeit zugänglich sind (Habenicht 1997).



**Abbildung 4: Reaktion von Isocyanat mit Wasser und Umsetzung zu Polyharnstoff**

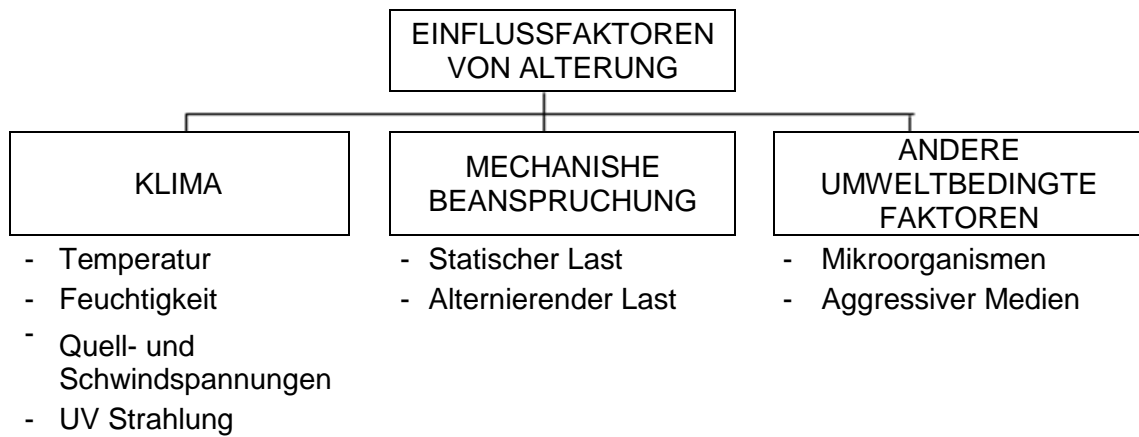
Die Aushärtung der 1K-PUR-Klebstoffe erfolgt in der Klebfuge ausschließlich durch Feuchtigkeitszutritt. Freie Isocyanatgruppe reagieren dann mit der Feuchte des Holzes und der Kleberfilm erreicht nach weniger Stunden die erforderliche Anfangsfestigkeit und härtet innerhalb weniger Tage vollständig aus. Es muss also die Oberfläche die zum Aushärten erforderliche Wassermenge liefern (Dunky und Niemz 2002). Wenn das nicht der Fall ist, kann sich eine Bindung zu OH-Gruppen der Holzsubstanz ausbilden, speziell wenn der Vorgang thermisch beschleunigt wird. Niemz et al. (2008) erwähnte, dass eine kovalente Bindung zwischen Isocyanat und Zellulose entsteht, sofern sehr hohe Temperaturen (128-180°C) herrschen und kein Wasser für die Reaktion vorhanden ist.

Die bei der Zerfallsreaktion entstehenden primären Amine setzen sich unmittelbar mit weiteren Isocyanatgruppen zu Polyharnstoffen um (siehe

Abbildung 4 Stufe 2). Kritisch kann bei dieser Reaktion die Bildung von Kohlendioxid durch den Zerfall der instabilen Carbamidsäurederivate sein, wenn dicke Klebstoffschichten mit höheren Viskositäten vorliegen und Gasblasen in der Klebstoffschicht eingeschlossen werden. Aus diesem Grund ist ein kontrollierter Klebstoffauftrag notwendig (Habenicht 1997).

### 1.3. Alterungsmethoden

Auf Holz und Holzwerkstoffe wirken im praktischen Gebrauch zahlreiche Faktoren ein, die ihr Verhalten mehr oder weniger beeinflussen und Alterungserscheinungen hervorrufen. Allgemein wurden diese Einflussfaktoren in Abbildung 5 zusammenfassen.



**Abbildung 5: Die Einflussfaktoren, die auf die Alterungs- bzw. Witterungsbeständigkeit von Holz und Holzwerkstoffen einwirken**

Allgemein sind Holz und Holzwerkstoffen im trockenen Zustand unbegrenzt haltbar. Bei geringen Holzfeuchten (< 15%) erfolgt üblicherweise auch kein Befall durch Insekten oder holzabbauende Pilze. Die hohe Haltbarkeit von Holz trifft daher vorwiegend für den Innenausbau zu. Andererseits ist Holz durch Klimawechsel Quell- und Schwindbewegungen unterworfen. Die dabei auftretenden Verformungen werden direkt auf die Klebfugen übertragen. Im Außenbereich sind Quell- und Schwinderscheinungen durch größere Klimawechsel verstärkt. Zusätzlich werden die Holzbauteile der Bewitterung ausgesetzt. Aufgrund der Einflüsse auf die Festigkeit müssen Bewitterungsstabilität aber auch Alterungsverhalten aus Sicherheitsgründen untersucht werden. Die Prüfungen sollen dabei Aussagen zulassen, wie lange ein tragendes Bauteil seine Funktionstüchtigkeit behält.

Die Beurteilung von neuentwickelten verklebten Holzbauteilen erfolgt durch die Eignungs- und Leistungsprüfungen. Die Eignungsprüfungen ermöglicht eine Unterscheidung zwischen geeigneten und ungeeigneten Materialien. Die Anforderungen für geeignete Materialien richten sich dabei nach der Art der zu erwartenden Beanspruchungen. Die Leistungsprüfungen geben die Basis für die Feststellung einzelner Anforderungen an das Material. Als Beispiel dafür kann das Dauerstandverhalten unter verschiedenen Klimabelastungen angeführt werden (Deppe und Schmidt 1979, Deppe und Schmidt 1982).

Bei den Eignungsprüfungen für Klebstoffe wurden lange Zeit Freibewitterungsversuche verwendet. Je nach Einsatz werden die Proben ungeschützt (Freibewitterung) oder unter Dach bewittert. In Tabelle 1 sind einige Bewitterungsversuche aufgelistet.

**Tabelle 1: Bewitterungsversuche von verklebten Holzbauteilen (NK: Normklima, J: Jahr, Lag.: Lagerung)**

|                    | Beschreibung                | Bedingungen |          | Dauer                 | Quelle                |
|--------------------|-----------------------------|-------------|----------|-----------------------|-----------------------|
|                    |                             | T (°C)      | r.L. (%) |                       |                       |
| <b>Bewitterung</b> | Freibewitterung             |             |          | 2,6,10,15,22 und 30 J | Raknes (1997)         |
|                    | NK                          | +20         | 65       | 2,6,10,15,22 und 30 J | Raknes (1997)         |
|                    | Geschützte Lag. unter Dach  |             |          | 2,6,10,15,und 22 J    | Raknes (1997)         |
|                    | Geschützte Lag. unter Dach  |             |          | 17 Jahre              | Egner und Kolb (1966) |
|                    | Belüftete / ungeheizte Lag. | -10/+35     | 40/80    | 2,6,10,15,22 und 30 J | Raknes (1997)         |
|                    | Geheizte Lag. im Keller     | +15/+25     | 30/60    | 2,6,10,15,22 und 30 J | Raknes (1997)         |
|                    | Lagerung A (Lag. A)         | +10/+15     | 90/95    | 5 J                   | Egner und Kolb (1966) |
|                    | Lagerung B = Lag. A +       |             | rd. 85   | 5 + 5 J               | Egner und Kolb (1966) |
|                    | Lagerung C = Lag. A +       |             | NK       | 5 + 6 J               | Egner und Kolb (1966) |

Deppe und Schmidt (1982) beschrieben, dass der Freibewitterungsversuch nur bedingt als Eignungsprüfung geeignet ist, da mehrere Faktoren bei dieser Prüfung ungünstig zu beurteilen sind:

- Der Versuch wird durch makro- und mikroklimatische Parameter verschieden stark beeinflusst.
- Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse lässt damit zu wünschen übrig.
- Die Langfristigkeit des Versuches zu Erreichung ausreichender Differenzierung ist ein weiterer gravierender Nachteil. (So hat sich herausgestellt, dass Mindestzeiträume von fünf Jahren und mehr zur Erzielung ausreichender Differenzierungen erforderlich sind.)
- Das Verfahren ist nicht genormt, so dass die bisher gewonnenen Versuchsergebnisse entweder nicht oder nur bedingt vergleichbar sind.

Geeignete Prüfungen müssen in einem möglichst kurz bemessenen Zeitraum Aussagen darüber liefern, ob der entwickelte Werkstoff für den Einsatz geeignet ist. Es wurde daher nach Möglichkeiten gesucht, um durch beschleunigte Alterung im Labor Aussagen über das Dauerstandverhalten von Klebstoffverbindungen in kürzerer Zeit durch verschärfte Klimabedingungen machen zu können. Soll ein Kurzzeitbewitterungsverfahren das langwierige Freibewitterungsverfahren ersetzen, dann muss es nach Möglichkeit alle einwirkende Parameter (Abbildung 5) beinhalten. Die Wirkung jeder Faktoren hängt von den Zeit, Temperatur und Konzentration bzw. Intensität der Beanspruchung ab.

Wie bereits in Abbildung 5 dargestellt gibt es prinzipiell fünf wesentliche Ursachen für den Abbau der Holzverklebungen in tragenden Bauteilen: Temperatur, Feuchtigkeit, Quellen und Schwinden, Chemikalien und Mikroorganismen. Eine praktisch unüberwindliche Schwierigkeit ist hierbei die Erfassung aller möglichen Einflüsse, die auf ein Bauteil während seines

Gebrauchs einwirken. Bei der Verwendung von künstlichen Alterungsmethoden mit verschärften Einflussgrößen besteht die Gefahr, dass zu scharfe Anforderungen entwickelt werden. Zusätzlich ist es möglich, dass die Alterungsprüfungen einseitig auf bestimmte Klebstoffe zugeschnitten sind, d.h. dass andere Klebstoffe, die vielleicht auch geeignet wären, durch die Auswahl der Prüfkriterien benachteiligt werden. Daher sind solche beschleunigte Alterungsprüfungen zu entwickeln, die die erwartenden Anforderungen je Anwendungsgebiet und das Alterungsverhalten der verwendeten Klebstoffe realistisch wiedergibt.

Wegen dieser Schwierigkeiten ist es nicht möglich, dass die beschleunigten Alterungsprüfungen die Bewitterungsprüfungen unter natürlichen Bedingungen exakt ersetzen. Jedoch gestatten sie durch die zweckmäßige Einstellung der Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit wertvoller Rückschlüsse auf das Verhalten der Klebverbindungen unter Dauerbelastung. Des Weiteren können damit die Mechanismen einzelner Faktoren und die damit zusammenhängende Zerstörung von Klebfugen beobachtet und besser verstanden werden.

In diesem Zusammenhang wurden von verschiedenen Autoren Untersuchungen unter statischen Klimabedingungen durchgeführt. Diese Untersuchungen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

**Tabelle 2: Zusammenstellung der Untersuchungen zur Bestimmung der Wirkungen einzelner Einflussfaktoren auf die Holzverklebungen (NK: Normklima, RT: Raumtemperatur, W: Wasserlagerung, WD: Wasserdampf, h: Stunde, T: Tag, M: Monat, J: Jahr)**

|                                   | Beschreibung                              | Bedingungen |                               | Dauer  | Quelle   |
|-----------------------------------|---|-------------|-------------------------------|--|--|
|                                   |   | T (°C)      | r.L. (%)                      |  |  |
| Nicht wechselnde Klimabedingungen | NK  | +20         | 65                            | 2,6,10,15,22 und 30 J                                | Raknes (1997)  |
|                                   | 2 M NK-Lagerung +                         | -60         |                               | 48 h   | Radovic und Goth (1994)                              |
|                                   | 2 M NK-Lagerung +                         | +50         | 72                            | 48 h   | Radovic und Goth (1994)                              |
|                                   | Trocknung                                 | +60         |                               | 24 h   | Iwata und Inagaki (2006)                             |
|                                   | 2 M NK-Lagerung +                         | +70         | 79                            | 48 h   | Radovic und Goth (1994)                              |
|                                   | Trocknung                                 | +100        |                               | 24 h   | Iwata und Inagaki (2006)                             |
|                                   |   | +70         | 20                            | 4 J  | Clad 1960  |
|                                   |   | +20         | 97                            | 4 J  | Clad 1960  |
|                                   |   | RT          | W                             | 48h  | Clad 1960  |
|                                   |   | +22,2       | W                             | 0,1,2,5,10,20,40 und 80 T                            | Northcott et al. (1968)                              |
|                                   | in kaltem Wasser                          | +30         | W                             | 3 h  | Iwata und Inagaki (2006)                             |
|                                   | nach DIN 53 254 (LF 6)                    | RT          | W                             | 4 T  | Deppe und Schmidt (1994),<br>Radovic und Goth (1994) |
|                                   | in Wasser                                 | +60         | W                             | 3 h,0,1,2,5,10,20,40 und 80 T                        | Iwata und Inagaki (2006),<br>Northcott et al. (1968) |
|                                   |   | +100        | WD                            | 0,1,2,5,10,20,40 und 80 T                            | Northcott et al. (1968)                              |
|                                   | in kochendem Wasser +<br>Abkühlung auf RT | +100        | W                             | 24, 48 und 72 h                                      | Clad 1960  |
| in kochendem Wasser               | +100                                      | W           | 3 h,0,1,2,5,10,20,40 und 80 T | Iwata und Inagaki (2006),<br>Northcott et al. (1968) |  |

Bei statischen Klimalagerungen sollen neben der Dauerbelastung von Klebfugen auch andere Faktoren, die zur Zerstörung der Klebfuge beitragen, berücksichtigt werden z.B. soll während der Lagerung unter Frosttemperatur die

Beständigkeit gegenüber niedriger Temperatur geprüft werden, bzw. sollen bei der Lagerung unter Normklimabedingungen die Wirkung von holzerstörende Bakterien und Pilzen berücksichtigt werden.

Neben der statischen Klimalagerung wurden von verschiedenen Autoren die Versuche bei zyklisch veränderten Klimabedingungen durchgeführt, um die Zusammenwirkung der Faktoren zu bestimmen, die auf die Festigkeit der Klebfuge einwirken. Einige Untersuchungen durch zyklisch wechselnde Klimabedingungen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

**Tabelle 3: Beschleunigte Alterungsprüfungen unter zyklische Klimabedingungen (NK: Normklima, RT: Raumtemperatur, W: Wasserlagerung, WD: Wasserdampf, h: Stunde, T: Tag, M: Monat, J: Jahr)**

|   | Beschreibung  | Bedingungen |          | Dauer  | Quelle   |           |
|---|---|-------------|----------|--|--|-----------|
|   |   | T (°C)      | r.L. (%) |  |  |           |
| zyklisch wechselnde Klimabedingungen                    | nach DIN 53 254 (LF 13) anschl. Kühlung in kaltem Wasser                                    | +100        | W        | 4 h  | Bröker und Blaik (1986), Deppe und Schmidt (1994), Radovic und Goth (1994) |           |
|   |   | +20         | W        | 2 h  |  |           |
|   | 48 h Wasserlagerung in RT, anschließend 3 Zyklen zu je 8h 63°C und 16h Wasserlagerung in RT | RT          | W        | 48 h   | Clad 1960  |           |
|   |   | +63         |          | 8 h  |  |           |
|   |   | RT          | W        | 16 h   |  |           |
|   | Wechselklimalagerung:   | Kochwasser  | +100     | W  | 4 h  | Clad 1960 |
|   |   | Trocknen    | 63°C     |  | 20 h   |           |
|   |   | Kochwasser  | +100     | W  | 4 h  |           |
|   |   | Abkühlen    | RT       |  |  |           |
|   | nach BS 1024 (18 Zyklen)  | 20-25       | 85-90    | 1 M  | Raknes (1997)  |           |
|   |   | 50          | 50-60    | 1 M  |  |           |
|   | nach BS 1024 (18 Zyklen)  | 20-25       | 85-90    | 1 M  | Raknes (1997)  |           |
|   |   | 25-30       | 25-30    | 1 M  |  |           |
|   | ASTM D 1037 (3 Zyklen)  | +49         | W        | 1 h  | Deppe (2000), Deppe und Schmidt (2004)                                     |           |
| +93   |   | WD          | 3 h      |  |  |           |
| -20   |   |             | 20 h     |  |  |           |
| +99   |   |             | 3 h      |  |  |           |
| +100  |   | W           | 3 h      |  |  |           |
| modifizierte ASTM D 1037 (5 Zyklen)                     | +99   |             | 18 h     | Noack und Frühwald (1976)  |  |           |
|   | +49   | W           | 1 h      |  |  |           |
|   | +100  | W           | 3 h      |  |  |           |
|   | -12   |             | 20 h     |  |  |           |
|   | +99   |             | 3 h      |  |  |           |
|   | +100  | W           | 3 h      |  |  |           |
| zyklische Alterung (2 bis 9 Zyklen)                     | +99   |             | 18 h     | Blanchet et al. (2003)   |  |           |
|   | +49   | 25          | 24 h     |  |  |           |
|   | +20   | 80          | 24 h     |  |  |           |
|   | +49   | 25          | 72 h     |  |  |           |
| ÖNORM EN 302-1, ehemalige Norm DIN 53 254 (AW 100 Test) | +20   | 80          | 48 h     |  |  |           |
|   | +100  | W           | 6 h      |  |  |           |
|   | +15   | W           | 2 h      | Deppe (2000), Deppe und Schmidt (2000 und 2004), Radovic und Goth (1994) |  |           |

|  | Beschreibung                                   | Bedingungen  |          | Dauer | Quelle                                 |                         |
|--|--|--|----------|-------|--|-------------------------|
|  |  | T (°C)   | r.L. (%) |       |  |                         |
| zyklisch wechselnde Klimabedingungen                   | CBT-Test (2-3 Zyklen)                          | +20  | W        | 3 T   | Deppe (2000), Deppe und Schmidt (2004) |                         |
|  |  | -20  |          | 1 T   |  |                         |
|  |  | +70  |          | 3 T   |  |                         |
|  | WCAMA-Test (6 Zyklen)                          | +23  | W        | 0,5 h | Deppe (2000), Deppe und Schmidt (2004) |                         |
|  |  | +104   | W        | 2 h   |  |                         |
|  |  | +104   |          | 20 h  |  |                         |
|  | VAS (Vacum-Atmospheric-Soak)                   | Vakuum: 5,06 N/cm <sup>2</sup><br>Druck: Atmosphärisch         | +49      | W     | 0,5 h                                  | Vick und Okkonen (1998) |
|  |  |  | +49      | W     | 15 h                                   |                         |
|  | VPS (Vacuum-Pressure-Soak)                     | Vakuum: 8,4 N/cm <sup>2</sup><br>Druck: 41,4 N/cm <sup>2</sup> | +20      | W     | 0,5 h                                  | Vick und Okkonen (1998) |
|  |  |  | +20      | W     | 0,5 h                                  |                         |
|  | BDB (Boil-Dry-Boil) + Kühlung in kaltem Wasser |  | +100     | W     | 4 h                                    | Vick und Okkonen (1998) |
|  |  |  | +63      |       | 20 h                                   |                         |
|  |  |  | +100     | W     | 4 h                                    |                         |
|  | Vakuum-Druck (0,1, 2,5,10,20,40 und 80 Zyklen) | Vakuum<br>in belüftetem Ofen                                   | +61      | W     | 16 h                                   | Northcott et al. (1968) |
| +61  |  |  |          | 8 h   |  |                         |
| 0, 1, 2, 5, 10, 20, 40 und 80 Zyklen                   | in belüftetem Ofen                             | +100   | W        | 4 h   | Northcott et al. (1968)                |                         |
|  |  | +61  |          | 20 h  |  |                         |
| BAM-Kurzzeitbewitterung unter Last (300 N) (10 Zyklen) |  | +20  | 95       | 4 T   | Deppe und Schmidt (1994)               |                         |
|  |  | +40  | 50       | 3 T   |  |                         |
| unter Last (15 kg) (10 Zyklen)                         |  | +20  | 90       | 4 T   | Deppe (2000)                           |                         |
|  |  | +40  | 50       | 3 T   |  |                         |

Die Alterungsversuche haben hauptsächlich zwei Langzeit-Effekte auf die Holzverklebung. Einerseits sind chemische Effekte zu nennen. Dabei werden oxydativer und hydrolytischer Abbau der Bindungen, als auch weitere Vernetzung der Komponenten der Holzwerkstoffe beobachtet. Die Geschwindigkeit dieser chemischen Reaktion hängt hauptsächlich von der Temperatur und in kleinerem Maß von dem Feuchtegehalt ab. Die Feuchtezyklen haben hingegen einen geringeren Einfluss. Der zweite langfristige Effekt ist physikalischer Natur und ist auf die wiederholende Feuchtezyklen und die daraus resultierenden Quell- und Schwindbewegungen zurückzuführen. Dadurch werden in der Klebfuge zyklisch Spannung induziert, die zu Rissbildung und zur Schädigung der Klebfuge führen können. Die beiden Effekte bestimmen die Alterung der Holzwerkstoffe im Außenbereich (Back und Sandström 1982).

Die in Abbildung 5 beschriebenen Faktoren bewirken und beschleunigen den Alterungsprozess in unterschiedener Art und Weise. Deren Beschleunigungseffekt und Wirkung auf die Plattenwerkstoffe aus Holz könnten wie folgt beschrieben werden:

- Die Reaktionsrate verdoppelt sich durch die Erhöhung der Temperatur von ca. 8°C. Die Erhöhung der Temperatur von 20 auf 100°C bewirkt demnach eine Zunahme der Reaktionsrate von ca. 1000-mal. Theoretisch entsprechen die chemischen Alterungsreaktionen in einem

22 stündigen Trocknungsprozess bei 103°C etwa den chemischen Alterungsreaktionen innerhalb von 3 Jahren bei einer Lagerungstemperatur von 20°C. Diese Temperaturwirkung auf die chemischen Reaktionen gilt sowohl bei den trockenen als auch bei den feuchten Proben (Back und Sandström 1982).

- Im feuchten oder nassen Zustand beschleunigt die Temperatur die physikalische Alterungsmechanismen, indem
  - die Erweichung der Holzkomponenten in der Platte thermisch erhöht wird. Damit wird auch die Quellungsrate erhöht und der physikalische Bruch von Bindungen beschleunigt (Back und Sandström 1982).
  - die Wasserdurchdringungsrate und Absorptions- oder Desorptionsrate von Wasserdampf erhöht werden. Dadurch werden die vorübergehende Erweichung und Kriecherscheinungen im Holz erhöht (Back und Sandström 1982).
- Durch die Erhöhung der Feuchtespanne und der Wechselrate von Klima steigen die Quellungs- und Schwindungskräfte, welche zu stärkerer Deformation oder zum Bruch der Bindungen führen kann (Back und Sandström 1982).
- Die Probengröße und die holzanatomische Orientierung verändern die Penetrationsrate von Wasser und Wasserdampf. Außerdem entstehen bei größeren Klebflächen größere Quell- und Schwindspannungen auf der Klebfuge.
- Durch die Frostlagerung können zusätzliche Spannungen entwickelt werden. Die beschleunigende Wirkung der Frostlagerung z.B. vor der Trocknung kann allerdings damit nicht erklärt werden (Back und Sandström 1982).
- Bestrahlung (z.B. durch Xenonlampe) löst chemische Reaktionen an der Oberfläche aus. Die Veränderung liegt vorwiegend in einer Abwandlung des Vernetzungsgrades und kann sowohl in einer Verstärkung als auch in einer Lockerung der molekularen Bindungen bestehen (Habenicht 1997). Die physikalischen Effekte können durch der Temperaturerhöhung auch im Inneren der Probe entstehen (Back und Sandström 1982).
- Katalysatoren z.B. Salzsäure oder NaOH und pH-Wert in Klebstoff haben bedeutende Wirkung auf chemischen Abbau der Verklebung, wie z.B. Hydrolyse von Holzkomponenten oder des Klebstoffs (Back und Sandström 1982).
- Mechanische Belastung hat auch eine beschleunigte Wirkung auf chemischen Abbau. Durch die Fügeteil- und somit auch Klebschichtverformung ergibt sich ein verändertes beschleunigtes Diffusionsverhalten der besonders schädigend wirkenden Wassermoleküle in die Klebschicht und Grenzschicht. Die durch die

Feuchtigkeit verursachten Alterungsvorgänge laufen bei mechanisch belasteten Klebfugen daher schneller ab (Habenicht 1997).

Einen gravierenden Nachteil bei allen bislang angewandten Kurzzeitprüfungsverfahren stellen die extremen Lagerungsbedingungen und die relativ kurzen bzw. wenig wiederholenden Zyklusfolgen der einzelnen Klimastufen dar. Dies hat zur Folge, dass beispielweise bei der AW-100 Kochwasserlagerung sich rasch ein Gleichgewichtszustand einstellt und das wichtigste Element (die Quell- und Schwindspannungen durch Wechsellagerung) entfällt, d.h. dass die Alterung der Proben mehr die Wirkung von extremen statischen Klimabedingungen als die Wirkung zyklischer Klimabedingungen zuzuschreibend ist (Deppe und Schmidt 1979).

#### **1.4. Holz als Füge­teilwerkstoff für tragende Holzbauteile**

Holz unterscheidet sich von den meisten anderen Werkstoffen durch seine Anisotropie, sein Quell- und Schwindverhalten, seine Porosität und wuchs- und standortbedingte strukturelle Besonderheiten. Dies ist bei der Klebstoffanwendung durch spezielle Maßnahmen beim Zuschnitt, der Konstruktion, der Vorbereitung und Verarbeitung der Füge­teile zu beachten (Zeppenfeld und Grunwald 2005).

Das Holz besteht aus drei Hauptkomponenten Lignin, Hemizellulose und Zellulose. Lignin und Hemizellulose befinden sich in einem amorphen Zustand, während Zellulose sowohl in amorphen als auch kristallinen Zustand in der Zellwand vorkommt. Je nach Holzart unterscheiden sich die Anteile dieser Substanzen im Holz. Diese drei Substanzen sind hochmolekular und verleihen aufgrund ihrer Struktur den Zellwänden des Holzes ihre Festigkeit. Neben den zellwandaufbauenden Molekülen kommen eine Reihe von Inhaltsstoffen wie u.a. Harze, Öle, Fette, Gerbstoffe, Kautschuk oder Säuren vor.

##### **1.4.1. Verhalten des Holzes unter Klimaeinflüssen**

Holz als poröses und stark hygroskopisches Material nimmt die Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Die Menge der so gebundenen Feuchtigkeit hängt insbesondere von den Faktoren Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit ab. Das so gebundene Wasser wird in und an der Zellwand gebunden. Wird Holz in Wasser gelagert oder dauerhaft mit Wasser besprüht, so wird in weiterer Folge Wasser auch in den Zellhohlräumen und in den Zelllumen eingelagert. Der Zustand, in dem die maximale Menge an Feuchtigkeit in den Zellwänden gebunden ist aber noch kein freies Wasser in den Zellhohlräumen eingelagert ist, wird als Fasersättigungsbereich bezeichnet.

Ein Wechsel des Feuchtegehalts unter Fasersättigungsbereich führt zum Quellen und Schwinden des Holzes in radialer und tangentialer Richtung (entlang der Jahrringe und in Querrichtung hierzu). Quell- und Schwindbewegungen in Längsrichtung können hingegen aufgrund der geringen Längenänderung weitgehend vernachlässigt werden. Eine reine Zellulosefaser (Kotonfaser) quillt in Wasser ungefähr 20% senkrecht zu Faserrichtung und



ungefähr 1% in Faserrichtung. In Holz wird die Quellfähigkeit der Zellulose teilweise durch das in der Zellwand eingelagerte Lignin eingeschränkt.

Wasser ist ein hervorragender Weichmacher für Hemizellulose und amorphe Zellulose. Daneben lagern kristalline Zellulose kein und Lignin nur bedingt Wasser an. Hemizellulose- und Zellulose-Ketten entstehen aus wasserbeständigen kovalenten Bindungen. Diese Holzbestandteile (Hemizellulose und Zellulose) sind aber durch die Wasserstoffbrückenbindungen (H-Brücken) miteinander gebunden, welche durch die Wirkung von Wasser einfach bricht. Hingegen bestehen zwischen dem Lignin, das etwas hydrophob ist, und hydrophile Hemizellulose kovalente Bindungen, welche nicht so einfach unter Wasserwirkung aufgebrochen werden können (Back und Sandström 1982).

Bei üblichen Temperaturen bewirkt Wasser keine chemische Veränderung des Holzes. Bei sehr langer Lagerung von Holz in Wasser kommt es jedoch zum Herauslösen bestimmter Holzinhaltstoffe, wodurch die Beständigkeit des Holzes gegenüber Insekten erhöht wird. Wirkt Wasser bei hohen Temperaturen und Drücken auf das Holz ein, kann ein hydrolytischer Abbau erfolgen (Niemz 1993).

Quellungs- und Schwindungsmaß hängen bei Holz direkt von Dichte ab. Die Hölzer mit höherer Dichte verformen sich in stärkerem Maß bei Feuchteänderungen und als Folge dazu treten höhere Spannungen auf.

Bei Temperaturschwankungen unterliegen Stoffe jeglicher Art Dimensionsschwankungen. Der materialspezifische Längenausdehnungskoeffizient ist bei Holz im Vergleich zu anderen Werkstoffen sehr gering und braucht für Standsicherheitsbetrachtungen daher im Regelfall nicht berücksichtigt zu werden.

Auch bei hohen Temperaturen tritt über längere Zeiträume hinweg keine thermische Zersetzung ein. Erst oberhalb von 60 - 80 °C finden allmähliche, mit steigender Temperatur beschleunigende chemische Veränderungsprozesse statt (Egle 2002). Wird Holz lange Zeit bei erhöhter Temperatur gelagert, verringert sich die Lebensdauer des Holzes. Bei Temperaturbelastung werden für tragende Elemente folgende Abminderungsfaktoren ( $K_t$ ) empfohlen (Niemz 1993).

|              |                       |
|--------------|-----------------------|
| 35 ... 50 °C | $K_t = 0,8$           |
| 51 ... 80 °C | $K_t = 0,6 \dots 0,7$ |

Von der Vielzahl der Holzarten, die auf der Erde existieren, werden nur wenige für Bauzwecke genutzt. In Mitteleuropa werden vorwiegend europäische Nadelholzer (Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche, europäische Douglasie) im Holzbau verwendet. Diese zeigen gute Festigkeitseigenschaften bei geringem Eigengewicht und geringe Quell- und Schwindmaße. Darüber hinaus sind sie leicht bearbeitbar und günstig.

Laubhölzer, die auch als Bauholz eingesetzt werden, sind hingegen teurer, nicht so homogen im Aufbau, haben ein deutlich höheres Eigengewicht und sind schwieriger zu bearbeiten. Laubhölzer haben eine größere Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung aber auch größere Schwind- und Quellmasse. Daher werden sie im Allgemeinen nur für spezielle Konstruktionsteile verwendet (Wesche 1988).

## **1.5. Zielsetzung**

Obwohl das Thema Klebstoffalterung jahrzehntelang untersucht wurde, sind dessen grundlegende Prinzipien in Fachliteratur wenig beschrieben. Besonders das Unglück in Bad Reichenhall, bei dem das Dach der Eisporthalle am 2. Januar 2006 einstürzte, brachte das Thema Klebstoffalterung wieder stark in Diskussion. Das Versagen der Konstruktion wurde vorrangig auf Konstruktionsfehler und auf Versagen der Klebfugen zurückgeführt.

Ziel dieser Masterarbeit ist es eine beschleunigte Alterungsmethode für verklebte Holzteile zu entwickeln. Durch die Abfolge von Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel soll die natürlichen Klimawechsel, denen ein Holzbauwerk ausgesetzt ist, simuliert werden. Weiteres Ziel war es zu untersuchen, ob unterschiedliche Klebstoffe unterschiedlich auf die künstliche Alterung reagieren. Als Zeiger für die mögliche Veränderung der Klebfugen nach künstlicher Alterung wurde die mechanische Festigkeit der Klebfugen herangezogen.

Zu diesem Zweck wurden drei verschiedene Probengeometrien verwendet: Längszugscher-, Schäft- und Quersugsproben. Die Proben wurden verklebt und den definierten Klimazyklen ausgesetzt. Ein Zyklus dauerte eine Woche und bestand aus einer Feucht- einer Kalt und einer Trockenphase. Die mechanische Festigkeit wurde nach 12 bzw. 24 Zyklen untersucht und mit unbehandelten Referenzproben verglichen. Neben den mechanischen Kennwerten wurde auch der Holzbruch der einzelnen Proben bewertet.

Mit der Masterarbeit sollte ein verbessertes Verständnis für die Alterungsmechanismen von Holzverklebungen geschaffen werden.

## 2. Material und Methode

Um die Alterung des Klebstoffs durch künstliche Klimaschwankungen zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Masterarbeit Proben mit drei unterschiedlichen Geometrien hergestellt. Bei allen Probentypen wird bei der mechanischen Prüfung die Festigkeit der Verklebung zwischen zwei Füge­teilen untersucht. Um den Einfluss der Klimaschwankungen auf die Festigkeitseigenschaften zu untersuchen, wurden parallel zu den Proben, die mit künstlichen Klimaschwankungen belastet wurden, un­behandelte Referenzproben untersucht. Diese lagerten nach ihrer Herstellung bis zur mechanischen Prüfung im Normklima. In dem nachfolgenden Kapitel sind die verwendeten Methoden sowie das eingesetzte Material näher beschrieben.

### 2.1. Material

#### 2.1.1. Klebstoffe

Für die Herstellung der Proben wurden drei verschiedene Klebstoffe verwendet: ein Melamin-Harnstoff-Formaldehyd Klebstoff (MUF, Prefere 4535, Dynea GmbH.), ein Phenol-Resorcinol-Formaldehyd Klebstoff (PRF, Prefere 4099, Dynea GmbH.) und ein Polyurethan Klebstoff (PUR, Purbond HB 110, Purpond AG., Sempach, Schweiz). Alle drei Klebstoffe sind für den tragenden Holzbau nach EN 301 und 302 zugelassen. Aufgrund ihres Einsatzgebietes weisen diese Klebstoffe eine hohe Beständigkeit gegen Wasser auf.

Die Verklebung der Proben erfolgte gemäß der Anweisungen im technischen Merkblatt der verschiedenen Klebstoffe. Die Verpressung der Zugscher- und Querszugproben erfolgte mit einer Hydraulik-Heißpresse LZT-OK 175L (Maschinenfabrik Langzauner GmbH., Lambrecht), welche einen maximalen Pressdruck von 7 MPa und ein Genauigkeitskremten von 0,028 MPa aufweist. Bei den Schäftproben wurde eine spezielle Vorrichtung für die Verklebung angewandt (siehe Abbildung 12). Alle Verklebungen wurden bei Raumtemperatur kalt verklebt. Die Lamellen wurden unter den in Tabelle 4 beschriebenen Bedingungen verpresst. Das angeführte Mischungsverhältnis gibt die Gewichtsteile (GT) des Klebstoffes und jene des Härters an.

**Tabelle 4: Zusammenstellung der Verklebungsbedingungen, des Mischungsverhältnisses (GT) und der Auftragsmenge**

| Kenngröße                            | Klebstoffsysteme |        |       |
|--------------------------------------|------------------|--------|-------|
|                                      | MUF              | PRF    | PUR   |
| Mischungsverhältnis (GT)             | 100:20           | 100:20 | -     |
| Auftragsmenge (g/m <sup>2</sup> )    | 400              | 400    | 250   |
| Pressdruck (MPa, N/mm <sup>2</sup> ) | ~ 0,7            | ~ 0,7  | ~ 0,7 |
| Presszeit (min.)                     | 420              | 840    | 180   |

## 2.1.2. Holz

Um Aussagen aus dieser Untersuchung für die Praxis treffen zu können, sollten die Holzfügeteile der Proben aus für den Holzbau relevanten Holzarten bestehen. Im Holzleimbau wird in Österreich und Mitteleuropa vorwiegend Fichte eingesetzt. Aufgrund der hohen wirtschaftlichen und technischen Bedeutung von Fichtenholz wurden alle Proben aus heimischer Fichte (*Picea abies*) hergestellt. Die Bretter, aus denen die Proben herausgeschnitten wurden, wurden vor der Probenpräparation im Normklima bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte (r.L.) gelagert. Bei der Holz Auswahl wurde besonders Augenmerk auf die Fehlerfreiheit gelegt. Wegen des Probenumfangs konnten die Proben nicht aus einem Brett hergestellt werden. Insgesamt wurden 18 Bretter der Dimension 500 x 150 mm für die Zugscherprobenherstellung, 3 Bretter der Dimension 1200 x 150 mm für die Schäftprobenherstellung und 6 Bretter der Dimension 350 x 120 mm für die Quersugsprobenherstellung verwendet.

## 2.2. Probengestaltung

Um die Klebefestigkeit zu messen, wurde drei unterschiedliche Probengeometrie ausgewählt. Jede Probengeometrie wurde mit den drei verschiedenen Klebstoffen verklebt. Bei den verschiedenen Probengeometrien handelt es sich um die gültige Normprobe für die Bestimmung der Längszugscherfestigkeit von Verklebungen (EN 302, 2004), die mit der ehemals gültigen DIN Probe für die Bestimmung der Scherfestigkeit von Schäftproben (DIN 53 253, 1964) verglichen wurde. Weiters wurde eine Probe in Anlehnung an die Bestimmung der Quersugsfestigkeit von Plattenwerkstoffen (EN 319) verwendet, um die Quersugsfestigkeit der Massivholzverklebung zu prüfen und den beiden Längszugscherprüfungen gegenüberzustellen.

Um eine Vergleichbarkeit der Prüfungsergebnisse zu schaffen, wurden die Proben durch vier stelligen Nummern gekennzeichnet. Die Nummerierung beinhaltet Klebstoffart, Brett Nummer, von welchem die Proben herausgeschnitten wurden, Behandlungsart und Probenzahl. Die Kodierung und eine Beispiel sind in Abbildung 6 dargestellt.

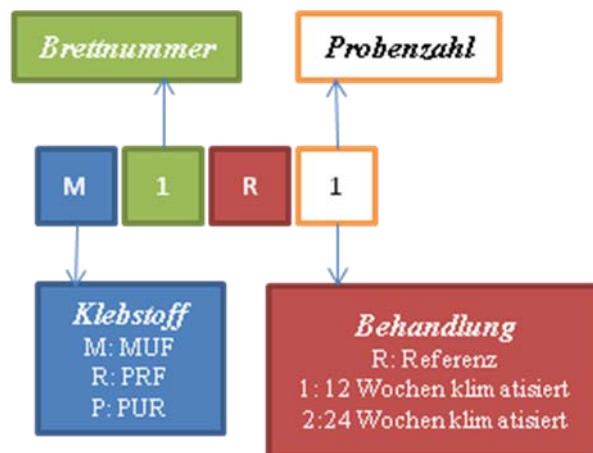


Abbildung 6: Nummerierung der Proben

Wie vorher erwähnt, wurden die Proben nicht aus einem Brett herausgeschnitten. Aufgrund von natürlicher Inhomogenität des Holzes können diese Bretter trotz absoluter Fehlerfreiheit verschiedene Eigenschaften aufweisen. Diese möglichen Unterschiede können Schwankungen bei den Festigkeitswerten der Verklebungen verursachen. Um die störende Wirkung dieser Schwankungen auf Genauigkeit der Festigkeitswerte zu vermeiden und die Vergleichbarkeit zu verbessern, wurde für jede Probengeometrie ein Schnittmuster vorbereitet. Die Bretter wurden nach diesem Muster herausgeschnitten und nummeriert. Die Nummerierung wurde so durchgeführt, dass die Proben nach ihrer Behandlungsart nicht immer am Rand oder von der Mitte eines Brettes sondern gemischt verteilt waren. In Abbildung 7, 8 und 9 sind die Bretter, aus denen die verschiedenen Proben für Zugscher-, Schäftzug- und Querszugprüfung herausgeschnitten wurden, schematisch dargestellt.

|         |         |         |
|---------|---------|---------|
| M.1.R-1 | M.1.1-1 | M.1.2-1 |
| M.1.2-2 | M.1.R-2 | M.1.1-2 |
| M.1.1-3 | M.1.2-3 | M.1.R-3 |
| M.1.2-4 | M.1.R-4 | M.1.1-4 |
| M.1.R-5 | M.1.1-5 | M.1.2-5 |

**Behandlungsart**

- Referenzproben
- 12 Klimazyklen
- 24 Klimazyklen

**Abbildung 7: Schnittmuster für Längszugscherproben aus den verklebten Holzbrettern nach ÖNORM EN 302-1 (2004) und gemischte Nummerierung auf einem Holzbrett entsprechend der Behandlungsart**

|         |         |         |          |          |
|---------|---------|---------|----------|----------|
| M.2.2-1 | M.2.1.1 | M.2.R-6 | M.2.2-9  | M.2.1.11 |
| M.2.1-1 | M.2.R-3 | M.2.2-6 | M.2.1-8  | M.2.R-11 |
| M.2.R-1 | M.2.2-4 | M.2.1-6 | M.2.R-9  | M.2.2-12 |
| M.2.2-2 | M.2.1-4 | M.2.R-7 | M.2.2-10 | M.2.1-12 |
| M.2.1-2 | M.2.R-4 | M.2.2-7 | M.2.1-9  | M.2.R-12 |
| M.2.R-2 | M.2.2-5 | M.2.1-7 | M.2.R-10 | M.2.2-13 |
| M.2.2-3 | M.2.1-5 | M.2.R-8 | M.2.2-11 | M.2.1-13 |
| M.2.1-3 | M.2.R-5 | M.2.2-8 | M.2.1-10 | M.2.R-13 |

**Abbildung 8: Schnittmuster für Schäftproben in Anlehnung an DIN 53 253 (1964) und gemischte Nummerierung auf einem Holzbrett entsprechend der Behandlungsart**

|         |         |         |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| M.1.R-2 | M.1.1-3 | M.1.2-4 | M.1.R-6 | M.1.1-7 | M.1.2-8 | M.1.R-10 | M.1.1-11 | M.1.2-12 | M.1.R-14 | M.1.1-15 | M.1.2-16 | M.1.1-18 | M.1.2-19 |
| M.1.2-1 | M.1.R-3 | M.1.1-4 | M.1.2-5 | M.1.R-7 | M.1.1-8 | M.1.2-9  | M.1.R-11 | M.1.1-12 | M.1.2-13 | M.1.R-15 | M.1.1-16 | M.1.2-17 | M.1.R-18 |
| M.1.1-1 | M.1.2-2 | M.1.R-4 | M.1.1-5 | M.1.2-6 | M.1.R-8 | M.1.1-9  | M.1.2-10 | M.1.R-12 | M.1.1-13 | M.1.2-14 | M.1.R-16 | M.1.1-17 | M.1.2-18 |
| M.1.R-1 | M.1.1-2 | M.1.2-3 | M.1.R-5 | M.1.1-6 | M.1.2-7 | M.1.R-9  | M.1.1-10 | M.1.2-11 | M.1.R-13 | M.1.1-14 | M.1.2-15 | M.1.R-17 | M.1.1-19 |

**Abbildung 9: Schnittmuster für Querszugproben und gemischte Nummerierung auf einem Holzbrett entsprechend der Behandlungsart**

### 2.2.1. Längszugscherproben nach ÖNORM EN 302-1 (2004)

Für die Längszugscherproben wurden Bretter der Größe 500 x 120 mm herausgeschnitten (Abbildung 7). Diese Bretter wurden in der Mitte aufgespalten und nachträglich mit einer Dickenhobelmaschine auf eine Dicke von 5 mm gehobelt. Die beiden aufgespaltenen Brettteile wurden anschließend miteinander verklebt. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Winkel ( $\alpha$ ) zwischen den Jahrringen zu verklebenden Fläche zwischen 30 bis 90° betrug (Abbildung 10).

Nach Aushärtung des Klebstoffs wurden die Zugscherproben mit den Probenmaßen: 150 x 20 mm aus den verklebten Brettern herausgeschnitten (Schnittmuster nach Abb. 7). Somit wurden insgesamt 270 Stück Längszugscherproben erhalten. In der Mitte der Probe wurde durch Kreissägeschnitte die Klebfuge freigelegt, wodurch eine Überlappungslänge von 10 mm entstand. Die Geometrie der Längszugscherprobe der ÖNORM EN 302-1 ist in Abbildung 10 dargestellt.

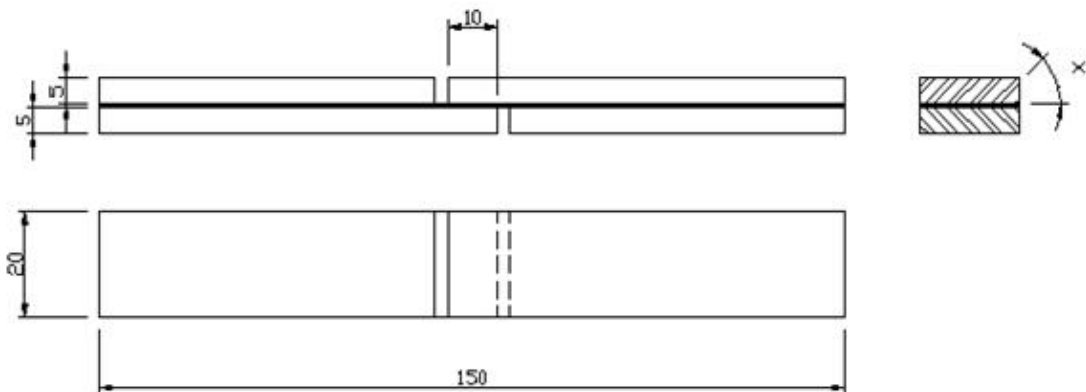


Abbildung 10: Darstellung der Zugscherprobengeometrie nach ÖNORM EN 302-1 (2004)

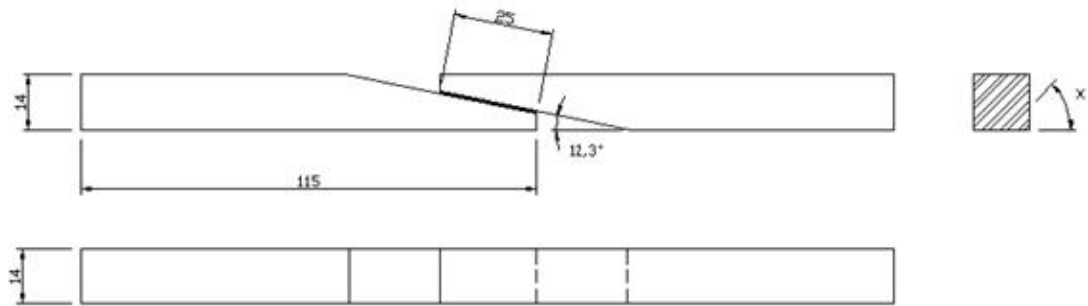
### 2.2.2. Schäftproben in Anlehnung an DIN 53 253 (1964)

Üblicherweise wird bei der Zugscherprüfung nach EN 302 im trockenen Zustand ein hoher Holzbruch beobachtet, unabhängig davon welches Klebstoffsystem verwendet wurde (Konnerth et al. 2006a). Aufgrund des hohen Holzbruchanteils kann zwischen unterschiedlichen Klebstoffsystemen bei Trockenprüfung kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Zugscherfestigkeit nachgewiesen werden (Konnerth et al. 2006a). Unter

Anwendung der Schäftprobe nach DIN 53 253 können hingegen auch bei Trockenprüfungen unterschiedliche Zugscherfestigkeit zwischen unterschiedlichen Klebsystemen nachgewiesen werden (Konnerth et al. 2006a). Im Gegensatz zur Zugscherprobe nach EN 302 ist die Schäftprobe nach DIN 53 253 auch in der Trockenprüfung durch sehr geringen Holzbruchanteil charakterisiert. Im gegebenen Fall soll die Zugscherprüfung im trockenen Zustand nach wechselnder Klimabelastung durchgeführt werden. Die oben genannte Zugscherprobe nach EN 302 wird durchgeführt, um eine Vergleichsbasis zu anderen in der Literatur genannten Festigkeitswerten zu schaffen. Mit der Schäftprobe sollten etwaige Unterschiede der Klebefestigkeit der verschiedenen Klebstoffe vor und nach Klimabelastung herausgearbeitet werden.

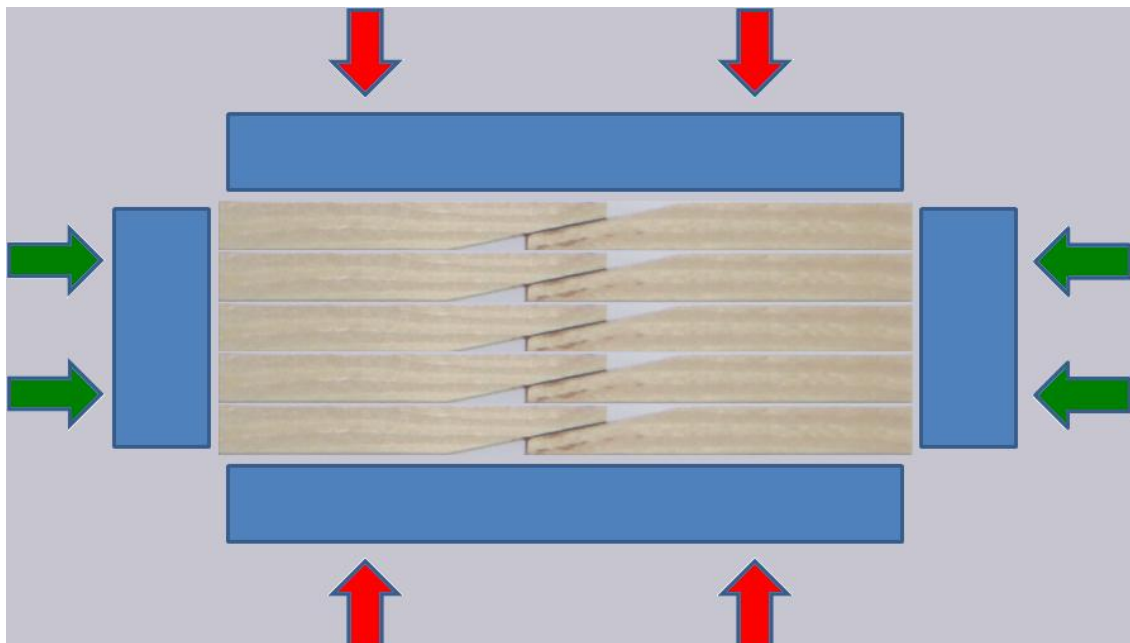
Bei verschiedenen (mehrfach nicht publizierten) Versuchen des Instituts für Holzforschung hat sich eine leicht modifizierte Probengeometrie für die Schäftprobe etabliert. Die modifizierte Schäftprobe zeichnet sich vorwiegend durch einen geringeren Präparationsaufwand aus.

Für die Herstellung der Schäftproben wurden die Holzbretter zuerst auf eine Dicke von 14 mm ausgehobelt. Von diesen Brettern wurden Holzleisten mit einem Fertigmaß von 115 mm Länge und 14 mm Breite heraus geschnitten. Die Enden der Leisten wurden durch einen Kappschnitt auf einen Winkel von  $12,3^\circ$  geschnitten und damit der Schäftwinkel festgelegt. Bei der Herstellung der Leisten wurden darauf geachtet, dass die Jahrringe möglichst stehend orientiert waren, um möglichst konstante Verklebungsbedingungen zu gewährleisten. Anschließend wurden die Teile der Proben so aufeinander geklebt, dass die Länge der entstehenden Klebefläche ca. 25 mm betrug. Die Schäftprobe in Anlehnung an DIN 53 253 (1964) wie in den Versuchen verwendet ist in Abbildung 11 dargestellt. Insgesamt wurden 240 Stück Schäftproben hergestellt und geprüft.



**Abbildung 11: Darstellung der Schäftprobengeometrie in Anlehnung an die ehemalige DIN 53 253 (1964)**

Bei der Verklebung wurde eine spezielle Vorrichtung verwendet, mit der gleichzeitig mehrere Proben verklebt werden können. Die Pressvorrichtung ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt.



**Abbildung 12: Schematische Darstellung der Pressvorrichtung für die Herstellung der Schäftproben**

Die schrägen Klebflächen der Probekörper wurden zuerst mit Klebstoff bestrichen und nebeneinander positioniert. Nachfolgend wurden die Proben durch Zwingen und Holzzulage nebeneinander zusammengepresst (rote Pfeile



in Abbildung 12). Auf der freibleibenden Seite wurde solange mäßiger Druck aufgebaut, bis sich die Proben gegeneinander verkeilten konnten. Danach wurden ein Trennpapier und die Deckplatte auf die Spannvorrichtung gelegt und fixiert, um ein Ausweichen der Proben bei der weiteren Druckerhöhung zu verhindern. Abschließend wurde wieder mittels Zwingen und Holzzulagen über die frei bleibenden Seiten der Verklebungsvorrichtung manuell der Pressdruck aufgebracht (grüne Pfeile in Abbildung 12). Nach Aushärtung wurden die Schäftproben ausgespannt und bis zur Klimabehandlung und/oder Prüfung in Normklima (20°C, 65% r.L.) mindestens eine Woche gelagert.

### 2.2.3. Querkzugproben in Anlehnung an EN 319 (1993)

Die Bretter mit der Abmessung von 350 x 120 mm wurden zuerst in der Mitte aufgespalten und nachfolgend mittels einer Dickenhobelmaschine auf die 22 mm Dicke gebracht. Diese Elemente dienten als Fügeiteil. Um die Proben in der Prüfmaschine einfacher einspannen zu können, wurden die Fügeiteile zwischen 19 mm dicke Deckplatten gelegt und aufeinander geklebt. Zum Schluss wurden vierschichtige Proben erhalten (Abbildung 9).

Von den vierschichtigen Proben wurden mittels Kreissäge in Längsrichtung 25 mm breite Streifen herunter geschnitten. Dann wurde mit Hilfe der Fräsmaschine das Profil 25 mm breit und 5 mm tief (Abbildung 13) in das geschnittene Teile eingearbeitet. Somit entstand 15 mm breite Klebkante. Anschließend wurden die geschnittene und eingearbeitete Teile durch Kreissäge 20 mm breit Quer zur Faserrichtung herausgeschnitten und endständige Probengeometrie hergestellt (Abbildung 13). Am Ende wurden insgesamt 336 Stück Querkzugproben erhalten.

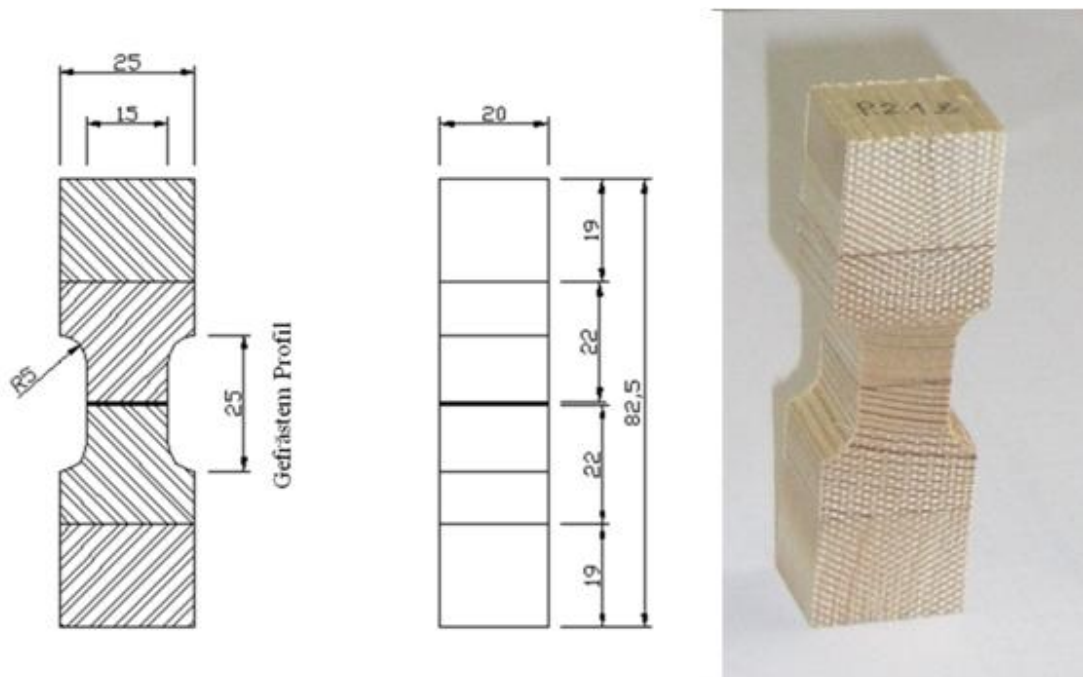


Abbildung 13: Darstellung der Querkzugproben in Anlehnung an EN 319

## **2.3. Behandlung der Proben**

Für die künstliche Alterung bzw. Klimabelastung wurde ein Zyklus mit drei Klimastufen ausgewählt. Ziel der Klimabelastung war die Proben mit möglichst starken Quell- und Schwindbewegungen des Holzes zu belasten. Die Spannungen in der Klebfuge durch die Quell- und Schwindbewegungen sollten zusätzlich durch wechselnde Feuchte und Temperaturbedingungen überlagert werden. Die einzelnen Klimastufen wurden entsprechender maximalen Bedingungen wie sie in einem Holztragwerk auftreten können gewählt. Die Abfolge wurde so gewählt, dass die Proben einer maximalen Belastung ausgesetzt wurden.

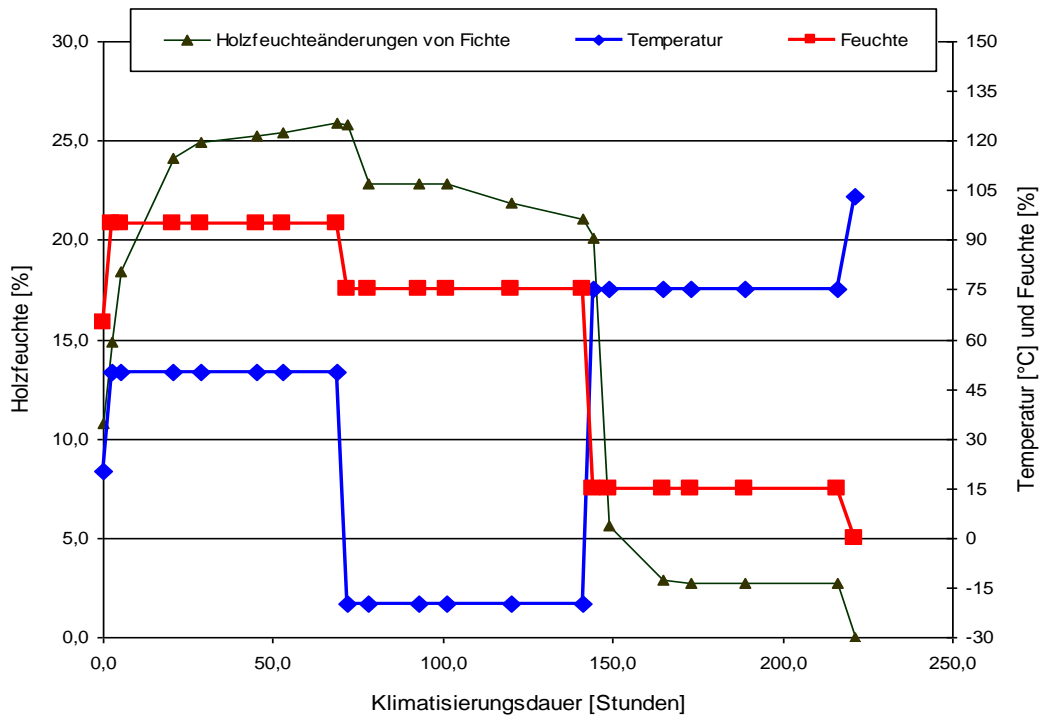
Der Klimazyklus begann mit einer mittleren Temperatur von 50°C und einer sehr hohen Luftfeuchte von 95% r.L. Darauf folgt eine Klimastufe mit sehr tiefen Temperatur von -20°C und ca. 75% r.L. Der Klimazyklus wurde mit einer Klimastufe mit einer Spitzentemperatur von 75°C und extrem niedrigen Luftfeuchte von 15% r.L. beendet. Weil der Klimaschrank bei minus Temperaturen die Luftfeuchtigkeit nur sehr bedingt regeln kann, konnte für diese Klimastufe nur ein sinkende Luftfeuchtigkeit definiert werden.

Im Vorfeld der durchgeführten Versuche wurde ein Vorversuch unternommen, um zu überprüfen, ob die einzelnen Klimabedingungen im Klimaschrank erreicht werden können, welche Übergangszeiten von einem in das andere Klima in die Gesamtklimatisierungszeit eingerechnet werden müssen und ob eine merkliche Änderung der Holzfeuchte in den Versuchsproben verzeichnet werden kann.

Für den Vorversuch und die künstliche Alterung der Proben wurde der Klimaschrank TIRAclima TCC 2025 (TIRA Umweltsimulation GmbH, Schalkau) verwendet.

### **2.3.1. Vorversuch**

Zur Bestimmung der Holzfeuchteänderungen wurden gehobelte Holzstücken aus Fichte (6 Proben), Kiefer (4 Proben), Buche (2 Proben) und Eiche (2 Proben) mit folgenden Abmessungen 10 x 20 x 150 mm (Höhe x Breite x Länge) hergestellt.



**Abbildung 14: Grafische Darstellung der Klimastufen und der zugehörigen gemessenen Holzfeuchte**

Nach dem durchgeführten Vorversuch wurden die Dateien zusammengefasst und ausgewertet (Abbildung 14). Hierbei konnte festgestellt werden, dass sich in der Klimastufe 50°C / 95% r.L. eine Holzfeuchte von ca. 25% einstelle. Während der darauf folgenden Abkühlung auf -20°C ließ sich bei einer leichten Gefriertrocknung (Rückgang um ca. 3,5%) feststellen. Die letzte Stufe 75°C / 15% r.L. rief eine starke Trocknung hervor und senkte die Holzfeuchtigkeit auf ca. 2,7%.

Vergleicht man diese gemessenen Holzfeuchtwerte mit den hygroskopischen Isothermen nach dem Loughborough Diagramm (Niemz 1993), war weiters festzustellen, dass das Probenmaterial bei den verschiedenen Klimastufen bereits eine konstante Holzgleichsfeuchte erreicht hatte.

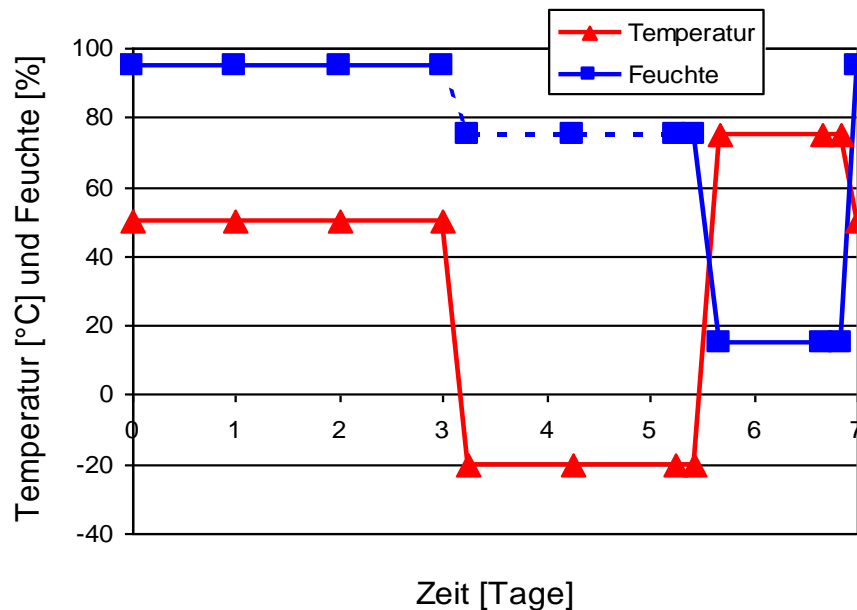
### 2.3.2. Künstliche Alterung

Durch den Vorversuch wurde bestätigt, dass durch Klimawechsellagerung unter oben beschriebenen Klimabedingungen deutliche Änderung der Holzfeuchte erreicht werden können. Die Lagerungszeit jeder Klimastufen wurde aber nach dem Vorversuch leicht modifiziert (Tabelle 5). Ziel dabei war es den gesamten Zyklus innerhalb einer Woche abzuschließen.

**Tabelle 5: Klimatisierungsstufen eines Zyklus**

| Phasen | Dauer | Klimatisierungsdaten |         |
|--------|-------|----------------------|---------|
|        |       | Temperatur           | Feuchte |
|        | (h)   | (°C)                 | (%)     |
| Beginn |       | 50                   | 95      |
| 1      | 72    | 50                   | 95      |
| 1/2    | 6     | -20                  | 75      |
| 2      | 52    | -20                  | 75      |
| 2/3    | 6     | 75                   | 15      |
| 3      | 28    | 75                   | 15      |
| 3/1    | 4     | 50                   | 95      |

Der neu definierte Zyklus der künstlichen Alterung beginnt mit der 72 stündiger Befeuchtungsphase (50°C / 95% r.L.), nach der Übergangsphase kommt die 52 stündige zweite Phase unter Gefrierpunkt (-20°C / 75% r.L.) und zum Schluss läuft die 28 stündige Trocknungsphase (95°C / 15% r.L.). Die Bedingungen der einzelnen Klimastufen wurden unten in Abbildung 15 grafisch dargestellt.



**Abbildung 15: Grafische Darstellung der Klimastufen**

Für die Versuche im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die oben beschriebenen Proben in drei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe besteht aus den Referenzproben, die unter Normklimabedingungen (20°C / 65% r.L.) gelagert wurden. Die zweite und dritte Gruppe wurden den zyklischen Klimawechseln wie oben beschrieben für 12 bzw. 24 Wochen ausgesetzt.

Nach der künstlichen Alterung wurden die Proben zumindest eine Woche im Normklima (20°C / 65% r.L.) konditioniert und danach geprüft. Die Referenzproben wurden nach 14 Wochen Lagerung im Normklima gemeinsam

mit den Proben, die 12 Wochen den zyklischen Klimabedingungen ausgesetzt waren, geprüft.

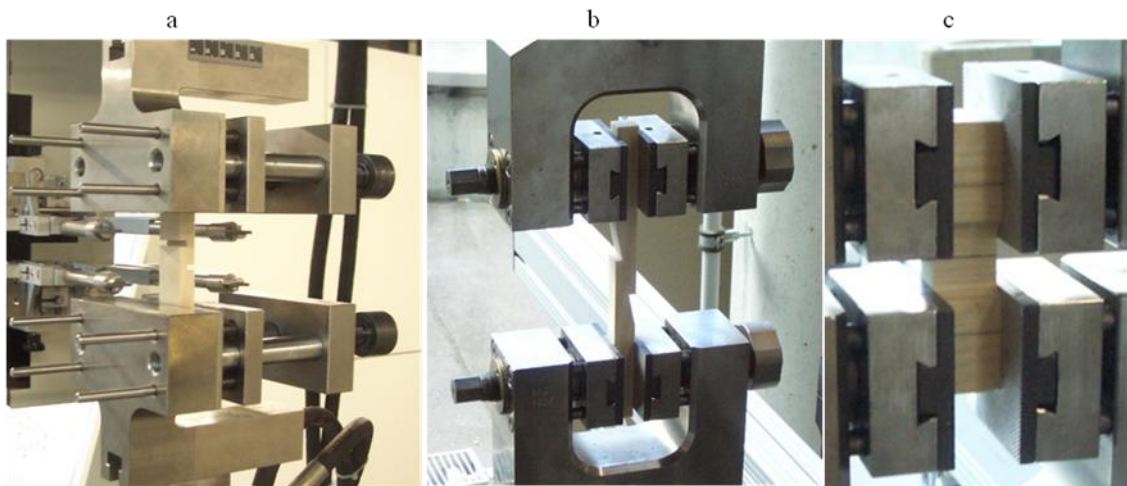
## 2.4. Bestimmung der Klebefestigkeit

Zur Bestimmung der Klebefestigkeit wurden Universalprüfmaschinen (UMP) Zwick/Roell Z100 und Z020 (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm) verwendet. Für die Messungen wurde für beide Prüfmaschinen ein 2,5 kN Kraftaufnehmer verwendet. Die Auswertungen der einzelnen Versuche wurden mittels dazu gehörigen Computerprogramm TestXpert® V11.0 durchgeführt. In Tabelle 6 wurden die Einstellungen der Maschinen für jeweiligen Prüfgeometrien beschrieben.

**Tabelle 6: Verwendete Prüfmaschinen und deren Einstellungen**

|                            | Längszugscherprüfung     | Schäftzugprüfung | Querzugprüfung   |
|----------------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| <b>Prüfmaschine</b>        | Zwick/Roell Z100         | Zwick/Roell Z020 | Zwick/Roell Z020 |
| <b>Dehnungsmessung</b>     | durch mech. Extensometer | -                | -                |
| <b>Kraftaufnehmer</b>      | 2,5 kN                   | 2,5 kN           | 2,5 kN           |
| <b>Vorkraft</b>            | 2 N                      | 10 N             | 1 N              |
| <b>Einspannlänge</b>       | 50 mm                    | 95 mm            | 20 mm            |
| <b>Prüfgeschwindigkeit</b> | 5 mm/min.                | 5 mm/min.        | 5 mm/min.        |
| <b>Prüfungsende</b>        | 50% $F_{max}$            | 50% $F_{max}$    | 50% $F_{max}$    |

Die Proben wurden in die Prüfmaschine eingespannt (Abbildung 16). Danach wurden die Proben mit dem in der Tabelle 7 angegebenen Vorkraft belastet. Anschließend wurden die Proben bis zum Bruch belastet. Bei dem Zugscherversuch wurde zusätzlich die Dehnung mittels mechanischen Extensometer gemessen.



**Abbildung 16: Positionierung der Proben in den Prüfmaschinen, a: Längszugscherprobe, b: Schäftprobe, c: Querzugprobe**

## **2.5. Bestimmung der Holzbruchanteiles**

In vorliegender Arbeit wurde der Holzfaserbelag bzw. Holzbruchanteil bei allen Proben visuell geschätzt. Die Abstufung erfolgte dabei in 5%-Schritten.

## **2.6. Statistischen Methoden**

Für die einzelnen Gruppen wurden der Mittelwert, die Standardabweichung und der Median berechnet. Alle statistischen Auswertungen und statistischen Tests wurden mit dem Softwarepaket SPSS 11.0 für Windows durchgeführt.

Ob die ermittelten Werten einer Normalverteilung entsprechen, wurden mittels Shapiro-Wilk-Test auf einem Signifikanzniveau von  $p=0,05$  überprüft. Der Vergleich der Mittelwerte erfolgte mittels einer einfaktoriellen ANOVA Varianzanalyse mit einem Signifikanzniveau von  $p=0,05$ . Da aufgrund der Probenauswahl ein paarweiser Vergleich zwischen den Referenzproben und den behandelten Proben teilweise möglich war, wurden die Proben mittels T-Test für gepaarte Stichproben ( $p=0,05$ ) verglichen. Außerdem wurden die Klebstoffe für die einzelnen Prüfmethode (Zugscher-, Schäft- und Querzugproben) innerhalb der einzelnen Behandlungsstufen (Referenzproben, 12 Wochen und 24 Wochen Klimazyklen) miteinander mittels Tukey-Test auf einem Signifikanzniveau von  $p=0,05$  verglichen.

### 3. Ergebnisse

Um eine klare Übersicht zu schaffen, wurden die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen sowohl graphisch als auch tabellarisch zusammengefasst.

Aufgrund von versuchstechnischen Fehlern wurden einige fehlerhafte Prüfwerte ermittelt. Diese fehlerhaften Werte wurden mittels Ausreißertests statistisch ermittelt und von der weiteren statistischen Analyse ausgeschlossen.

#### 3.1. Längszugscherprüfung nach ÖNORM EN 302-1 (2004)

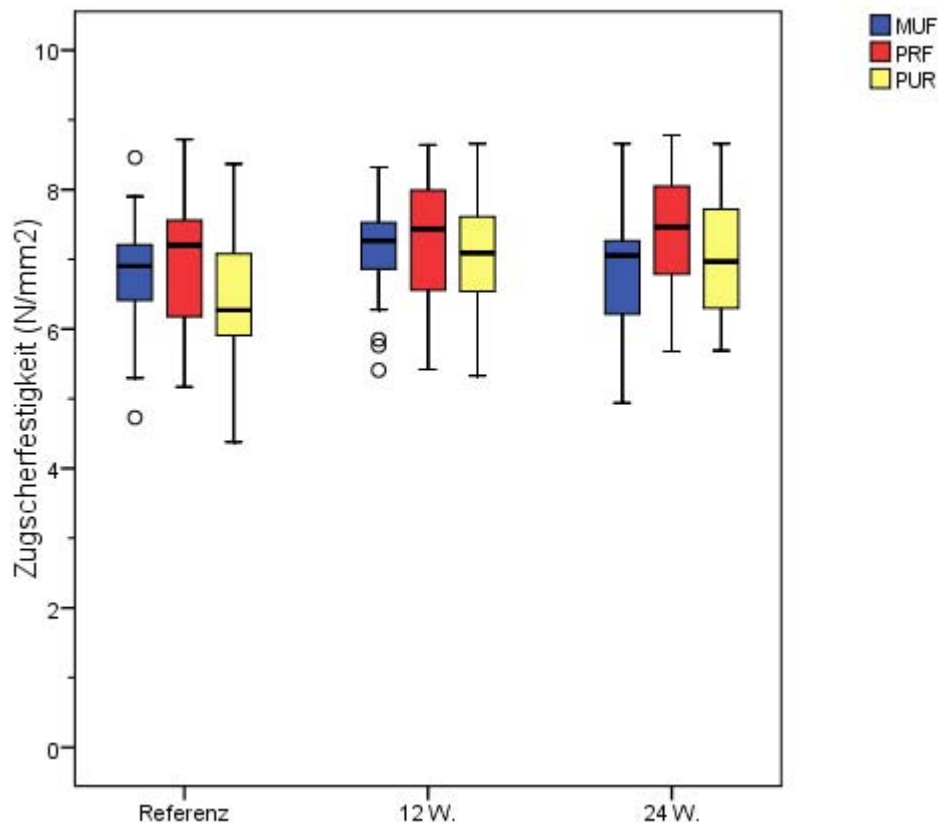
In Tabelle 7 sind die ermittelten Werte aus den Längszugscherprüfungen zusammengefasst. In Abbildung 17 wurden die Zugscherfestigkeitswerte grafisch in Form des Box-Plots mit dem Median, der oberen und der unteren Quartil dargestellt.

**Tabelle 7: Übersicht der Ergebnissen der Längszugscherprüfung ( $\tau$ : Mittelwert der Zugscherfestigkeit,  $s$ : Standardabweichung,  $\epsilon$ : Dehnung)**

| Klebstoff | Alterungsdauer | $\tau$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $s$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $\epsilon$<br>(%/%) | Holzbruchanteil<br>(%) |
|-----------|----------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| MUF       | Referenz       | 6,78                           | 0,76                        | 0,50                | 95                     |
|           | 12 Wochen      | 7,16                           | 0,69                        | 0,49                | 97                     |
|           | 24 Wochen      | 6,91                           | 0,91                        | 0,59                | 93                     |
| PRF       | Referenz       | 6,92                           | 0,90                        | 0,52                | 90                     |
|           | 12 Wochen      | 7,31                           | 0,87                        | 0,54                | 90                     |
|           | 24 Wochen      | 7,35                           | 0,81                        | 0,55                | 87                     |
| PUR       | Referenz       | 6,45                           | 0,92                        | 0,67                | 85                     |
|           | 12 Wochen      | 7,14                           | 0,84                        | 0,56                | 89                     |
|           | 24 Wochen      | 6,99                           | 0,83                        | 0,61                | 79                     |

Wie in Abbildung 17 dargestellt, ergaben die Zugscherproben bei allen Klebstoffarten sehr ähnlichen Festigkeitswerten. Nach durchgeführtem Tukey-Test unterschieden sich die Festigkeitswerte der Klebstoffarten in keinen Alterungsstufen signifikant ( $p=0,05$ ) voneinander.

Im Vergleich der Mittelwerte durch einfaktorielle ANNOVA wiesen die Festigkeitswerte der mit MUF- und PRF-verklebten Zugscherproben keine signifikante Unterschied während der Alterung auf, d.h. dass durch die Alterungsbehandlung keinen signifikanter Einfluss auf die Zugfestigkeit nachgewiesen werden konnte. Die Festigkeit der mit PUR-Klebstoff verklebten Zugscherproben stieg dennoch signifikant durch die Wirkung künstlicher Alterung an.



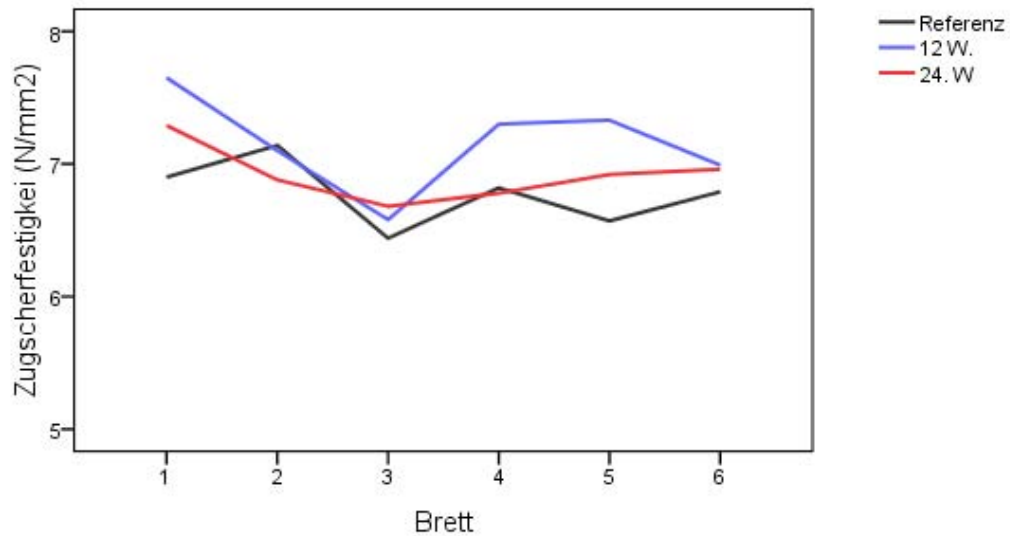
**Abbildung 17: Zugscherfestigkeit der MUF- PRF- und PUR-Verklebungen nach EN 302-1 in den einzelnen Alterungsstufen**

Die Längszugscherproben wurden aus verklebten Brettern hergestellt. Es wurde daher unterstellt, dass sich die Bretter aufgrund der Verklebung und der natürlichen Variabilität der verwendeten Hölzer voneinander unterschieden. Um den Einfluss des Holzes auf die statistische Analyse zu berücksichtigen, wurden die Proben in kleinen Gruppen unterteilt. Bei Längszugscherprüfung wurden die Proben aus je einem Brett (Abbildung 7) als eine Gruppe betrachtet. Dementsprechend wurden für je ein Brett der Mittelwert für die Referenzproben und die jeweils für 12 bzw. 24 Wochen gealterten Proben berechnet. Die Mittelwerte der einzelnen Bretter sind für die verschiedenen Klebstoffe in Abbildung 18, 19 und 20 dargestellt. Für eine weitere statistische Auswertung wurden nun die Mittelwerte der Referenzproben (R) sowie der Alterungsstufen mit 12 Wochen Alterung (12W) und mit 24 Wochen Alterung (24W) mittels T-Test für gepaarte Stichproben miteinander verglichen.

Der Vergleich der MUF-Verklebungen zwischen den Alterungsstufen R und 12W zeigte eine signifikante Anhebung der Zugscherfestigkeit (Signifikanzniveau  $p=0,05$ ). Hingegen lieferte der statistische Vergleich zwischen Referenzproben und Proben, die 24 Klimazyklen ausgesetzt wurden, keinen signifikanten Unterschied. In Abbildung 18 sind die Zugscherfestigkeiten der einzelnen Bretter dargestellt. Der direkte Vergleich der einzelnen Bretter zeigt, dass die Referenzproben bis auf ein Brett deutlich unter den Festigkeitswerten der 12 Wochen „gealterten“ Proben lagen. Die Hypothese, dass das Ausgangsmaterial sowie die jeweilige Verklebung einen signifikanten

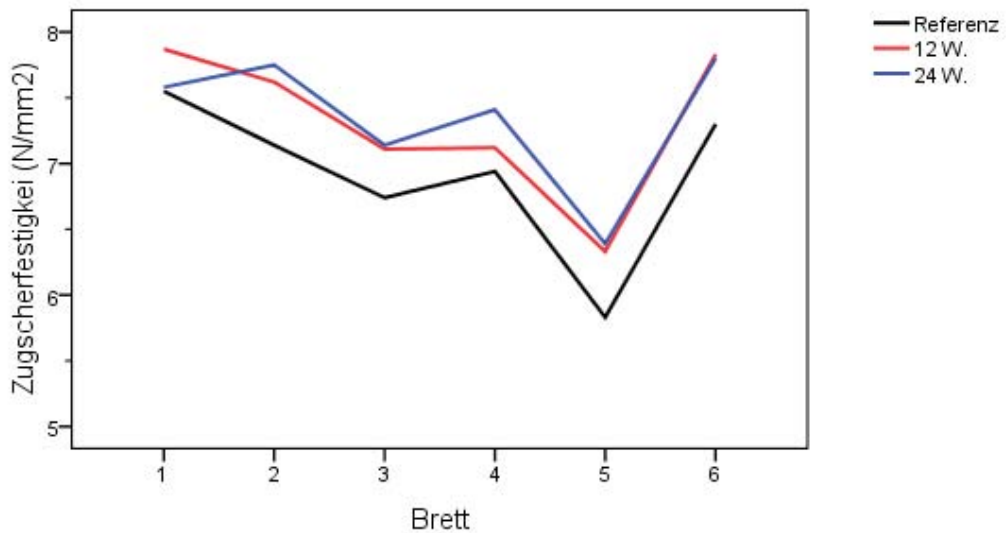


Einfluss auf die Festigkeitswerte der aus einem Brett gewonnen Proben haben, hat sich daher bestätigt.



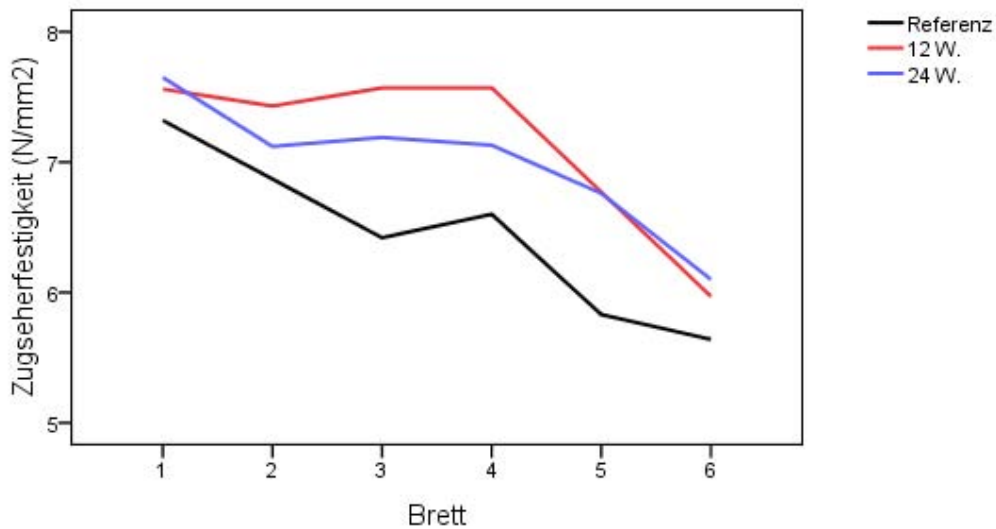
**Abbildung 18: Mittlere Zugscherfestigkeiten der von einem mit MUF-Klebstoff verklebten Brett herausgeschnittenen Proben in einzelnen Alterungsstufen**

Die Zugfestigkeiten der PRF-verklebten Referenzproben unterscheiden sich von den Zugfestigkeiten der 12 und 24 Wochen behandelten Proben. Dennoch hatte die Alterung keinen signifikanten Einfluss auf die Zugscherfestigkeit in Gruppe 12W und 24W (siehe Abbildung 19).



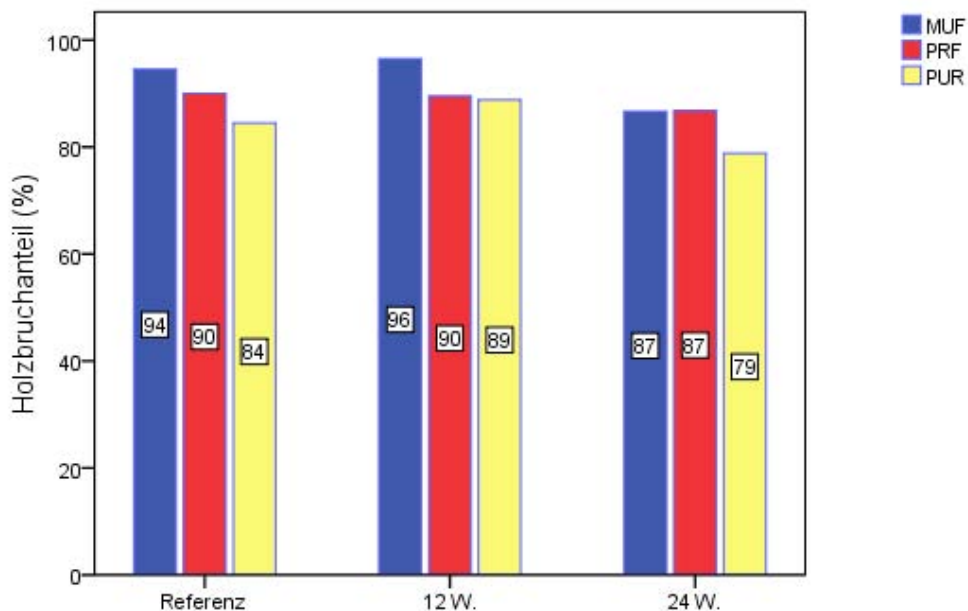
**Abbildung 19: Mittlere Zugscherfestigkeiten der von von einem mit PRF-Klebstoff verklebten Proben in einzelnen Alterungsstufen**

Die mittleren Zugfestigkeiten der PUR-Verklebungen sind im Vergleich der Alterungsstufen R mit 12W und 24W bei  $p=0,05$  signifikant verschieden voneinander. Dagegen wurde zwischen den Alterungsstufen 12 W und 24W keine signifikante Änderung nachgewiesen. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 20 dargestellt.



**Abbildung 20: Mittlere Zugseherfestigkeiten der von einem mit MUF-Klebstoff verklebten Proben in einzelnen Alterungsstufen**

In Abbildung 21 ist der Holzbruch in den einzelnen Alterungsgruppen mittels Balkendiagramm grafisch dargestellt. Alle Alterungsklassen und Verklebungen wiesen hohe Holzbruchanteile von über 80% auf. Die mittleren Holzbruchanteile der MUF- und PUR-Verklebungen erhöhte sich zuerst durch 12 Woche Klimatisierung geringfügig. Bei PRF zeigte sich hingegen zwischen den Referenzproben und den 12 Wochen gealterten Proben kein Unterschied. Bei weiterer Klimatisierung (24 Wochen) wurde für alle Klebstoffe eine geringfügige Abnahme des Holzbruchs beobachtet.



**Abbildung 21: Holzbruchanteil der Verklebungen der Referenzproben und der unterschiedlich lang gealterten Proben bei der Längszugscherprüfung**

### 3.2. Schäftzugprüfung in Anlehnung an DIN 53 253

Die Ergebnisse der Schäftzugprüfung sind in der Tabelle 8 zusammengefasst. In Abbildung 22 sind die Zugfestigkeitswerte grafisch in Form von Box-Plot mit dem Median, der oberen und der unteren Quartil dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht der Ergebnissen der Schäftzugprüfung ( $\tau$ : Mittelwerte der Zugfestigkeit,  $s$ : Standardabweichung)

| Klebstoff | Alterungsdauer | $\tau$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $s$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Holzbruchanteil<br>(%) |
|-----------|----------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| MUF       | Referenz       | 7,08                           | 1,00                        | 35                     |
|           | 12 Wochen      | 7,89                           | 1,07                        | 23                     |
|           | 24 Wochen      | 7,56                           | 1,12                        | 20                     |
| PRF       | Referenz       | 7,89                           | 1,10                        | 6                      |
|           | 12 Wochen      | 8,55                           | 1,34                        | 9                      |
|           | 24 Wochen      | 8,01                           | 0,90                        | 6                      |
| PUR       | Referenz       | 9,22                           | 1,37                        | 3                      |
|           | 12 Wochen      | 10,55                          | 1,58                        | 13                     |
|           | 24 Wochen      | 10,37                          | 1,90                        | 14                     |

Bei der durchgeführten einfaktoriellen ANNOVA auf dem Signifikanzniveau  $p=0,05$  unterscheiden sich die mittlere Zugfestigkeiten der MUF- und PUR-Verklebungen durch die zyklischen Alterung signifikant voneinander, was bei der PRF-Verklebungen nicht der Fall ist. Bei PRF wurde statistisch kein Festigkeitsunterschied durch zyklische Alterung nachgewiesen.

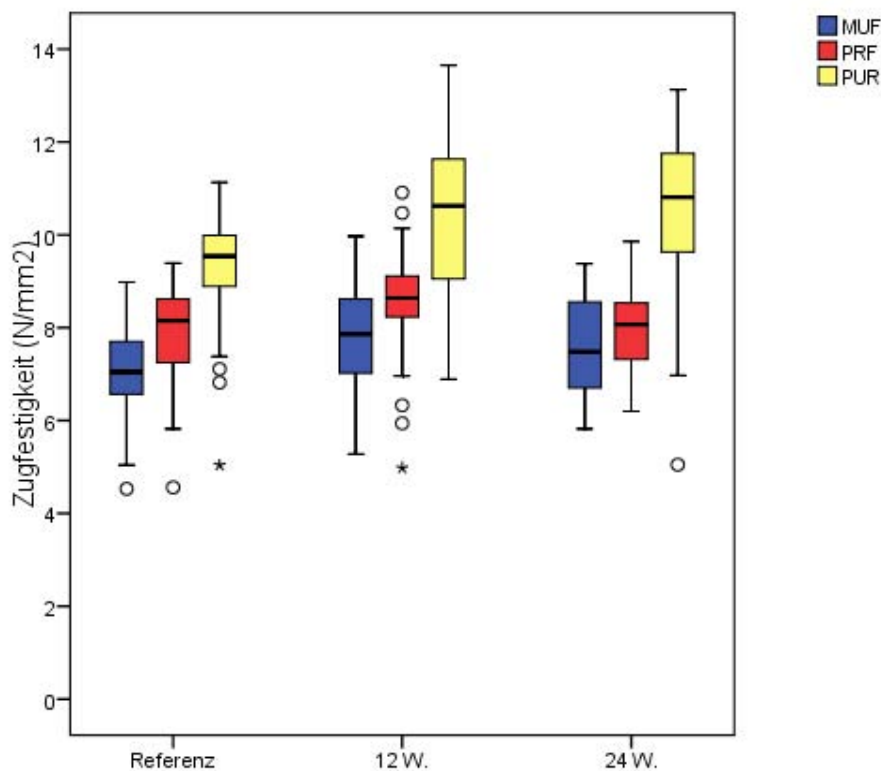


Abbildung 22: Zugfestigkeit der MUF- PRF- und PUR-Verklebungen in den einzelnen Alterungsstufen bei geschäftete Probengeometrie

Bei den unbehandelten Referenzproben zeigt sich nach Tukey-Test ein signifikanter Unterschied ( $p=0,05$ ) zwischen drei Verklebungsvarianten. MUF lieferte mit 7,1 MPa die geringste Zugscherfestigkeit, mit PUR wurde mit 9,2 MPa die höchste Zugscherfestigkeit beobachtet. Die Festigkeitswerte der MUF- und PRF-Klebstoffe unterscheiden sich die nur bei Referenzproben voneinander. Bei anderen Alterungsstufen konnten keinen Unterschied statistisch nachgewiesen werden. Die Festigkeitsunterschiede zwischen PUR- und MUF- Verklebungen bzw. zwischen PUR- und PRF-Verklebungen bei allen Alterungsstufen auch statistisch nachgewiesen.

Weiters wurden die Proben auf Schnittmuster in kleinen Gruppen eingeteilt. Die Darstellung von 1. und 2. Gruppe wurde in Abbildung 23 dargestellt. Die weiteren Gruppierungen wurden in gleichem Sinn fortgesetzt. Es wurde angenommen, dass die Bedingungen in diesen Gruppen außer der Alterung gleich sind. Die mittlere Zugfestigkeit der Proben, die sich in einer Gruppe befinden, wurde paarweise nach Alterungsstufen (R mit 12W und mit 24W sowie 12W mit 24W) durch T-Test verglichen.

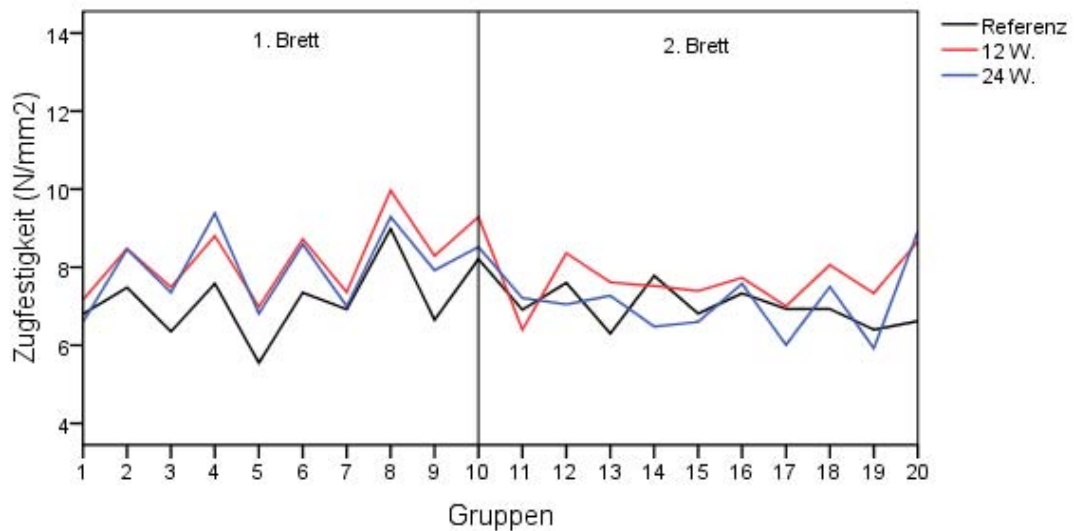
1. Gruppe

|         |         |         |          |          |
|---------|---------|---------|----------|----------|
| M.2.2-1 | M.2.1.1 | M.2.R-6 | M.2.2-9  | M.2.1.11 |
| M.2.1-1 | M.2.R-3 | M.2.2-6 | M.2.1-8  | M.2.R-11 |
| M.2.R-1 | M.2.2-4 | M.2.1-6 | M.2.R-9  | M.2.2-12 |
| M.2.2-2 | M.2.1-4 | M.2.R-7 | M.2.2-10 | M.2.1-12 |
| M.2.1-2 | M.2.R-4 | M.2.2-7 | M.2.1-9  | M.2.R-12 |
| M.2.R-2 | M.2.2-5 | M.2.1-7 | M.2.R-10 | M.2.2-13 |
| M.2.2-3 | M.2.1-5 | M.2.R-8 | M.2.2-11 | M.2.1-13 |
| M.2.1-3 | M.2.R-5 | M.2.2-8 | M.2.1-10 | M.2.R-13 |

2. Gruppe

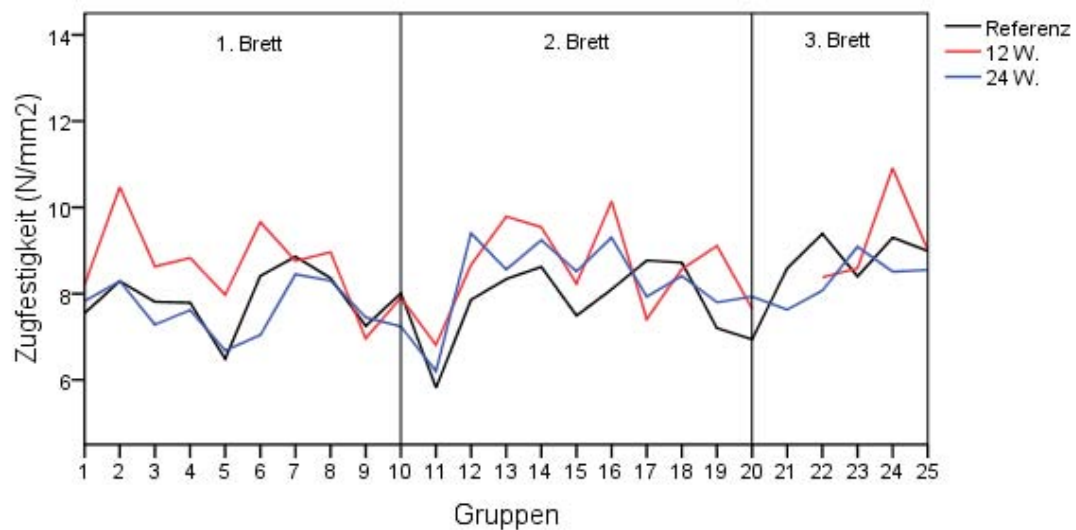
**Abbildung 23: Darstellung von Gruppierung der Schäftproben auf Schnittmuster**

Bei der Schäftzugprüfung trat zwischen Referenz und 12 wöchiger Alterung der MUF-Verklebungen eine signifikante Zunahme der Festigkeit auf. Hingegen wurden keinen Festigkeitsunterschied zwischen den 12- und 24-wöchiger Alterung nachgewiesen. Die Festigkeitswerte der 24 Wochen gealterten Proben lagen auch signifikant über den Festigkeitswerten der Referenzproben. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 24 gut erkennbar.



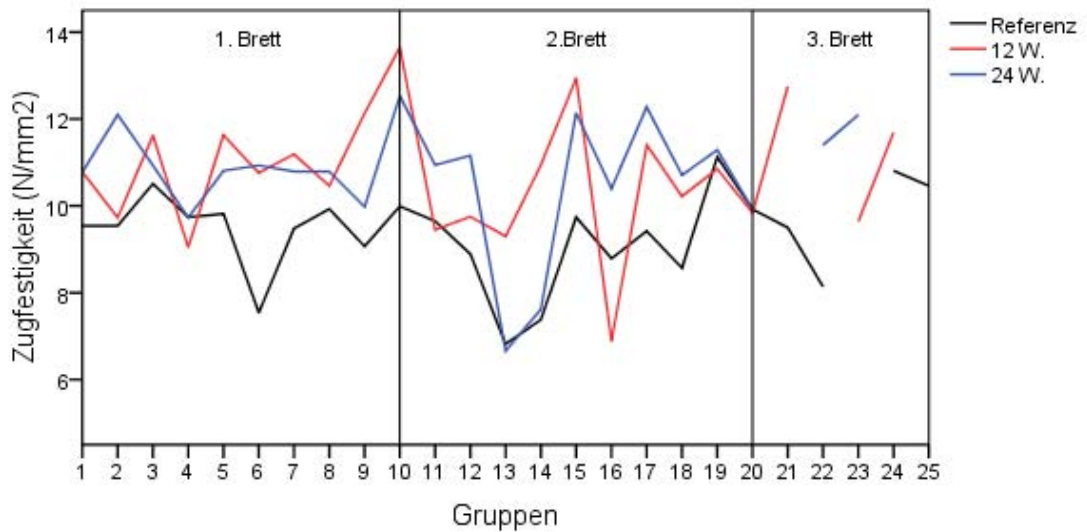
**Abbildung 24: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen der geschäfteten Proben, verklebt mit MUF-Klebstoff**

Die PRF-Verklebungen ergaben eine signifikante Festigkeitszunahme nach 12 Klimazyklen gegenüber Referenzproben. Dagegen trat ein signifikanten Festigkeitsabfall bei 24 Wochen gealterten Proben im Vergleich zu 12 Wochen gealterten Proben auf. Zwischen den Festigkeitswerten von Referenz- und 24 Wochen gealterten Proben wurde keine Änderung statistisch nachgewiesen. Die Unterschiede sind in der Abbildung 25 erkennbar.



**Abbildung 25: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen der geschäfteten Proben, verklebt mit PRF-Klebstoff**

Auch bei den mit PUR verklebten Schäftproben konnte nach 12 Wochen Klimabelastung eine Zunahme der Festigkeit gegenüber den unbehandelten Referenzproben beobachtet werden. Ebenfalls lagen die Festigkeitswerte der 24 Woche Klimabelasteten Proben signifikant über den Festigkeitswerten der Referenzproben. Der Vergleich der 12 und 24 Wochen behandelten Proben lieferte hingegen keinen signifikanten Unterschied. Die Unterschiede sind in Abbildung 26 dargestellt.



**Abbildung 26: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen der geschäfteten Proben, verklebt mit PUR-Klebstoff**

Die Mittelwerte des Holzbruchanteils der verschiedenen Verklebungen der Referenzproben und der mit Klimazyklen behandelten Proben sind in Abbildung 27 mittels Balkendiagramm grafisch dargestellt. Im Vergleich zu den Zugscher- und Querszugproben wurden bei den Schäftproben relativ niedrigere Holzbruchanteile ermittelt. Die höchsten Werte wurden bei den MUF-Verklebungen ermittelt. Die mit MUF verklebten Referenzproben lieferten einen Holzbruchanteil von 35%. Mit der Klimabelastung nahm der Holzbruchanteil im Mittel auf 23 bzw. 20% ab. Der Holzbruchanteil der PRF-Verklebungen lag bei allen Proben unter 10%. Bei den PUR-Proben lag der Holzbruchanteil der Referenzproben im Mittel bei 3%, hingegen konnte für die klimabehandelten Proben ein etwas höherer Holzbruchanteil von 13 bzw. 14% beobachtet werden.

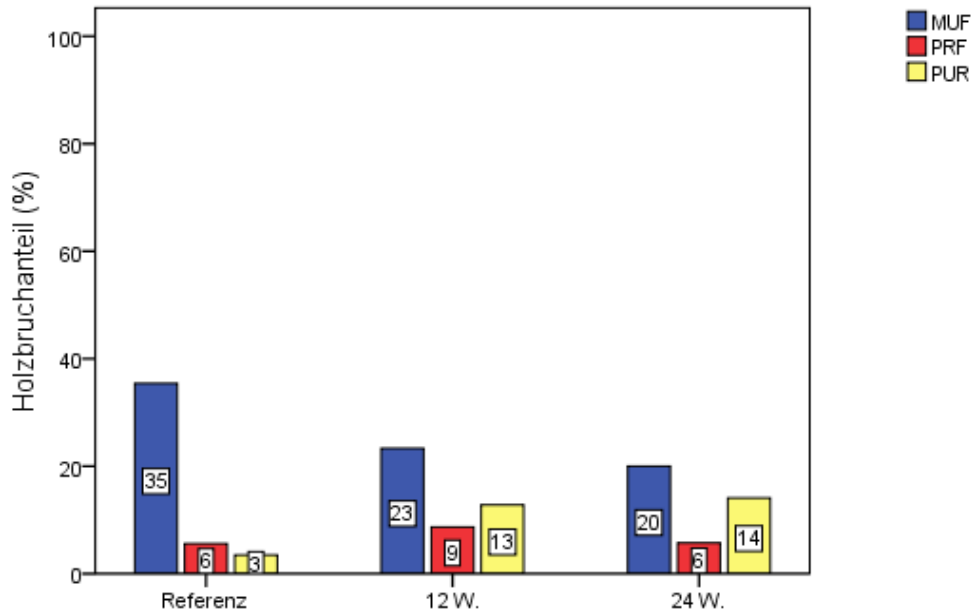


Abbildung 27: Holzbruchanteil der Verklebungen in einzelnen Alterungsstufen bei der Schätzugprüfung

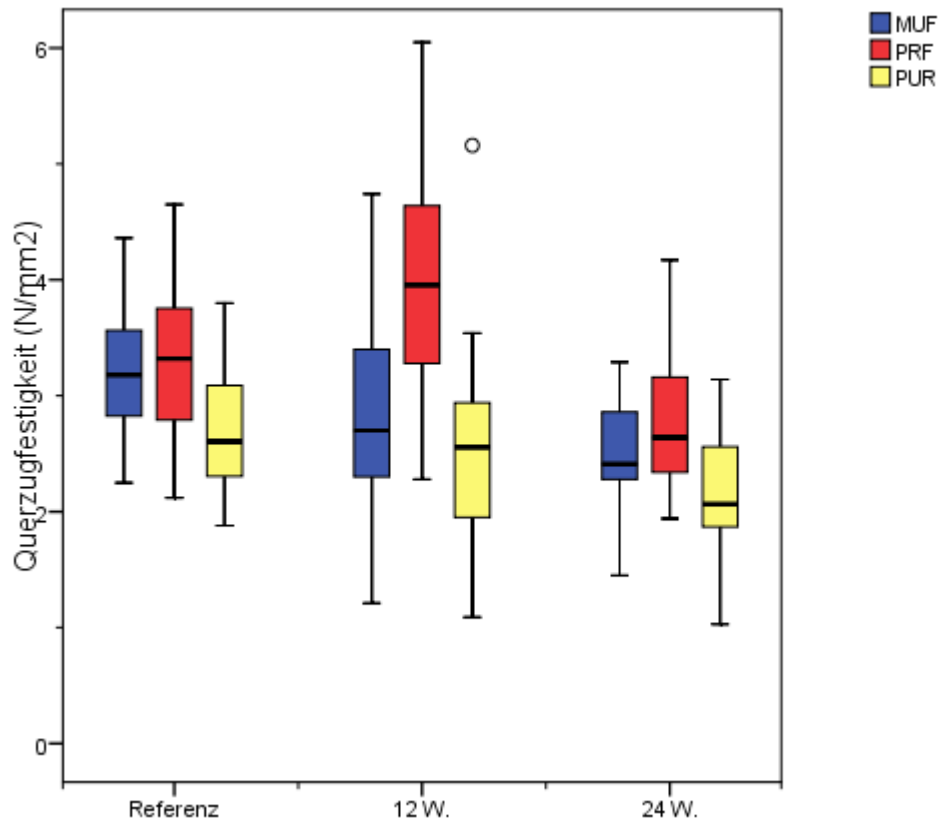
### 3.3. Querzugprüfung in Anlehnung an EN 319

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Querzugprüfung zusammengefasst. In Abbildung 28 wurden die Zugscherfestigkeitswerte grafisch in Form von Box-Plot mit dem Median, der oberen und der unteren Quartil dargestellt.

Tabelle 9: Übersicht der Ergebnissen der Querzugprüfung ( $\sigma$ : Zugfestigkeit  $s$ : Standardabweichung)

| Klebstoff | Alterungsdauer | $\sigma$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | s<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Holzbruchanteil<br>(%) |
|-----------|----------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------|
| MUF       | Referenz       | 3,21                             | 0,50                      | 93                     |
|           | 12 Wochen      | 2,80                             | 0,75                      | 85                     |
|           | 24 Wochen      | 2,50                             | 0,41                      | 89                     |
| PRF       | Referenz       | 3,30                             | 0,64                      | 76                     |
|           | 12 Wochen      | 3,99                             | 0,86                      | 82                     |
|           | 24 Wochen      | 2,83                             | 0,61                      | 92                     |
| PUR       | Referenz       | 2,68                             | 0,49                      | 100                    |
|           | 12 Wochen      | 2,50                             | 0,79                      | 100                    |
|           | 24 Wochen      | 2,20                             | 0,52                      | 98                     |

Bei der Querzugprüfung weisen die mittlere Festigkeiten aller Verklebungen nach der durchgeführten einfaktoriellen ANNOVA ( $p=0,05$ ) einen signifikanten Unterschied auf, d.h. dass die Alterungsbehandlung bei allen untersuchten Klebstoffarten einen Einfluss auf die Querzugfestigkeit hat.

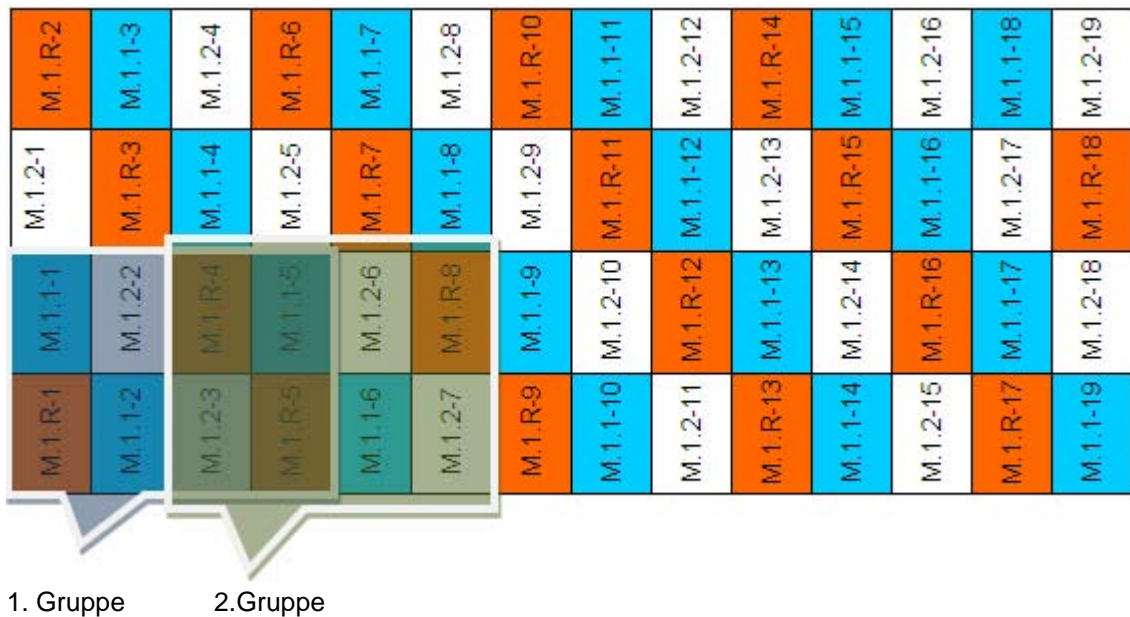


**Abbildung 28: Querzugfestigkeit der MUF- PRF- und PUR-Verklebungen in den einzelnen Alterungsstufen**

Der statistische Vergleich der MUF- und PRF-Klebstoffen nach ihren Festigkeitswerten mittels Tukey-Test ( $p=0,05$ ) zeigte, dass die unterschiedlichen Referenzproben kein signifikanter Festigkeitsunterschied aufwiesen. Hingegen lagen die PUR verklebten Proben signifikant unterhalb der MUF und PRF verklebten Proben. Bei nachfolgenden behandelten Proben (12 W) lagen die Festigkeitswerte des PRF-Klebstoffes signifikant über den Festigkeitswerten des MUF- und PUR-Klebstoffes. Nach 24 Wochen Behandlung erlitten die PRF-Proben einen starken Festigkeitsabfall, obwohl deren Festigkeiten noch immer signifikant über den Festigkeiten der MUF- und PUR-Verklebungen lagen. Insgesamt lagen alle Klebstoffe nach der zweiten Alterungsstufe unter den Referenzproben und den 12 Wochen behandelten Proben. Die Querzugfestigkeiten der mit PUR verklebten Proben lagen nach 24 Wochen künstlicher Alterung signifikant unter den MUF und PUR verklebten Proben.

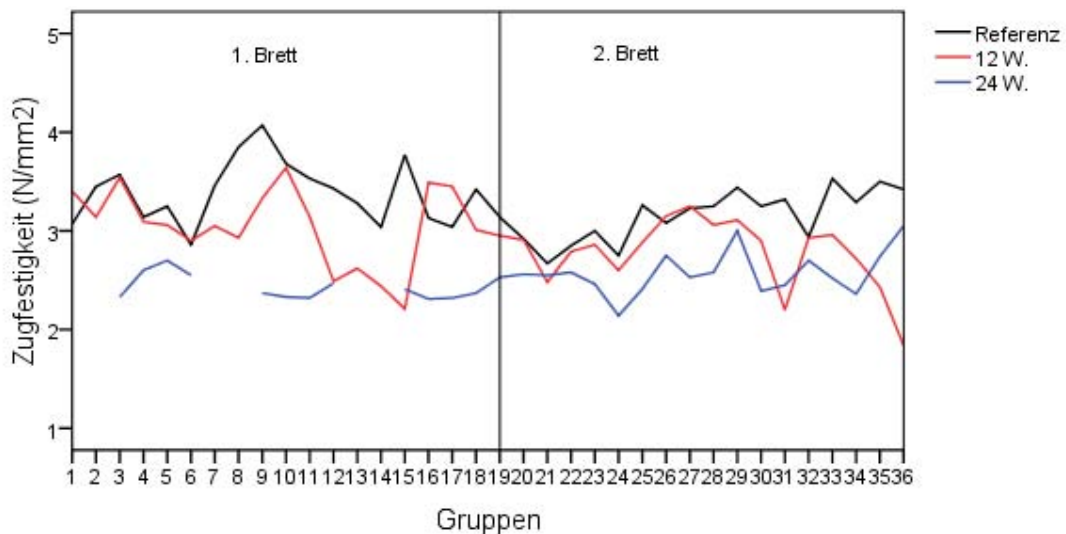
Die Querzugproben wurden auch wie bei den Schäftproben auf Schnittmuster (Abbildung 29) in kleinen Gruppen eingeteilt und paarweise durch T-Test verglichen. Die Gruppierung wurde in Abbildung 29 dargestellt. Die weiteren Gruppierungen wurden in gleichem Sinn fortgeführt.





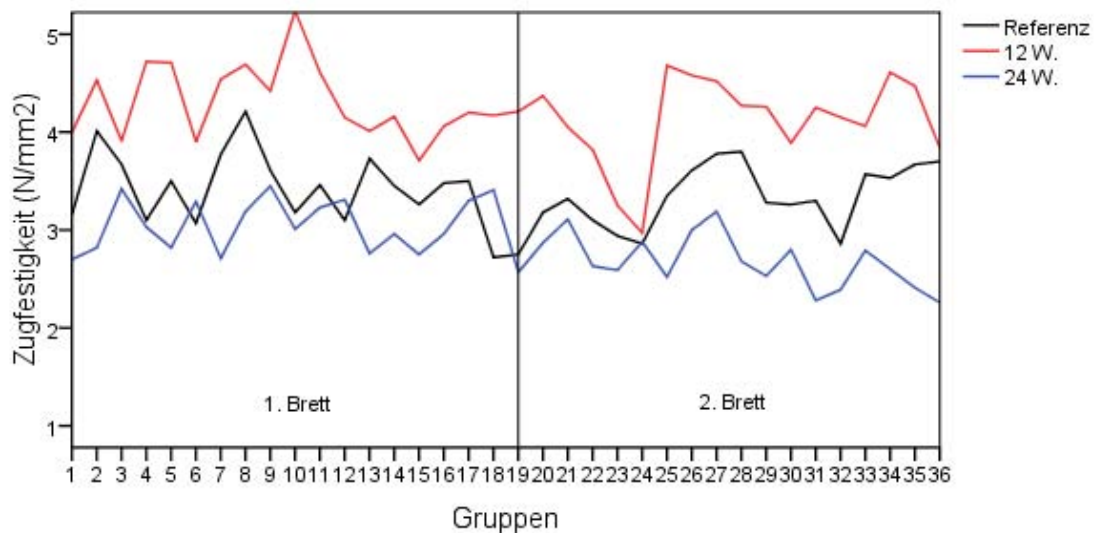
**Abbildung 29: Darstellung der Gruppierung der Quersugproben auf Schnittmuster**

Nach paarigem T-Test wiesen MUF-Verklebungen einen statistisch gesicherten linearen Abfall durch die zyklische Alterung auf. Die Unterschiede sind in Abbildung 30 dargestellt.



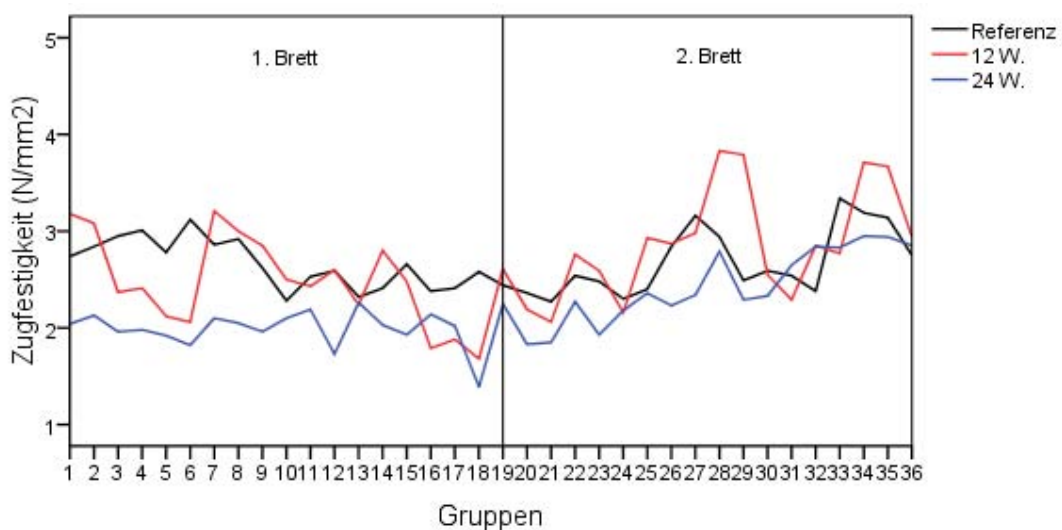
**Abbildung 30: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen bei Quersugproben, verklebt mit MUF-Klebstoff**

Die PRF-Verklebungen zeigten nach 12 Wochen Alterung interessanterweise eine starke Festigkeitszunahme, welche statistisch nachgewiesen wurden. Dagegen ergaben die mit PRF-verklebten Proben nach 24 Wochen Behandlung einen starken Festigkeitsabfall. Dieser Festigkeitsabfall führte dazu, dass die Festigkeitswerte signifikant unterhalb der Festigkeiten der Referenz- und 12 Wochen gealterten Proben lagen. Dieser Festigkeitsabfall ist nach 24 Wochen Klimabehandlung in Abbildung 31 gut erkennbar.



**Abbildung 31: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen bei Querzugproben, verklebt mit PRF-Klebstoff**

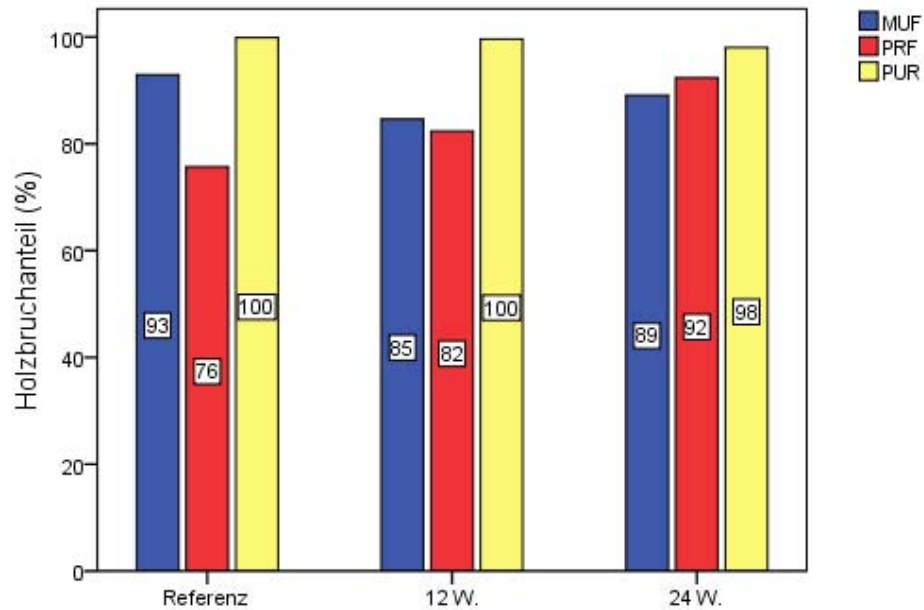
Zwischen den Festigkeitswerten der mit PUR-verklebten Referenz- und 12 Wochen gealterten Proben konnten keinen signifikanten Unterschied nachgewiesen wurden. Die Festigkeitswerte der Proben, die 24 Wochen Alterung ausgesetzt waren, lagen aber signifikant unter den Referenz- und 12 Wochen gealterten Proben. Die Unterschiede sind in Abbildung 32 dargestellt.



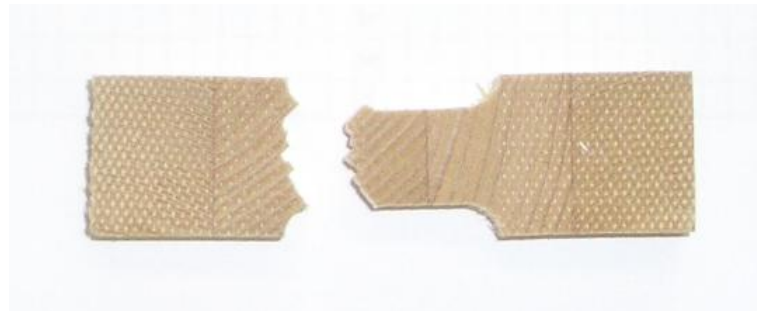
**Abbildung 32: Mittlere Zugfestigkeiten der Gruppen in einzelnen Alterungsstufen bei Querzugproben, verklebt mit PUR-Klebstoff**

Generell wurden bei den Querzugproben sehr hohe Holzbruchanteile beobachtet. Teilweise lag der Bruch abseits der Klebfuge bzw. wurden teilweise auch Bruchbilder außerhalb des verjüngten Bereichs der Proben beobachtet (siehe Abbildung 34). Die Holzbruchanteile der MUF- und PUR-Verklebungen ändern sich nur sehr wenig. Bei den PRF-Verklebungen wurde jedoch eine

deutliche Zunahme der Holzbruchanteil durch die Alterungsdauer beobachtet (Abbildung 33).



**Abbildung 33: Holzbruchanteil der Verklebungen in einzelnen Alterungsstufen bei Querkzugprüfung**



**Abbildung 34: Beispiel einer versagten Querkzugprobe mit Bruchfläche weit entfernt von der Klebfuge**

## 4. Diskussion

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde das Alterungsverhalten der MUF-, PRF- und PUR-Verklebungen mit drei verschiedenen Versuchsanordnungen bzw. Probengeometrie nach ihrer Festigkeiten untersucht. Die Veränderung der Festigkeitseigenschaften nach zyklischer Klimabelastung ist in einer allgemeinen Übersicht in Tabelle 10 für die einzelnen Klebstoffe zusammengefasst.

**Tabelle 10: Die Änderungen der Festigkeitswerten je nach Klebstoffart und Alterungsdauer (+): signifikante Zunahme, (-): signifikante Abnahme, (0): keine signifikante Änderung, R: Referenzproben, 12W.: 12-wöchige Alterung, 24W.: 24-wöchige Alterung**

| Vergleich | Längszugscherprüfung |             | Schäftzugprüfung |             | Querzugprüfung |             |
|-----------|----------------------|-------------|------------------|-------------|----------------|-------------|
|           | 12W mit R            | 24W mit 12W | 12W mit R        | 24W mit 12W | 12W mit R      | 24W mit 12W |
| MUF       | +                    | 0           | +                | -           | -              | -           |
| PRF       | +                    | 0           | +                | -           | +              | -           |
| PUR       | +                    | 0           | +                | 0           | 0              | -           |

### 4.1. Probengeometrie

Je nach Probengeometrie liefern die mechanischen Untersuchungen unterschiedliche Ergebnisse. Die Längszugscherprobe ist für die Scherspannungsuntersuchungen der Klebfuge aus folgenden Gründen nur bedingt geeignet:

- Durch die Probengeometrie und Prüfanordnung entsteht bei der Prüfung ein Drehmoment und damit erhebliche Normalspannungen im Klebfugenbereich. Daraus resultieren ca. dreifach erhöhte Spannung an den Enden der Klebfuge im Verhältnis zu mittleren Bereich der Fuge (Deppe und Schmidt 1994, Gindl et al. 2006, Müller et al. 2005).
- Aufgrund der speziellen Spannungsverhältnisse wird bei den Zugscherproben nach EN 302 im trockenen Zustand vornehmlich Holzbruch beobachtet. Da bei hohem Holzbruchanteil die ermittelte Zugscherfestigkeit vornehmlich von der Festigkeit des untersuchten Holzes abhängt, können von den ermittelten Festigkeitswerten von Längszugscherprüfung keine klaren Rückschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Klebstoffsysteme gezogen werden (Konnerth et al. 2006a). Dementsprechend können Festigkeitsunterschiede mittels der Zugscherprüfung nach EN 302 zwischen verschiedenen Klebstoffen nicht oder nur sehr bedingt dargestellt werden (Gindl et al. 2006).

Die Auswertung der Holzbruchanteile bei der Zugscherprüfung zeigte insgesamt einen sehr hohen Holzbruchanteil bei den hier dargestellten Untersuchungen (Abbildung 32). Aufgrund des hohen Holzbruchanteils und der

speziellen Spannungsverhältnissen in den Proben konnten auch zwischen den einzelnen Alterungsstufen nur geringfügige Unterschiede beobachtet werden. Der geringe Anstieg der Festigkeitswerte nach 12-wöchiger Klimabelastung gegenüber den Referenzproben kann durch die hier vorliegenden Ergebnisse nicht erklärt werden.

Im Gegensatz zu Längszugscherproben zeigen die Bruchbilder der Schäftproben einen deutlich geringeren Holzbruchanteil. Die gefundenen Unterschiede zwischen den Klebstoffen und zwischen den unterschiedlichen Alterungsstufen können daher hauptsächlich auf die veränderten Klebstoffeigenschaften oder auf Veränderungen der Grenzschicht zwischen Klebstoff und Holz zurückgeführt werden.

Die Querkzugproben zeigten ähnlich wie die Längszugscherproben Bruchbilder mit einem sehr hohen Holzbruchanteil. Teilweise erfolgte der Bruch weit von der Klebfuge entfernt. Es kann daher angenommen werden, dass die Klebfuge bzw. der Bereich des Holzes der teilweise mit Klebstoff durchdrungen ist eine höhere Querkzugfestigkeit aufweist als das umliegende Holz.

Für eine Abschätzung der Quell- und Schwindbewegungen, die auf die Klebfuge einwirken, wurden für die drei verwendeten Probengeometrien die maximalen Quell- / Schwindbewegungen, die sich innerhalb eines Klimazyklus ergeben, berechnet. Das Quellmaß von Fichtenholz in Radialrichtung und in tangentialer Richtung beträgt 3,7 bzw. 8,5% (Niemz 1993). Anhand des durchgeführten Vorversuchs wurde ermittelt, dass die Klebfuge der Längszugscherproben um ca. 0,9 mm (in der Radialrichtung) gedehnt wird. Für die Schäftproben (in Radialrichtung) und für die Querkzugproben wurde eine maximale Dehnung von ca. 0,5 mm (in Radialrichtung) bzw. 1,25 mm (in Tangentialrichtung) berechnet. Aufgrund der unterschiedlichen Größe und Jahrringlage wurden die Klebfugen der drei Proben aufgrund der auftretenden Quell- und Schwindspannungen unterschiedlich stark belastet. Bei den Querkzugproben kann die Feuchtigkeit relativ ungehindert von den Hirnflächen in das Probeninnere eindringen. Zusätzlich sind aufgrund der größten Quell- und Schwindbewegungen auch mit höheren Belastungen für die Klebfuge zu erwarten.

Offensichtlich wurden die Quell- und Schwindbewegungen bei den Querkzugproben durch die Klebfuge und die daran angrenzende Zone von mit Klebstoff durchdrungenen Zellreihen behindert. Entgegen der Annahme, dass die Quell- / Schwindbewegungen zu einer Schädigung der Klebfuge führen würden, wurde hingegen mit zunehmender Klimabelastung eine steigende Anzahl von Radialrissen oberhalb und unterhalb der Klebfugen beobachtet. Diese Risse waren bei den 24-wöchig belasteten Proben mit bloßem Auge zu erkennen. Aufgrund der zunehmenden Risse in den angrenzenden Holzbereichen kann das Auftreten der Bruchfläche abseits der Klebfläche teilweise erklären. Es kann angenommen werden, dass der Effekt der Quell- / Schwindbewegungen auf die Klebfuge bei kreuzweiser Verklebung deutlich verstärkt werden kann.

## 4.2. MUF- Verklebung

Die Ergebnisse aus den MUF-Verklebungen wurden in den Tabellen 8, 9 und 10 zusammengefasst. Die mittels MUF-verklebten Proben wiesen nach 12-wöchiger Alterung eine Festigkeitszunahme in Höhe von 5,6% bei Längszugscherprüfung und 11,6% bei Schäftzugprüfung im Vergleich zu Referenzproben auf. Hingegen zeigte sich bei den Querszugproben eine 12,6%-ige Abnahme der Festigkeit nach 12-wöchiger Klimabelastung. Die Zunahme der Festigkeit der Schäftproben und der Zugscherproben ist vermutlich auf Nachhärtungsreaktionen zurückzuführen.

Hinsichtlich des Holzbruchanteils wurde bei den Längszugscherproben eine geringe Zunahme nach 12-wöchiger Alterung beobachtet. Sasaki et al. (1976) untersuchten die Degradation von MUF-verklebtem Sperrholz nach 250 tägiger Lagerung bei 50 und 70°C und beobachteten ebenfalls eine Zunahme des Holzbruchanteils. Die Autoren führten die Zunahme des Holzbruchanteils ebenfalls auf eine Nachhärtung des Klebstoffs zurück.

Hingegen ergaben die Ergebnisse der Längszugscher- und Schäftzugprüfung nach 24-wöchiger Alterung einen Festigkeitsabfall von durchschnittlich 3,4% (Längszugscherproben) bzw. 4,2% (Schäftproben). Zusätzlich nahm der Holzbruchanteil bei beiden Prüfmethode geringfügig ab. Der gleichzeitige Abfall der Festigkeit und des Holzbruchanteils deutet auf eine beginnende Degradation der Klebfuge aufgrund der zyklischen Klimabelastung hin.

Im Gegensatz zu Längszugscherproben fing der Abfall des Holzbruchanteils der MUF-Verklebung schon nach 12-wöchiger Alterung bei Schäftproben an und fiel durch weitere Alterung (24 Wochen) weiter ab. Der Grund für die Abnahme des Holzbruchanteils dürfte vor allem die Versprödung des MUF-Klebstoffes sein. Bei mechanischen Untersuchungen zeigen MUF-Klebstoffe (6,3 GPa) höherem Elastizitätsmodul als PRF- (3,3 GPa) und PUR- (0,47 GPa) Klebstoffe (Konnerth et al. 2006b). Als Folge von möglicher Nachhärtungsreaktion ist eine weitere Zunahme des E-Moduls von MUF-Klebstoffen anzunehmen. Solche Klebstoffe mit hohem Elastizitätsmodul neigen an den Rändern des Überlappungsbereichs der Längszugscherprobe zu Spannungskonzentrationen (Müller et al. 2005).

Die MUF-verklebte Querszugproben verloren kontinuierlich an Festigkeiten mit Zunahme der Klimazyklen. Nach 12-wöchiger Beanspruchung fiel die Festigkeit um 12,6% ab. Bei weiterer Beanspruchung (24 Wochen) sank die Festigkeit um weitere 10,7%. Dieser Abfall wird hauptsächlich auf den Festigkeitsverlust des Holzes aufgrund der Wirkung der zyklischen Klimabelastung zurückgeführt, da der Bruch bei einem großen Teil der Proben weit ab von der Klebfuge erfolgte (Abbildung 34). In diesem Zusammenhang wird daraus geschlossen, dass die gewählte Probengeometrie nur bedingt Rückschlüsse auf das Alterungsverhalten der MUF-Klebstoffe zulässt.

Die im Forest Product Laboratory in Medison durchgeführten Untersuchungen mit Melamin verstärkten UF-Klebstoffen verklebt Sperrholzproben wurden unter verschiedenen Klimabedingungen gelagert und nachfolgend ihre

Festigkeitseigenschaften untersucht (Anonym 1956). Bei den Versuchen wurde beobachtet, dass die Melaminverstärkung die Festigkeitswerte der vier Jahre bei 70°C und 20% r.L. bzw. bei veränderten Luftfeuchten (hoch und niedrig) gelagerten Sperrholzproben erhöhte. Hingegen kann ein geringerer Verstärkungseffekt von Melamin bei höherer Feuchte (97% rel. Luftfeuchte) und geringen Temperaturen (27°C) angenommen werden, da UF-Klebstoffe schon bei niedriger Temperatur feuchte- und wasserbeständig sind (Anonym 1956).

Northcott et al. (1968) untersuchten das Festigkeitsverhalten der mit MUF- bzw. PRF-verklebten Sperrholzproben während einer 80-tägigen Wasserlagerung bei unterschiedlichen Temperaturen. Obwohl die MUF-Verklebungen nach Wasserlagerungsprozess bei 22°C als hoch beständig (wie PRF-Verklebungen) bewertet wurden, wurden sie nach Wasserlagerung bei 60 und 100°C als schlecht beständig bewertet (Northcott et al. 1968). Außerdem berichtete Clad (1960), dass die verstärkten UF-Harze (20% Melamin) nach der 4-jährigen Lagerung bei 70°C und 20% r.L. stärker als Holz angegriffen wurden. In diesem Zusammenhang könnte man sagen, dass die Einwirkung der erhöhten Temperatur bei der Alterung von MUF-Verklebungen entscheidend ist.

Blanchet et al. (2003) untersuchten die Beständigkeit der MUF-Klebfuge (50 x 50 mm) von mehrschichtigen Holzparkett bei zyklisch veränderten Klimabedingungen (siehe Tabelle 3). Nach 9 Zyklen wiesen UF- und MUF-Verklebungen einen linearen Festigkeitsabfall auf. Da die Festigkeitswerte der UF- und MUF-Klebstoffe während der Alterung gleich abliefen, wurde angenommen, dass der MUF-Klebstoff in der Probe mit dem Wasserdampf nicht hydrolysierte. Der Festigkeitsabfall wurde hauptsächlich der Ermüdung der Klebfuge zugeschrieben aufgrund wiederholender Deformation der Proben durch zyklisch veränderte Klimabedingungen (Blanchet et al. 2003). Trotz schärferer Klimabedingungen konnte eine deutliche Ermüdung der Klebfuge weder 12 bzw. 24 Wochen künstlicher Alterung nachgewiesen werden. Diese kann auf deutlich kleinere Probengröße zurückgeführt werden.

Hinsichtlich der Ergebnisse der Längszugscher- und Schäftzugprüfung wurden die gealterten MUF- und PRF-Verklebungen nach ihrer Restfestigkeiten gleich eingestuft. Deppe und Schmidt (2004) untersuchten die Klebstoffe nach nationalen und internationalen Normen (siehe Tabelle 3) und berichteten, dass die MUF-Verklebungen mit hohem Melaminanteil ein zur PF-Verklebungen vergleichbares Niveau erreichten. Deppe und Schmidt (2000) berichtete, dass die MUF-Verklebung durch die Behandlung von Xenotest-Alterung eine um 35% höhere Delaminierungsrate im Vergleich zur PF/RF-Verklebung ergab. PUR und MUF-Verklebung könne in ihrem Delaminierungsverhalten praktisch als gleichwertig eingestuft werden. Außerdem bei der Anwendung eines Schnellalterungsverfahrens AW 100 (siehe Tabelle 3) und anschließend Ermittlung der Zugscherfestigkeit zwischen PRF- und MUF-Verklebungen bei beiden untersuchten Klebfugendicken (0,1 und 0,5 mm) hinsichtlich prozentuelles Klebstoffbruchanteiles praktisch keine Unterschiede feststellbar waren. Bei beiden Fugendicken waren die Resultate für die MUF-Verklebung in der Tendenz sogar etwas besser. Insbesondere bei der 0,5 mm dicken Klebfuge besitzt die Aminoplast-Mischharzverklebung offenbar bessere fugenfüllende Eigenschaften.

Bei Xenontest-Alterung wies MUF-Verklebung einen kontinuierlich fortschreitenden Festigkeitsabfall auf (Deppe 2000). Überraschend ist das relativ gute Abschneiden der MUF-Verklebung sowohl bei der Zugscherfestigkeit, als auch bei der Entwicklung des Leimbruchanteiles bei Kurzzeit-Bewitterungsversuchen. Wichtig ist bei der Beurteilung der Kurzzeitbewitterungs-Alterung, ob sich im Laufe der Zeit bei den fortlaufenden Beanspruchungen der Klebfuge allmählich eine Stabilisierung beim Festigkeitsniveau einstellt. Im Gegensatz zu PRF-Verklebungen stellte sich bei MUF keine Stabilisierung des Festigkeitsniveau ein (Deppe 2000). Um diese Eigenschaft der MUF-Klebstoff zu beurteilen, war die Behandlungsdauer unserer Alterung zu kurz.

### **4.3. PRF- Verklebung**

Die Ergebnisse der PRF-Verklebungen unter Wirkung zyklischer Alterung wurden in den Tabelle 8, 9 und 10 aufgelistet. Die Festigkeitswerte der PRF-Verklebungen zeigen ähnlicher Ablauf wie die Festigkeitswerte der MUF-Verklebungen. Bei der Längszugscher- und der Schäftzugprüfung unterschieden sich die Festigkeitswerte der 12 Wochen gealterten PRF-Verklebungen signifikant von unbehandelten PRF-Verklebungen und zwar in der Tendenz einer Zunahme von 5,7% (Längszugscherprüfung) und 8,2% (Schäftzugprüfung). Der Grund dieser Zunahme ist möglicherweise die Nachhärtungsreaktion des PRF-Klebstoffes. Von verschiedenen Autoren wurden erwähnt, dass eine Festigkeitszunahme während der beschleunigten Alterung wegen der Nachhärtungsreaktion besonders durch die Wirkung von Hochtemperatur vermutet wird (Deppe und Schmidt 1994, Deppe 2000, Sasaki et al. 1976).

Bei Längszugscherprüfung lagen die mittlere Scherfestigkeit der 24 Wochen gealterten PRF-Verklebungen nur 0,4% über der Scherfestigkeit der 12 Wochen gealterten PRF-Verklebungen, welche statistisch nicht nachgewiesen wurden. Bei Schäftzugprüfung lieferten die 24 Wochen gealterten PRF-Verklebungen jedoch einen signifikanten Festigkeitsabfall (6,2%) im Vergleich mit 12 Wochen gealterten PRF-Verklebungen.

Beim Holzbruch der Längszugscherproben tauchte erst nach 24 wöchiger Alterung ein kleiner Abfall auf. Daneben verliefen die Holzbrüche der Schäftproben parallel zu Scherfestigkeiten während der Alterungsbehandlung. Der Holzbruchanteil stieg bei den mittels PRF-verklebten Schäftproben nach 12-wöchiger Alterung im Vergleich mit Referenzproben zuerst geringfügig an. Bei nachfolgender Alterung (24 Wochen) fiel er wieder ab. Der gleichzeitige Abfall der Festigkeit und des Holzbruchanteiles der Schäftproben nach 24-wöchiger Alterung deutet auf Degradation der PRF-Klebfuge aufgrund der zyklischen Klimabelastung hin.

Im Gegensatz zu den eigenen Ergebnissen wurden von verschiedenen Autoren berichtet, dass die PRF-Verklebungen, die einer künstlichen Alterung ausgesetzt wurden, starken Festigkeitsabfall aufwiesen, während der



Holzbruchanteil anstieg. Das Absinken der Scherfestigkeit durch den Alterungstest ist somit auf eine Verringerung der Festigkeit des Holzes zurückzuführen. Das schließt eine Verringerung der Leimbindefestigkeit durch die Alterung zwar nicht aus, jedoch ist diese geringer als die Verringerung der Scherfestigkeit der verwendeten Holzarten (Noack und Frühwald 1976, Raknes 1997). Entsprechend zu den Ergebnissen von Noack und Frühwald (1976) und Raknes (1997) war auch bei den eigenen Versuchen ein hoher Holzbruchanteil beobachtet. Die Schlussfolgerung der oben genannten Autoren trifft daher auch auf die eigenen Untersuchungen zu.

Im Gegensatz zu anderen Probengeometrien ergaben die Querkzugproben interessante Ergebnisse. Obwohl die Proben sehr hoher Holzbruch aufwies, nahm der mittlere Festigkeitswert der 12 Wochen gealterten Proben um 21% zu. Bei weiterer Alterungsabfolge (24 Wochen) sanken die Festigkeitswerte im Vergleich zu 12-wöchiger Alterung um 29,2% ab. Daneben stieg der Holzbruchanteil während der Alterung kontinuierlich an. Um das erklären zu können, sind noch weitere Untersuchungen notwendig.

Deppe und Schmidt (1994) berichtete, dass sich der Festigkeitsabfall mit zunehmender Ausdehnung der Kurzzeitbewitterung-Beanspruchung (Xenotest-Bewitterung) bei PRF-Verklebung erwartungsgemäß vergrößert. Es ist ein Charakteristikum für die dauerhafte und beständige Verklebung, dass der Abfall während der Alterung geringer wird und dass der Festigkeitsabbau zum Stillstand kommt (Deppe und Schmidt 1994, Deppe 2000). Deppe (2000) teilte mit, dass dieser Zustand bei Phenolplast-Verklebungen nach rund 36 Wochen Beanspruchung von Xenotest-Alterung erreicht wurde.

Die PRF-Verklebungen sind gegen Delaminierung relativ unempfindlich. Die Resultate von Xenotest-Kurzzeitbewitterung ergaben für die PRF-Verklebung die niedrigsten Delaminierungswerte gegenüber MUF- und PUR-Verklebung (Deppe und Schmidt 2000). Raknes (1997) berichtete, dass bei der Delaminationstest nach 10-jähriger Außenbehandlung erfüllten PRF-Klebstoffen noch die Anforderungen von Norwegian Glulam Control. Bei der Untersuchung RF-Klebstoffe nach 3 monatige Lagerung unter Außenbedingungen ergaben 7%-ige Delaminierungswerte. Hingegen konnten der Beanspruchung mit Hochtemperatur und der Feuchtezyklen keine Delaminierung erkannt werden (Iwata und Inagaki 2006).

#### **4.4. 1K-PUR- Verklebung**

In der Tabelle 8, 9 und 10 wurden die Ergebnisse der einkomponenten PUR-Verklebungen übersichtlich zusammengefasst. Die 12 Wochen gealterten Proben ergaben eine signifikante Festigkeitszunahme um 10,8% bei Längszugscherprüfung und 14,4% bei Schäftzugprüfung im Vergleich mit Referenzproben. Der Grund dazu ist möglicherweise die Nachhärtungsreaktion, die wahrscheinlich durch die Wirkung von hoher Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung initiiert wurden. Diese Zunahme entstand bei 1K-PUR-Verklebungen in größerem Maß als MUF- und PRF-Klebstoffen, weil möglicherweise nachträgliche Vernetzungsreaktionen des 1K-PUR-Klebstoffes

durch die grundsätzlich geringe Steifigkeit zu keinen wesentlichen Spannungskonzentrationen in der Klebfuge wie bei MUF-Klebstoff führten.

Deppe und Schmidt (1979) berichtete über den Tempereffekt bei Isocyanat Verklebungen, welche mit der Nachreaktion unter Feuchtigkeitseinwirkung zusammenhängt.

Wie bei anderen Klebstoffarten wiesen die Festigkeitswerte der mittels 1K-PUR-verklebten Längszugscher- und Schäftproben einen kleinen Abfall nach 24 wöchiger Alterung auf, obwohl diese Änderung statistisch nicht nachgewiesen wurde.

Die Werte des Holzbruches verliefen bei Längszugscher- und Schäftproben parallel zu Scherfestigkeitswerten. Nach 12 wöchiger Alterung ergaben beide Probengeometrien steigende Holzbruchanteile. Die Längszugscherproben wiesen nach 24-wöchiger Alterung einen Abfall der Holzbruchanteil im Vergleich zu 12 Wochen gealterten Proben auf. Der gleichzeitige Abfall der Holzbruchanteil und Scherfestigkeit deutet auf die Degradation der 1K-PUR-Verklebung durch die zyklische Alterung hin. Außerdem ändert sich die Holzbruchanteil der Schäftproben nach 24 wöchiger Alterung im Vergleich mit 12 wöchiger Alterung.

Die Ergebnisse der Quersugsproben lassen keinen direkten Rückschluss auf die Klebstoffalterung zu, da bei den Proben fast 100%-iger Holzbruch beobachtet wurde. Der Festigkeitsabfall der Quersugsproben hängt von der Alterung des Holzes und von den entstandenen Radialrissen (siehe Kapitel 4.1.) durch die zyklische Alterung ab.

Die PUR-Klebstoffe ergeben keinen Festigkeitsabfall bei der Normklimalagerung bis zu einem Jahr (Radovic und Goth 1994). PUR-Klebstoff zeigt einen klaren Abfall des Elastizitätsmoduls im Temperaturbereich von 40 bis 80°C. Die geringe Temperaturstabilität der PUR-Klebstoffe führt auch zu deutlichen Nachteilen hinsichtlich ihres Kriechverhaltens. Daraus resultieren Einschränkungen bei der Anwendung dieser Klebstoffe in Holztragwerken (Richter und Schirle 2002). Bei von Radovic und Goth (1994) durchgeführter Untersuchung wurden die Proben zur Bestimmung der Temperatureinfluss auf die PUR-Verklebungen bei niedriger und hoher Temperatur gelagert und im gleichen Temperaturbereich geprüft. Die Ergebnisse zeigten, dass bei -60°C die höchste Bindefestigkeit ermittelt. Mit steigender Temperatur war ein Abfall der Bindefestigkeit sowie des Holzfasernbelag festzustellen. Iwata und Inagaki (2006) erwähnten auch gleiches Verhalten von PUR-Klebstoffen, dass mit steigender Temperatur die Zugscherfestigkeit abfällt. Außerdem Frangi et al. (2004) untersuchten vergleichend verschiedene PUR-Klebstoffe. Sie stellten fest, dass ein Festigkeitsverlust bei PUR-Klebstoffen in einem weiten Temperaturbereich auftrat. Einige der getesteten Klebstoffe verloren ab 70°C deutlich an Festigkeit, bei anderen trat ein Versagen der Verbindung deutlich später ein. Richter und Schirle (2002) erwähnten nach vergleichender Untersuchungen, dass bei kombiniertem Effekt von Temperatur und Feuchte (Lagerungsfolge A4 nach EN 302-1) möglicherweise allein die

Temperatureinwirkung die Festigkeitseigenschaften des PUR-Klebstoffes reduziert.

Die obengenannten Temperaturbereiche, in dem die PUR-Klebstoffe deren Festigkeiten deutlich verlieren, werden in der Praxis auch für Holzbauwerke erreicht. Die geringe Temperaturstabilität der PUR macht der Dauerstandversuchen notwendig. Entgegen der Ergebnisse von Radovic und Rothkopf (2003) konnten an Dauerstandversuch von mit 1K-PUR-verklebten Kleinträger zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Dies zeigt das unterschiedliche Klebstoffverhalten des PUR-Klebstoffes individuelle Untersuchungen des Dauerstandverhaltens notwendig macht.

Aus den Ergebnissen der Längszugscherprüfung geht hervor, dass zwischen Scherfestigkeiten der verwendeten Klebstoffe keinen signifikanten Unterschied nachgewiesen wurden. Daneben lagen die Scherfestigkeiten der mittels 1K-PUR-verklebten Schäftproben bei allen Alterungsstufen signifikant über den Schäftproben, die mittels MUF- bzw. PRF-Klebstoffe verklebt wurden.

Deppe (2000) führten vergleichende Untersuchungen nach internationalen Standards (siehe Tabelle 3) mit verschiedenen Klebstoffarten durch. Diese Untersuchung zeigte, dass PUR-Klebstoffe mit 0,1 mm Klebfugendicke nach Vorbehandlung der Proben nach DIN EN 302-1 mit der Lagerungsfolge A5 gegenüber PRF-Verklebung eine gesicherte Festigkeitsabnahme ergab. Überraschenderweise war dies jedoch auch bei der CTB-Vorbehandlung (siehe Tabelle 3) erkennbar. Bei der ASTM 1037 und WCAMA-Test (siehe Tabelle 3) waren die Ergebnisse, die sich je nach verwendeter Holzart änderten, im Hinblick auf die Beurteilung der PUR-Verklebung nicht eindeutig. Auffallend ist, dass PUR-Verklebungen im Vergleich zu PF/RF-Verklebung erhöhte Klebstoffbruchanteile aufweisen (Deppe 2000, Vick und Okkonen 1998). Außerdem untersuchte Deppe (2000) die Festigkeitseigenschaften der zwei verschiedenen PUR-Klebstoffe bei Xenotest- Alterung. Während ersten PUR (1)-Klebstofftyp kontinuierlichen Festigkeitsabfall nach 48 Wochen Alterung aufwies, lag bei zweitem PUR (2)-Klebstofftyp eine Stabilisierung vor, die ein Zeichen für einen dauerhaften Klebstoff ist.

Bei von Blanchet et al. (2003) durchgeführter Untersuchung ergab PUR-Klebstoff keinen Abfall der Scherfestigkeit unter zyklische Klimawechsellaagerung (Feuchte und Temperatur) (siehe Tabelle 3). Das wurde sowohl mit der Quervernetzung durch die Reaktion zwischen Isocyanatgruppe in der PUR-Klebstoffen und Feuchte im Holz und damit erhaltenen duroplastischen Charakter als auch elastische Eigenschaften der Klebstoffes erklärt. Außerdem hielt der PUR-Klebstoff die durch Feuchtezyklen entstandene Quell- und Schwindspannungen entgegen dem MUF-Klebstoff möglicherweise durch seine guten elastischen Eigenschaften gut durch.

Iwata und Inagaki (2006) führten Delaminierungstest unter verschiedenen Bedingungen durch. PUR-Klebstoffe ergaben unter Außenbedingungen 10% bzw. unter Temperaturzyklen 20%-igen Delaminierungswerte, während unter Feuchtezyklen keine Delaminierung erkannt wurden.

Richter und Schirle (2002) lagerten die Zugscherproben aus verschiedenen Holzern im Wasser nach EN 302-1 entsprechend Lagerungsfolge A2 bzw. A4. Während die Proben aus Fichte vollständig von Holz brachten, ergaben die Proben aus dichteren und beständigeren Nadelhölzern kompletten Klebstoffbruch. Von den Autoren wurden der mögliche Transport der wasserlöslichen Holzextraktive an die Klebfuge und folglich Schwächen der Adhäsion als Grund dafür beschrieben.

Polyurethanklebstoffe können sehr unterschiedliche Eigenschaften haben. Bei oben erklärten und von verschiedenen Autoren durchgeführten Untersuchungen ergaben PUR-Klebstoffe unterschiedliche Ergebnisse. Obwohl die PUR-Klebstoffe eine einfache chemische Struktur haben, wurden deren detaillierten Aufbau und der Formel von Herstellern immer geheim gehalten (Richter und Schirle 2002). Eine allgemeine Aussage über PUR-Klebstoffe ist daher nur bedingt möglich.

## 5. Schlussfolgerungen

In dieser Masterarbeit wurden versucht, eine beschleunigte Alterungsmethode für tragende Holzbauteile zu entwickeln und untersucht, wie die gewählten Klebstoffe auf diese Alterung reagieren. Die durchgeführten Untersuchungen erbrachten folgende Schlussfolgerungen.

- Bei der durchgeführten zyklischen Alterung lassen sich erst nach 24 Wochen Alterungserscheinungen erkennen.
- Prinzipiell scheinen daher die gewählten Klimazyklen geeignet zu sein,
- Für aussagekräftige Ergebnisse müssten die Proben einer höheren Anzahl von Klimazyklen ausgesetzt werden.
- Die Querschnittproben sind nur bedingt aussagekräftig für die Beurteilung des Alterungsverhaltens von Klebstoffen, da mehr die Holzkomponente der Proben geprüft wurde.
- Weitere Versuche sind notwendig, um das Alterungsverhalten besser zu verstehen, da nach der Behandlungsdauer keine klare Unterscheidung zwischen den Ergebnissen der Klebstoffarten möglich war.

## Literaturverzeichnis

Anonym (1956) Durability of water-resistant of woodworking glues. Revised, Report No: 1530, Forest Product Laboratory, Madison, Wisconsin

Back, E., Sandström, E., (1982) Critical aspects on accelerated methods for predicting weathering resistance of wood based panels. Holz als Roh- und Werkstoff 40:61-75

Blanchet, P., Beauregard, R., Erb, A., Lefebvre, M. (2003) Comparative study of four adhesives used as binder in engineered wood parquet flooring. Forest Products Journal 53-1: 89-93

Bröker, F. W., Blaik, U. (1986) Untersuchungen über die Zug- und Druckscherfestigkeiten verklebter Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff, 44:143-149

Clad, W. (1960) Die Beurteilung von Harnstoff-Harzleimen auf Grund ihrer Prüfung. Holz als Roh- und Werkstoff 18-10:391-400

Clad, W. (1965) Über die Fugenelelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen. Holz als Roh- und Werkstoff, 23-2:58-67

Deppe, H. J. (2000) Vergleichende Untersuchungen an Brettschichtholz-(BSH)-Verleimungen mit Natur- und Kunstharzen im Kurzzeitversuch nach internationalen Standards und vergleichende Untersuchungen an Brettschichtholz-(BSH)-Verleimungen mit Natur- und Kunstharzen zur Ermittlung der Langzeitbeständigkeit. Abschlussbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 124 S., ISBN 3-8167-5711-1

Deppe, H. J., Schmidt, K. (1979) Vergleichende Lang- und Kurzzeit-Bewitterungsprüfungen an Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 37:287-294

Deppe, H. J., Schmidt, K. (1982) Zur Beurteilung von Holzwerkstoffen im Kurzzeit-Bewitterungsversuch. Teil 1:Grundlegendes; Vergleich der Kurzzeitverfahren. Holz als Roh- und Werkstoff, 40:471-473

Deppe, H. J., Schmidt, K. (1994) Ergänzende Untersuchungen zum Alterungsverhalten gestreckter Holzmontageverleimungen. Holz als Roh- und Werkstoff 52:355-360

Deppe, H.J., Schmidt, K. (2000) Delaminierung von Brettschichtholzverleimungen. Holz-Zentralblatt No:112, S:1458

Deppe, H. J., Schmidt, K. (2004) Prüfung von Brettschichtholz-Verleimungen. Holz-Zentralblatt No:16, S:208-209

DIN 53253 (1964) Prüfung von Holzleimen und Holzverleimungen, Bestimmung der Bindefestigkeit von Schäftverleimungen im Zugversuch

Dunky, M. (2002) Edited: Dunky, M., Pizzi, T., Leemput, M.V., In: COST Action E13 - Wood adhesion and glued products – Working group 1: Wood adhesives. State of the art - Report

Dunky, M., Niemz, P. (2002) Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3-540-42980-8

Egle, J. (2002) Dauerhafte Holzbauten bei chemisch-aggressiver Beanspruchung, Holzbau Handbuch, Reihe 1, Teil 8, Folge 2, München, ISSN: 0466-2114

Egner, K., Kolb, H. (1966) Versuche über das Alterungsverhalten von Leimen für tragende Holzbauteile. Holz als Roh- und Werkstoffe 24-10:439-442

EN 319 (1993) Spannplatten und Faserplatten; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene

Frangi, A., Fontana, M., Mischler, A. (2004) Shear behaviour of bond lines in glued laminated timber beams in high temperatures. Wood Science and Technology, 38:119-126

Gindl, W., Teischinger, A., Konnerth, J., Müller, U. (2006) Prüfung der Verklebungsfestigkeit mit der Schäftprobe. Holz-Zentralblatt, 132, 16, 460-461

Habenicht, G. (1997) Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen, 3. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 3-540-62445-7

Iwata, R., Inagaki, N. (2006) Durable adhesives for large laminated timber. Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 20, No. 7, pp. 633-646

Kraus, B., Oberdorfer, G. (2005) Dem Holz auf den Leim gehen – Klebstoffe für stab- und plattenförmige Holzwerkstoffe, Holzforschung, Austria, [http://www.holzforschung.at/files\\_deu/Klebstoff0105.pdf](http://www.holzforschung.at/files_deu/Klebstoff0105.pdf)

Konnerth, J., Gindl, W., Harm, M., Müller, U. (2006a) Comparing dry bond strength of spruce and beech wood glued with different adhesive by means of scarf- and lap joint testing method. Holz als Roh- und Werkstoff 64:269-271

Konnerth, J., Gindl, W., Müller, U. (2006b) Elastic properties of adhesive polymers. Part I: polymer films by means of electronic speckle pattern interferometry. J Appl. Polymer Sci. Volume:103, Issue:6, Pages:3936-3939

Müller, U., Sretenovic, A., Vincenti, A., Gindl, W. (2005) Direct measurement of strain distribution along a wood bond line. Part 1: Shear strain concentration in a lap joint specimen by means of electronic speckle pattern interferometry. *Holzforschung*, Vol.59, pp.300-306

Niemz, P. (1993) *Physik des Holzes und Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag, Leinfelden, Echingen

Niemz, P. (2008) Abschlussbericht: Untersuchung zur Optimierung von 1K-PUR Klebstoffen für die Verklebung von Vollholz. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Holzphysik, Zürich.

Noack, D., Frühwald, A. (1976) Die Alterung von Holzverleimungen am Beispiel von Resorcin-Formaldehydharz-Verleimungen im Bootsbau. *Holz als Roh- und Werkstoff* 34:83-86

Northcott, P. L., Kreibich, R. E., Currier, R. A. (1968) First replications comparing bond-degrade-accelerating systems. *Forest Products Journal*, 18 (5):58-66

ÖNORM EN 302-1 (2004) Klebstoffe für tragenden Holzbauteile – Prüfverfahren, Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit

Radovic, B., Goth, H. (1994) Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe für die Herstellung von tragenden Holzbauteilen. *Bauen mit Holz*, 1:22-33

Radovic, B., Rothkopf, C. (2003) Eignung von 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau unter Berücksichtigung von 10-jähriger Erfahrung. *Bauen mit Holz*, 6:1-6

Raknes, E. (1997) Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. *Holz als Roh- und Werkstoff* 55:83-90

Richter, K., Schirle, M. A. (2002) Behaviour of 1 K PUR adhesives under increased moisture and temperature conditions. In *Lignovisionen Issue 4*:153-158

Sasaki, H., Kaneda, H., Maku, T. (1976) Dry-heat degradation of plywood-type joint. *Wood Research*, No.59/60:58-69

Schremser, R., (2000) *Kleben in konstruktiven Ingenieurbau*. Diplom Arbeit, Universität für Bodenkultur, Wien

Schollenberger, C. S. (1977) Edited: Skeist I., In: *Handbook of adhesives* (1977). Second edition, Van Nostrand Reinhold Ltd., New York, ISBN 0-442-27634-6

Vick, C. B., Okkonen E.A. (1998) Strength and durability of one-part polyurethan adhesive bonds to wood, *Forest Product Journal*, Vol.48, No.11/12:71-76



Wesche, K. (1988) Baustoffe für tragende Bauteile 4: Holz und Kunststoffe (organische Stoffe), 2. Völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Bauverlag GmbH., Wiesbaden und Berlin, ISBN 3-7625-2001-1

Zeppenfeld, G., Grunwald, D. (2005) Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie. 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. KG, Leinfelden, Echterdingen, ISBN 3-87181-359-1