

ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Holzphysik
Schafmattstrasse 6
8093 Zürich

**Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung
der Wald- und Holzforschung Nr. 2006.08**

**Untersuchung zur Optimierung von 1K-PUR Klebstoffen für die
Verklebung von Vollholz**

Abschlussbericht

Bearbeitungszeitraum: Mrz. 07 - Jun. 08

S. Clauß, O. Kläusler, K. Allenspach, P. Niemz, F. Bächle (ETH Zürich)
D. Dijkstra (Bayer MaterialScience AG)

Gesuchsteller:

Walter Stampfli, Purbond AG

Mitgesuchsteller:

Prof. Peter Niemz, ETH Zürich, IfB

Zürich, 14. Juni 2008

Zusammenfassung Polyurethanklebstoffe werden vermehrt im strukturellen Holzleimbau eingesetzt, zeigen aber in punkto Temperaturbeständigkeit und Kriechverhalten gegenüber Konkurrenzprodukten z.T. Defizite auf. In der vorliegenden Untersuchung wurde erforscht, inwiefern die Eigenschaften von 1K-PUR Klebstoffen durch die Formulierung der verwendeten Prepolymere sowie durch Zugabe von Füllstoffen verbessert werden können. Dabei wurden insbesondere die Verklebungsgüte von 1K-PUR Prepolymeren und Klebstoffen bei Feuchte- und Temperaturbelastung durch Bestimmung der Zugscherfestigkeit analysiert. Im Ergebnis wurde ein deutlicher Einfluss des Harnstoffgruppengehalts sowie der Vernetzungsdichte auf die Verklebungsgüte festgestellt. Durch die Zugabe von Füllstoff konnte die Temperaturbeständigkeit der Verklebung signifikant verbessert werden. 1K-PUR Klebstoffe können durch Variation der chemischen Komponenten in einem breiten Spektrum nachweislich an unterschiedliche Umgebungsbedingungen angepasst werden.

Schlagwörter 1K-PUR Klebstoffe, Prepolymere, Füllstoffe, Zugscherfestigkeit, Temperaturbeständigkeit, Feuchtebeständigkeit, Dynamisch Mechanische Analyse

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Zielstellung	7
3 Laufende Forschungsarbeiten	8
4 Erkenntnisstand	9
4.1 Einfluss der Feuchte und des Klimas auf die Verklebung	9
4.2 Einfluss der Temperatur auf die Klebfugenfestigkeit	11
5 Prüfung von 1K-PUR Prepolymeren	13
5.1 Material und Methoden	13
5.1.1 Holz	13
5.1.2 Prepolymere	14
5.1.3 Behandlungsarten	16
5.1.4 Zielgrößen	16
5.2 Ergebnisse	17
5.2.1 Bruchbild	17
5.2.2 Zugscherfestigkeit des Holzes	19
5.2.3 Temperaturbeständigkeit der Verklebung	20
5.2.4 Einfluss der Holzfeuchte bei der Verklebung	22
5.2.5 Kochwasserbeständigkeit der Verklebung	23
5.3 Zusammenfassung und Ausblick	24
6 Prüfung von gefüllten 1K-PUR Klebstoffen	26
6.1 Material und Methoden	26
6.1.1 Klebstoff	26
6.1.2 Holz	27
6.1.3 Verklebung der Probekörper	27
6.1.4 Behandlungsarten	27
6.2 Ergebnisse	28
6.2.1 Feuchtebeständigkeit der Verklebung	28
6.2.2 Temperaturbeständigkeit der Verklebung	33

6.3 Zusammenfassung und Ausblick	36
7 Dynamisch Mechanische Analyse	38
7.1 Theorie des Verfahrens	38
7.2 Material und Methode	39
7.3 Versuchsergebnisse	40
7.4 Zusammenfassung und Ausblick	44
Literatur	48
Abbildungsverzeichnis	50
Tabellenverzeichnis	50

1 Einleitung

Die Verwendung von Klebstoffen für die Herstellung von Holzprodukten ist sowohl in der Holzwerkstoffindustrie als auch im konstruktiven Holzbau unerlässlich. Schätzungen zufolge werden etwa 75 % aller Holzerzeugnisse unter Einsatz von Klebstoff hergestellt (Schirle et al., 2002). Dies beruht im Wesentlichen darauf, dass ein Holzleimbauprodukt wie Brettschichtholz (BSH) im Vergleich zu Vollholzträgern entscheidende Vorteile aufweist. So wird durch das Sortieren der zu verklebenden BSH-Lamellen der festigkeitsmindernde Einfluss von Holzfehlern minimiert, indem Holz mit grossen Ästen, Rissen und anderen wesentlichen Fehlern aus der BSH-Produktion ausgesondert wird. Äste werden ausgeschnitten und die Lamellen durch Keilzinken längs verleimt.

Durch das Verkleben von Holz können Bauteile mit wesentlich grösseren Dimensionen geschaffen werden, als dies mittels Vollholz möglich ist. Auch grössere Formbeständigkeit und eine geringere Neigung zur Rissbildung werden durch das Verkleben erzielt. Nicht zuletzt kann ein BSH Produzent auf eine breitere Rohstoffbasis zurückgreifen, zumal der Einsatz der Klebetechnologie die Verwendung bestimmter Schwachholzsorimente ermöglicht. All dies erweitert die Betätigungsfelder des Holzbau und rückt ihn – z.B. im Hallen- und Brückenbau – zunehmend in den direkten Wettbewerb mit Baustoffen wie Stahl und Beton.

Der grösste Marktanteil an Klebstoffen für die Verleimung von Brettschichtholz entfiel im Jahr 2005 gemäss angaben von Grøstad u. Ormstad (2005) mit 63 % auf Melamin-Formaldehyd-Harz (MF) und Melamin-Urea-Formaldehyd-Harz (MUF). Phenol-Resorcinol-Formaldehyd-Harz verfügte über einen Marktanteil von etwa 34 %. Auf formaldehydhaltige Polykondensationsklebstoffe entfielen somit 97 % der verwendeten Klebstoffe. Im Holzleimbau werden jedoch vermehrt einkomponentige Polyurethanklebstoffe (1K-PUR) verwendet, welche sich durch eine Reihe von Vorteilen gegenüber konventionellen formaldehydhaltigen Polykondensationsklebstoffen auszeichnen. Der Marktanteil von PUR im strukturellen Holzleimbau liegt gemäss angaben von Purbond bei etwa 25 %.

Seit 1994, dem Jahr als der erste 1K-PUR Klebstoff – PURBOND HB 110 – nach DIN 1052 zertifiziert und in den Markt eingeführt wurde sind heute 13 PUR Klebstoffe

– gemäss Klebstoffliste der MPA Stuttgart (MPA, 2007) – in Deutschland zertifiziert. Purbond war der erste Anbieter, welcher gemäss dem neuen Standard eine Zulassung für PUR Klebstoffe erhielt. Auch weltweit ist die Technologie im Aufbau begriffen. Seit September 2007 gibt es in Japan eine neue JAS Norm, welche neuen Technologien wie PUR offen gegenübersteht. Seit April 2007 gibt es einen neuen Interim-Standard in Australien (AS/, 2007), welcher nicht mehr ausschliesslich PRF-Harze für tragende Anwendungen zulässt, sondern auch anderen Technologien wie PUR eine Zulassung ermöglicht.

PUR Klebstoffe unterscheiden sich in ihrem chemischen Aufbau sowie ihrer Aushärtecharakteristik von herkömmlichen Klebstoffen grundsätzlich und weisen dadurch ein abweichendes Eigenschaftsprofil gegenüber diesen auf. Die 1K-PUR Klebstoffe gehören zur Gruppe der Reaktivklebstoffe, bei denen sich die Aushärtung durch eine chemische Reaktion vollzieht. Die Reaktion findet zwischen den Reaktanden Polyurethan und Wasser statt, sobald der Klebstoff mit Feuchtigkeit aus der Luft oder dem zu verklebenden Werkstoff in Verbindung kommt. Eine zweite chemische Komponente (Härter) muss dem Klebstoff somit nicht zugeführt werden, was die Anwendung deutlich erleichtert.

Weitere Vorteile von 1K-PUR gegenüber anderen Klebstoffarten sind die in der Regel hellen bzw. einfärbaren Klebfugen, die relativ kurze Abbindezeit bei der Verklebung von Fügeteilen mit erhöhter Holzfeuchte (Properzi et al., 2003), die relativ lange Lagerfähigkeit (ca. 10 Monate), die einfache Verarbeitung (keine Leimküche), sowie die Kaltverpressbarkeit. Diesen Vorteilen stehen zwar die verhältnismässig hohen Beschaffungskosten des 1K-PUR gegenüber – zumal Polyurethanklebstoffe etwa 10 mal teurer sind als z.B. Harnstoffharze (Niemz, 2006) – jedoch werden diese Kosten durch die Vorteile wettgemacht.

Besonders bei anspruchsvollen Umgebungsparametern erwachsen hohe Anforderungen an den Klebstoff, welche stark variieren können. So müssen die Klebfugen eines Binders, der in einer Schwimmhalle verbaut wird (Feuchtebelastung), anderen Anforderungen standhalten als diejenigen in einer Produktionshalle (thermische Belastung, Vibrationen) oder einer Brückenkonstruktion (Witterungswechsel, Verkehrslasten). Auch bei der Umnutzung von Gebäuden kann diese Überlegung relevant sein, zumal eine veränderte Nutzungsform oft auch veränderte Anforderungen mit sich bringt. Dieser

Aspekt ist auch bei Modernisierungsmassnahmen zu beachten.

Die Eigenschaften eines Bauelements werden von verschiedenen Einflussfaktoren geprägt. Neben den statischen Eigenschaften der jeweiligen Konstruktion und den Eigenschaften des Holzes selbst, sind diesbezüglich auch die verwendeten Klebstoffe von Bedeutung. Die Kräfte und Momente, die beispielsweise auf einen verbauten BSH-Binder einwirken, müssen von den Klebfugen aufgenommen und übertragen werden. Die Festigkeit solcher Klebfugen wird unter anderem von den Umweltbedingungen (Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Klimaschwankungen, Beregnung, u.a.) beeinflusst, denen das Bauwerk über die gesamte Lebens-, bzw. Nutzungsdauer des Bauwerkes (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) ausgesetzt ist. Besonders bei grossen Querschnitten treten zudem erhebliche Eigenspannungen durch Quellen und Schwinden des Holzes auf, denen die Klebfugen standhalten müssen. Daher ist es erforderlich, die Umgebungsparameter bei der Wahl des zu verwendenden Klebstoffs zu berücksichtigen.

Polyurethane sind aus vielerlei Gründen für unterschiedlichste Einsatzbereiche geeignet. Die Ausgangsstoffe (Di- und Polyisocyanate sowie Di- und Polyole) sind sehr vielgestaltig, sodass auch die daraus resultierenden Produkte in ihren Eigenschaften sehr variabel sind. Ausgehend von einem grossen Sortiment an industriell verfügbaren Edukten sollte es daher möglich sein, die Eigenschaften der Produkte auch im industriellen Massstab gezielt zu gestalten.

2 Zielstellung

Ziel des Projektes war es, das Eigenschaftsprofil des Klebstoffs genauer zu untersuchen und im Besonderen die Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zwischen dem Werkstoff Holz und dem Klebstoff unter Berücksichtigung der Umgebungs-, Werkstoff-, und Klebstoffparameter herauszuarbeiten.

Um den Einfluss einzelner chemischer Klebstoffparameter auf die Verklebungsgüte zu ergründen, sollten vorerst keine fertig konfektionierten 1K-PUR Klebstoffe sondern gezielt variierte 1K-PUR Prepolymere verwendet werden. In einer weiterführenden Untersuchung sollten die Prepolymere zu Klebstoffen konfektioniert werden, wobei der Füllstoffgehalt als wesentlicher Parameter bezüglich der Temperatur und Feuchtebe-

ständigkeit betrachtet werden sollte.

Zur Charakterisierung der Verklebungsgüte sollten verschiedene Normen nach DIN EN und ASTM berücksichtigt werden. Innerhalb des Projektes sollten deshalb Versuche durchgeführt werden, welche sich an diesen Normen anlehnen um Ergebnisse zu erhalten, die mit Untersuchungen anderer Einrichtungen und eigener Arbeiten vergleichbar sind. Dazu zählt insbesondere die Bestimmung der Zugscherfestigkeit nach DIN EN 302-1.

Weiterhin zu erforschen galt, welchen Einfluss Füllstoffe auf die Temperatur- und Feuchtebeständigkeit von 1K-PUR Klebstoffen haben, wie sich niedrige Holzfeuchten bei der Verklebung auf die Klebefestigkeit auswirken und inwiefern die Holzeigenschaften die Verklebungsgüte beeinflussen.

Um exemplarisch Umgebungsbedingungen zu simulieren, wie sie für Anwendungsbiete des Holzleimbaus typisch sind, sollten die Prüfkörper verschiedenen Vorbehandlungen unterzogen werden. Dazu zählen die Temperierung, Kochwasserexposition und Wechselklimalagerung der Verklebungen. Auf diese Weise sollte die Praxisnähe dieser Untersuchung so gut als möglich gewährleistet werden.

Die Prüfung der Längszugscherfestigkeit sollte gemäss DIN 302-1 an Prüfkörpern aus Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) erfolgen. Da die Herstellung von Brettschichtholz meist unter Verwendung von Koniferen erfolgt, sollten innerhalb des Forschungsprojekts auch die Holzarten Fichte (*Picea abies* Karst.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco) in die Betrachtungen einbezogen werden.

3 Einbettung in laufende Forschungsarbeiten am Institut für Baustoffe

Am Institut für Baustoffe (IfB) der ETH Zürich wurden in den vergangenen Jahren mehrere Arbeiten im Bereich Holzverklebungen durchgeführt. Insbesondere 1K-PUR Reaktivklebstoffe standen dabei im Fokus der Untersuchung. In diesen Arbeiten wurde das Versagensverhalten von Holzverklebungen im makroskopischen und im mikroskopischen Bereich bei Scherbelastung untersucht (Wyss, 2006). Weiterhin wurde das

Versagensverhalten von Klebfugen bei mechanischer Belastung in Abhängigkeit der Temperatur, Feuchte und Wechselklimalagerung untersucht (Togni, 2007; Allenspach, 2007). Ausserdem wurde die Verklebung von thermisch behandeltem Laubholz mit unbehandelten Proben verglichen (Schnider, 2007).

In aktuellen Arbeiten werden parallel verschiedene Untersuchungen zum Verhalten von 1K-PUR Klebstoffen im niederen Feuchtigkeitsbereich durchgeführt, wobei durch Variation der verfahrenstechnischen Parameter (Presszeit, Zusatzwasser, Temperatur, Holzfeuchte) optimale Verklebungsbedingungen ermittelt werden sollen. Weiterhin werden Untersuchungen zur Ermittlung der Bruchspannung mittels VIC 2D (Video Correlation System) und der Zugscherfestigkeit mittels Zugversuch angestellt.

Des Weiteren wird eine Modellierung des Spannungs- und Verformungsverhaltens in der Klebfuge mittels Finiter Elemente Methode angestrebt, wobei die Spannung sowohl durch mechanische äussere Belastung als auch durch eine innere Belastung, bedingt durch Quellen und Schwinden bei Klimawechsel, induziert werden kann. Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, Versagenskriterien durch Eigenschaftsunterschiede im Hinblick auf Feuchtigkeitsunterschiede aufstellen zu können.

Die Mikromechanik der Leimfuge verschiedener Klebstoffe (Kondensationsklebstoffe, Reaktivklebstoffe) ist das Thema weiterer Arbeiten, welche sich eingehender mit dem Eindringverhalten von Klebstoffen in die Holzstruktur und der Schichteigenschaftsänderung in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des Klebstoffs sowie der Untersuchung des Bruchverhaltens von Holz-Klebstoffverbindungen beschäftigen.

4 Erkenntnisstand

4.1 Einfluss der Feuchte und des Klimas auf die Verklebung

Entscheidend für das Aushärten des Klebstoffs ist bei 1K-PUR Klebstoffen die Holzfeuchte im Randbereich. Der Klebstoff selbst dringt nur wenig in das Holz ein. Niemz et al. (2004) ermittelten eine Eindringtiefe von lediglich einigen Zehntelmillimetern. Die Eindringtiefe war bei 1K-PUR geringer als bei Harnstoffharz oder PVAc. Untersuchungen von Schirle et al. (2002) haben aufgezeigt, dass die Eindringtiefen in Früh- und

Spätholz variieren. Die Eindringtiefe im Frühholz ist doppelt so gross wie im Spätholz. Aus dieser Erkenntnis wurde für die vorliegende Arbeit abgeleitet, dass im Abbindeprozess nur die Oberflächenfeuchte massgebend ist und die im Herstellungsprozess kontrollierte mittlere Holzfeuchte einen untergeordneten Einfluss auf die Qualitätskontrolle für die Verarbeitung von 1K-PUR Klebstoff hat. Das Eindringverhalten des Klebstoffs wird zusätzlich von der Oberflächengüte, der Klebstoffauftragsart (ein- oder beidseitig), der Auftragsmenge und der Klebstoffviskosität beeinflusst.

Radovic u. Goth (1994) beschrieben den Einfluss des Raumklimas auf die Abbindegeschwindigkeit von 1K-PUR Klebstoffen. In den Klimata 20/65¹ und 15/90 wurde in den ersten 16 Stunden ein beinahe identischer Anstieg der Bindefestigkeit beobachtet, während in der Folge die Festigkeit im Klima 20/65 weiter stieg und jene im Klima 15/90 wieder deutlich absank. Im Klima 30/40 lagen die Festigkeiten zwischen den beiden anderen Klimata.

Properzi et al. (2003) untersuchten das Aushärtungsverhalten unterschiedlicher Klebstoffe bei der Verklebung von Brettschichtholz mit hoher Holzfeuchte. Sie stellten bei der Verklebung mit PUR Klebstoffen deutlich höhere Endfestigkeiten als mit MUF oder PRF fest. Jedoch kehrte sich der Vorteil der PUR Klebstoffe nach der Trocknung um, da durch das Schwinden des Holzes Spannungen auftreten, welche die Klebefestigkeit mindern.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit von 1K-PUR Klebstofffugen wurden von Vick u. Okkonen (2000) Versuche mit einem HMR-Haftvermittler (Primer) durchgeführt. Insbesondere bei der Prüfung der Klebstofffugen nach der Nasslagerung wurden mit Haftvermittlern deutlich höhere Klebfestigkeiten erreicht.

Im Abbindeprozess von 1K-PUR Klebstoffen reagieren reaktive Isocyanatgruppen (NCO) überwiegend mit Hydroxylgruppen (OH) des Wassers. Die Wahl der Reaktionspartner lässt sich mit den kinetischen Potentialen bzw. ihren Anziehungskräften erklären. Eine freie NCO-Gruppe reagiert mit Wasser, sofern dieses leicht zugänglich ist. Wenn das nicht der Fall ist, kann sich eine Bindung zu OH-Gruppen der Holzsubstanz ausbilden, speziell wenn der Vorgang thermisch beschleunigt wird. Pizzi u. Owens (1995) ermittelten, dass bei Duromeren eine kovalente Bindung zwischen Isocyanaten und Zellulose entsteht, sofern sehr hohe Temperaturen (128-180 °C) herrschen und kein Wasser für

¹erste Zahl steht für Temperatur (°C), zweite Zahl für relative Luftfeuchte (%)

die Reaktion vorhanden ist. Kovalente Bindungen sind daher im üblichen Einsatzgebiet von 1K-PUR Klebstoffen ausgeschlossen. Bisher galten folgende Randbedingungen für die Verarbeitung von 1K-PUR im Holzbau, die in der Praxis, insbesondere im Winter, aber nicht immer exakt eingehalten werden.

- Die Temperatur in den Herstellungsräumen muss mindestens 15 °C betragen, wobei während der Aushärtung der Bauteile eine Temperatur von 20 °C erforderlich ist.
- Die rel. Luftfeuchte in den Herstellungsräumen muss mindestens 40 bis 75 % betragen, beim anschliessenden Aushärten sind 30 % zulässig.
- Die Holzfeuchte der Lamelle muss zwischen 8 und 15 % betragen. Der Feuchteunterschied zwischen den zu verklebenden Lamellen darf $\pm 2\%$ nicht übersteigen.
- Als Pressdruck wird für Nadelholz bei Lamellendicken von 35 mm $0,6 \frac{N}{mm^2}$ und für Dicken zwischen 35 und 45 mm $1.0 \frac{N}{mm^2}$ empfohlen.

Im Rahmen von studentischen Arbeiten wurden an der ETHZ Untersuchungen zur Verklebung von 1K-PUR Systemen unter extremen Feuchtebedingungen durchgeführt, wobei in einem ersten Schritt 3 Klebstoffe eines Herstellers mit unterschiedlicher Reaktivität geprüft wurden. In einem zweiten Schritt wurden weitere 10 Klebstoffe von 3 Herstellern untersucht. Dabei wurden sehr deutliche Unterschiede in der Reaktivität im unteren Holzfeuchtbereich (ab etwa 6 %) festgestellt. Zudem ist ein Einfluss der Luftfeuchte, der Presszeit und anderen Parametern vorhanden. Zwischen den Einflussgrössen besteht eine starke Wechselwirkung (Kägi et al., 2006).

4.2 Einfluss der Temperatur auf die Klebfugenfestigkeit

Verklebte Holzelemente können im praktischen Gebrauch in vielfältiger Weise einer thermischen Beanspruchung ausgesetzt sein. Durch Sonneneinstrahlung kann es hinter einer Glasfassade durchaus zu Temperaturen um 60 °C kommen, die zum Versagen der Tragstruktur führen können (Falkner u. Teutsch, 2006). Bei Bränden können im

Aussenbereich eines Balkens Temperaturen über 100 °C entstehen. Im Balkeninneren werden dagegen durch die schlechte Wärmeleitung des Holzes wesentlich niedrigere Temperaturen erreicht. Zudem verdampft zunächst das im Holz enthaltene Wasser, sodass ein Teil der eingebrachten Energie in Verdampfungswärme umgewandelt wird und einen Anstieg der Temperatur verzögert. Glos u. Henrici (1990) stellten fest, dass die Temperatur im Inneren eines Trägers auf etwa maximal 100 °C steigt. In diesem Bereich ist aber bereits mit einem Abfall der Festigkeit des Holzes zu rechnen. Bei kurzer Brandeinwirkung liegt dagegen die Temperatur bei grossen Querschnitten kaum über der Raumtemperatur.

Im konstruktiven Holzbau wird das Problem des Temperatureinflusses seit einigen Jahren verstärkt erforscht. Frangi et al. (2004) untersuchten vergleichend verschiedene 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. Resorcinharze wiesen erst im Bereich von 180-190 °C Festigkeitsverluste auf.

Niemz (2006) stellte wie Frangi et al. (2004) signifikante Festigkeitsunterschiede zwischen verschiedenen 1K-PUR Klebstoffen fest. Durch weiterführende Arbeiten an der ETH mit 1K-PUR konnte nachgewiesen werden, dass sowohl das Prepolymer als auch die Konfektionierung bei 1K-PUR wesentlichen Einfluss auf die Temperaturbeständigkeit haben (Allenspach, 2007; Kläusler, 2007; Eng, 2006). In den Untersuchungen wurde ein signifikanter Einfluss des Füllstoffgehalts auf die Klebefestigkeit bei hohen Temperaturen festgestellt.

Untersuchungen zum Kriechverhalten von Verklebungen führten u.a. George et al. (2003) und Na et al. (2005) durch. Dabei wird auf ein verstärktes temperaturabhängiges Kriechen von PUR Klebstoffen im Bereich von 40-80 °C hingewiesen. Im Falle einer höheren Anfangsfestigkeit der Verklebungen, bedingt durch einen höheren Anteil an Isocyanat, konnte das Kriechen im Bereich niedriger Temperaturen bis 50 °C verringert werden.

5 Prüfung von 1K-PUR Prepolymeren

5.1 Material und Methoden

5.1.1 Holz

Die Prüfung der Längszugscherfestigkeit nach DIN EN 302-1:2004 (Prüfnorm für tragende Holzbauteile) erfolgte an Prüfkörpern aus Buchenholz (*Fagus sylvatica* L.). Buche weist, verglichen mit den im Bauwesen ansonsten vorwiegend eingesetzten Nadelhölzern, eine relativ hohe Scherfestigkeit ($\tau = 16 \frac{N}{mm^2}$) auf. Dadurch wurde weitgehend gewährleistet, dass die Güte der Klebfugen und nicht die Güte des Holzes geprüft wurde. Außerdem enthält Buchenholz relativ wenig Inhaltsstoffe (Harz, Gerbsäure, ect.), welche unter Umständen mit den Prepolymeren interagieren und somit die Resultate beeinflussen könnten.

Um aber auch das Verhalten der untersuchten Prepolymere mit Nadelholz zu dokumentieren, fanden weiterhin Messungen an Prüfkörpern der Holzarten Fichte (*Picea abies* Karst.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco) statt.

Es wurden die in Tabelle 1 ersichtlichen Varianten bei Variation der Holzart, der Holzfeuchte bei der Verklebung, des Klebstoffs und der Behandlungsart gewählt. Die Verklebungen erfolgten jeweils nach Lagerung bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte im Normalklima ($20/65 \rightarrow \omega = 12\%$). Lediglich mit Buche wurden zusätzlich im Trockenklima ($20/30 \rightarrow \omega = 6\%$) Probekörper verklebt.

Um das Bruchverhalten der Holzarten unabhängig vom Klebstoff zu beurteilen, wurden Vergleichsprüfungen an unverklebten Holzproben nach den verschiedenen Behandlungsarten durchgeführt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Behandlungsarten und Anzahl der Prüfkörper (Erklärung der Behandlungsarten in Abschnitt 5.1.3)

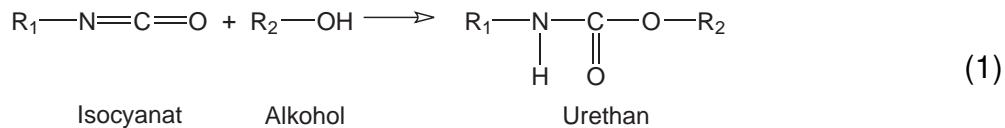
Behandlungsart	Buche ($\omega = 12\%$)	Buche ($\omega = 6\%$)	Fichte ($\omega = 12\%$)	Douglasie ($\omega = 12\%$)
A1	15	15	15	15
A4	15	15	15	15
Wekli	10	10		
T5 (2/4 h)	15 / 15			
T40 (2/4 h)	15 / 15			
T70 (2/4 h)	15 / 15			
T150 (2/4 h)	15 / 15			
T200 (2/4 h)	15 / 15			

5.1.2 Prepolymere

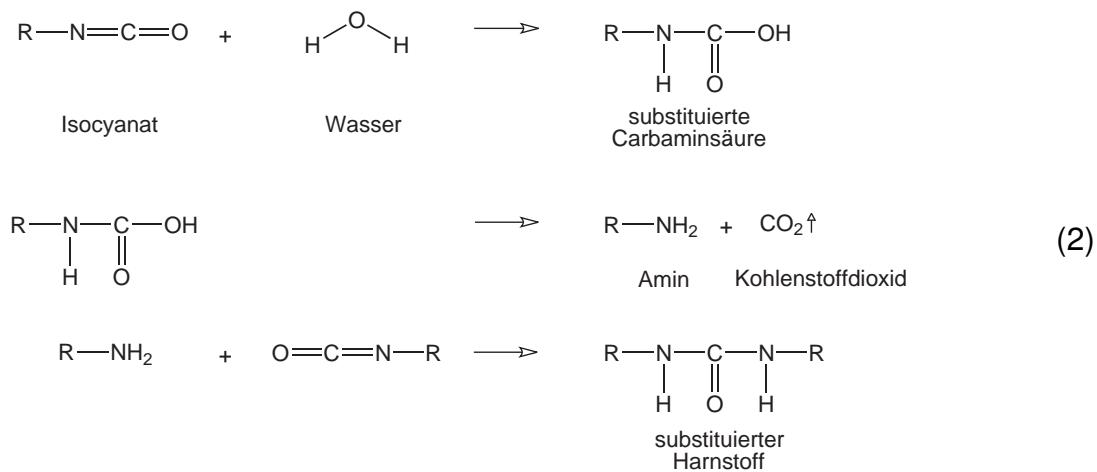
Prepolymere sind Oligomere mit reaktiven Gruppen, die als Vor- oder Zwischenprodukte zur Synthese von Polymeren verwendet werden (Brockhaus, 2005). Im Gegensatz zu fertig konfektionierten 1K-PUR Klebstoffen enthalten diese lediglich die Grundstoffe eines 1K-PUR Klebstoffs, also v.a. Polyole und Isocyanate. Reaktionsbeschleuniger, -verzögerer, Stabilisatoren, flammhemmende Substanzen, Farbstoffe, Füllstoffe und sonstige Zusatzstoffe sind nicht enthalten.

Das Vorhandensein von derartigen Zusätzen hätte eine systematische Untersuchung des Einflusses der wesentlichen Strukturparameter auf die Verklebungsgüte unnötig erschwert, zumal der Einfluss der Zusätze nicht von demjenigen der eigentlichen Prepolymerparameter hätte differenziert werden können.

Polyurethan-Prepolymere werden durch Polyadditionsreaktion aus Polyol und Polyisocyanat hergestellt. Sie bilden die erste Stufe der Vernetzungsreaktion zu Polyurethansklebstoffen. Charakteristisch für Polyurethane ist die Urethangruppe (-NH-CO-O-). Diese entsteht durch die Reaktion der Isocyanatgruppe (-N=C=O) des Polyisocyanates mit der Hydroxylgruppe (-OH) des Polyols (Gleichung 1).



Durch einen Überschuss an Isocyanat findet bei der Anwendung des Prepolymers eine Reaktion mit Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft oder dem Fügeteilwerkstoff statt. Bei der Vernetzungsreaktion (Gleichung 2), welche über mehrere Zwischenschritte erfolgt, wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt welches zum Aufschäumen des Klebstoffs führt.



Die Untersuchung wurde an 23 Prepolymeren durchgeführt, welche von der Bayer MaterialScience AG hergestellt wurden. Davon wurden für den vorliegenden Bericht drei Prepolymere mit den in Tabelle 2 aufgeführten Kennwerten ausgewertet. Die Prepolymere unterschieden sich hinsichtlich ihrer Vernetzungsdichte *VD* ihres Urethangruppengehaltes *U* und ihres Propylenoxidgehaltes *PO*. Daraus resultierte eine unterschiedliche Viskosität bei 23°C η_{23} sowie unterschiedliche Filmbildungs- *FBZ* und Filmtrockenzeiten *FTZ*. Der Isocyanatgehalt *NCO* betrug bei allen Prepolymeren 16 %.

Tabelle 2: Chemische Strukturparameter der Prepolymere

Prepolymer	η_{23} [mPas]	<i>FBZ</i> [h]	<i>FTZ</i> [h]	<i>PO</i> [%]	<i>VD</i> $\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right]$	<i>U</i> $\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right]$	<i>NCO</i> [%]
D	1310	5.0	16.0	40.64	0.215	0.58	16
F	5460	7.0	11.0	38.40	1.248	0.58	16
L	8920	7.0	12.0	36.45	0.872	0.77	16

5.1.3 Behandlungsarten

Vor der Zugscherfestigkeitsprüfung wurden die Prüfkörper verschiedenen Vorbehandlungen unterzogen, um exemplarisch Umgebungsbedingungen zu simulieren. Dazu zählten Temperaturbelastung, Wasser-/Feuchteexposition und Wechselklimabelastung der Klebfugen. Als Behandlungsarten nach dem Verkleben wurden daher folgende Varianten gewählt:

- A1: Normalklima
- A4: 6 h in kochendem Wasser, anschliessend 2 h in 20 °C temperiertem Wasser
- Wekli: Wechselklima, d.h. 4 Zyklen mit jeweils 1 Woche Lagerung bei 25 °C/30 % rel. Lf und 1 Woche Lagerung bei 20 °C/93 % rel. Lf (vor und nach der Wechselklimalagerung waren die Proben im Normalklima untergebracht)
- T5: 2/4 h bei 5 °C gelagert
- T40: 2/4 h bei 40 °C temperiert
- T70: 2/4 h bei 70 °C temperiert
- T150: 2/4 h bei 150 °C temperiert
- T200: 2/4 h bei 200 °C temperiert

5.1.4 Zielgrössen

Die dominierende Zielgröße der Untersuchung war die Zugscherfestigkeit τ . Neben dieser Größe wurden ausserdem die Bruchdehnung ε sowie der Holzbruchanteil bestimmt. Die Dehnung besass aufgrund ihrer grossen Streubreite nur geringe Aussagekraft. Um die Auswirkungen, welche durch die Vielzahl von Einflussgrössen (Tabelle 3) entstehen, differenzieren zu können, wurde eine gezielte Variation der Klebstoffparameter vorgenommen.

Die Zugscherprüfung erfolgte nach DIN EN 302-1, wobei die Prüfkörper der Behandlungsarten A1 und Wekli direkt nach der Lagerung im Normalklima geprüft wurden. Die

Tabelle 3: Einflussgrößen auf die Zugscherfestigkeit

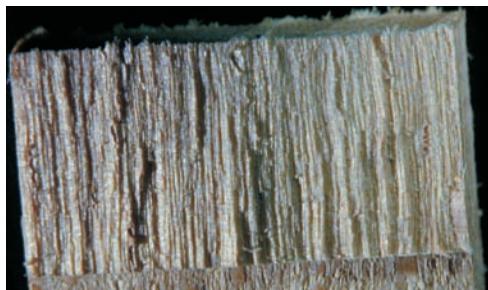
	Zeichen	Bezeichnung	Einheit
Holz	ω	Holzfeuchte	%
		Holzart	
Prepolymer	NCO	Isocyanatgehalt	%
	VD	Vernetzungsdichte	$\frac{mol}{kg}$
	U	Urethangruppengehalt	$\frac{mol}{kg}$
Urethan	H	Harnstoffgruppengehalt	$\frac{mol}{kg}$
	PO	Propylenoxidgehalt	%
	EO	Ethylenoxidgehalt	%
	ω	Holzfeuchte	%
Behandlungsart	T	Temperatur	$^{\circ}C$
	t	Temperzeit	h

temperierten Prüfkörper wurden zuerst im Normalklima konditioniert und anschließend bei der entsprechenden Temperatur gelagert und unmittelbar im Anschluss daran geprüft.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Bruchbild

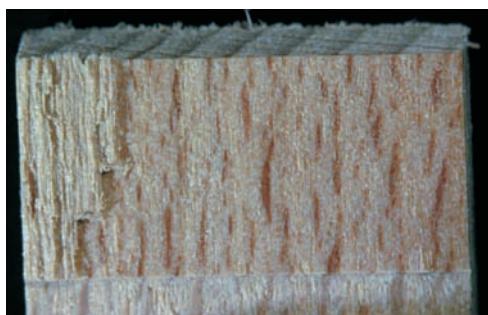
Um die Ursache des Bruchs zu erklären, wurde der Holzbruchanteil in der Klebfuge bestimmt. Diese Beurteilung erfolgt durch eine visuelle Schätzung durch den Prüfenden auf 10 % Genauigkeit. Der Bruch erfolgt entweder vollständig im Holz (Abb. 1(a)), als Kohäsionsbruch direkt in der Klebfuge (Abb. 1(b)) oder als Mischbruch, teilweise in der Klebfuge und teilweise im Holz (Abb. 1(c)).



(a) Holzbruch



(b) Klebstoffbruch



(c) Mischbruch

Abb. 1: Varianten des Bruchbildes

Ziel der Verklebung ist es, die Festigkeit des reinen Holzes zu überschreiten und dadurch eine maximale Sicherheit zu erreichen. Demzufolge ist ein vollständiger Holzbruch anzustreben. Die Auswertung der Daten zeigte, dass 1/3 aller Prüfungen einen Holzbruchanteil von 0 % ergaben (Abb. 2(b)). Die Ursache des Bruchs war in diesem Fall nicht durch Holzversagen bedingt.

Die Verteilung der Werte (Abb. 2(a)) zeigt, dass von 0-100 % Holzbruch eine sehr grosse Streuung der Zugscherfestigkeit vorhanden war. Proben mit bis zu 70 % Holzbruch wiesen keine signifikanten Unterschiede in der Zugscherfestigkeit zu Proben ohne Holzbruch auf. Es existiert demnach kein deutlicher Zusammenhang zwischen Zugscherfestigkeit und Holzbruch. Proben mit einem Holzbruchanteil grösser als 60 % wiesen, entgegen der Erwartung, signifikant niedrigere Festigkeiten als die Proben mit weniger Holzbruch auf.

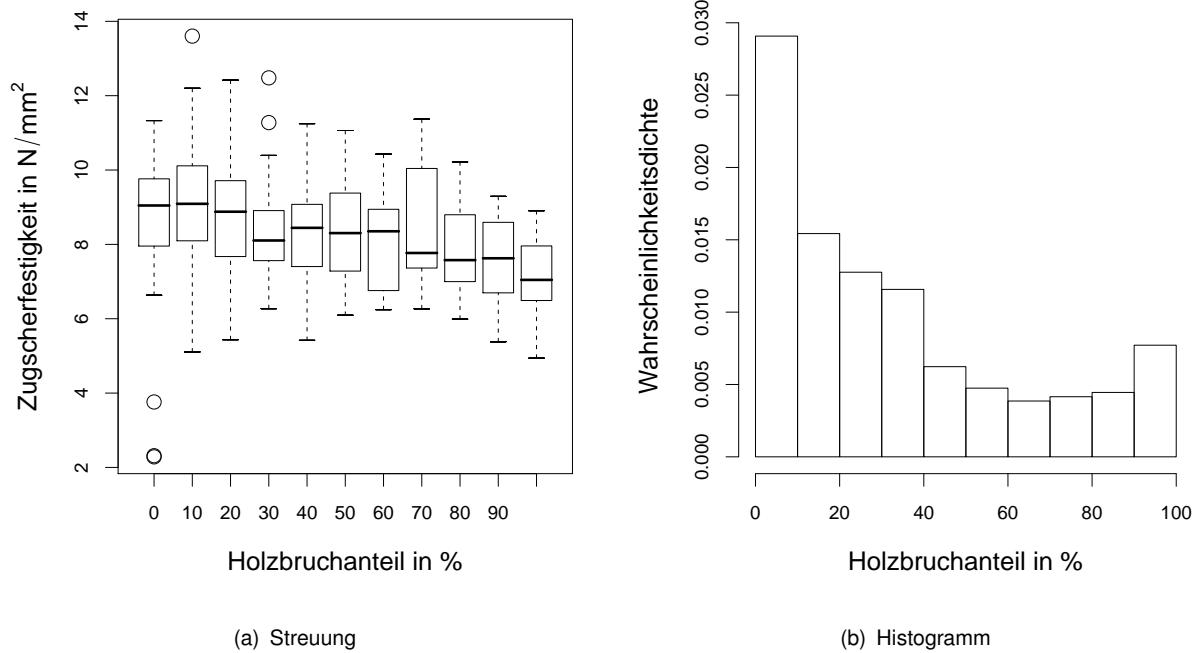


Abb. 2: Streuung und Wahrscheinlichkeitsdichte des Holzbruchanteils des Holzbruchanteils von Fichte, $\omega = 12\%$ (Box: Quartile der Verteilung, Whiskers: $1.5 \times$ Interquartilabstand, Datenpunkte: Ausreisser)

5.2.2 Zugscherfestigkeit des Holzes

Wie in Abb. 3 zu sehen ist, lag die Zugscherfestigkeit des Buchenholzes deutlich höher als die der Nadelhölzer. Fichte und Douglasie sind demnach bei einer zu erwartenden Zugscherfestigkeit des Klebstoffes von über $10 \frac{N}{mm^2}$ nicht geeignet, um die Klebstoffeigenschaften zu testen. Die mittlere Zugscherfestigkeit von Buche bei Normalklima lag bei $15 \frac{N}{mm^2}$. Nach der Behandlungsart A4 betrug die mittlere Festigkeit aller Holzarten etwa 60 % der Festigkeit bei Normalklima. Die Regressionsanalyse für natives Holz ergab für die Temperatur einen signifikanten Zusammenhang mit der Zugscherfestigkeit. Die Messungen ergaben bei 20 °C eine maximale Zugscherfestigkeit. Mit zunehmender Temperatur nahm die Zugscherfestigkeit linear ($R^2 = 0.95$) um $0.039 \frac{N}{mm^2}$ je 1 °C Temperaturzunahme ab (Abb. 4(b)).

Die Temperzeit (Dauer der Temperierung im Ofen) hatte ebenso einen signifikanten Einfluss auf die Zugscherfestigkeit (Abb. 4). Ab 150 °C bewirkte eine Verdopplung der

Temperierungsdauer eine signifikante Abnahme der Festigkeit. Bei einer Abkühlung der Proben zeigte sich ebenfalls eine Reduzierung der Zugscherfestigkeit gegenüber den im Normalklima geprüften Proben.

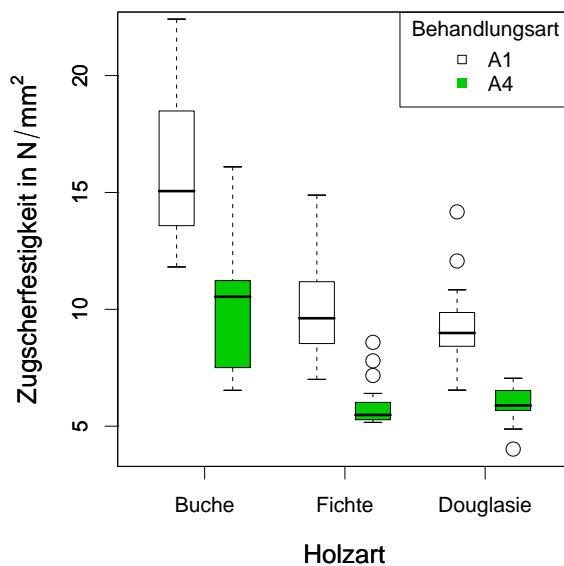


Abb. 3: Zugscherfestigkeit des Holzes in Abhängigkeit von Behandlungsart und Holzart

5.2.3 Temperaturbeständigkeit der Verklebung

Die Zugscherfestigkeit wurde an verklebten Buchenholzproben im Bereich von 5 bis 200 °C geprüft. Dabei wurden die Prepolymere D, L und F (Tabelle 2) verwendet, welche unterschiedliche Vernetzungsdichten und unterschiedliche Viskositäten aufwiesen. Die Temperierung (Bereich 40-200 °C) erfolgte in einem Umluftofen. Die Variante T5 (Abkühlung auf 5 °C) wurde in einem Kühlschrank temperiert. Vor der Klimatisierung wurden alle Varianten bis zur Massenkonstanz im Normalklima gelagert. Die Prüfung der Zugscherfestigkeit erfolgte unmittelbar nach der Entnahme aus dem Ofen bzw. Kühlschrank. Dies führte unweigerlich zur Temperaturänderung in der Klebfuge, der Zeitraum wurde jedoch minimal gehalten.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Temperaturabhängigkeit der Verklebungen. Dabei wurde das Maximum der Zugscherfestigkeit bei den Prepolymeren D und F bei

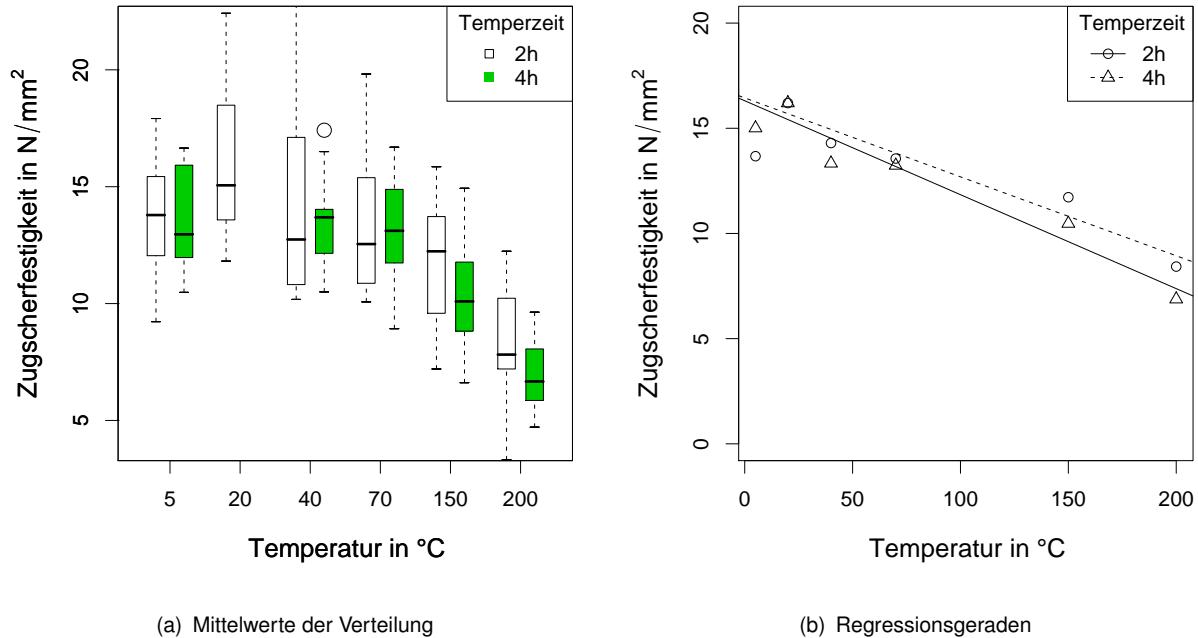


Abb. 4: Zugscherfestigkeit von Buche in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer der Temperierung

40 °C, für L dagegen bei 70 °C erreicht (Abb. 5(a)). Es stellte sich demnach durch die Temperaturbehandlung eine Verfestigung der Klebverbindung ein. Nach Erreichen des Maximums verliefen die Kurven bei allen Prepolymeren monoton fallend. Ein signifikanter linearer Trend lies sich in diesem Bereich nachweisen (Abb. 5(b)). Das Prepolymer L erreichte im gesamten Temperaturbereich die höchsten Werte der Zugscherfestigkeit. Das hierfür der, gegenüber D und F, erhöhte Urethangruppengehalt verantwortlich ist, konnte in weiterführenden Untersuchungen (Clauss, 2008) nicht nachgewiesen werden. Die stark abfallenden Werte des Prepolymers D bei 200 °C konnten auf die geringe Vernetzungsdichte zurückgeführt werden.

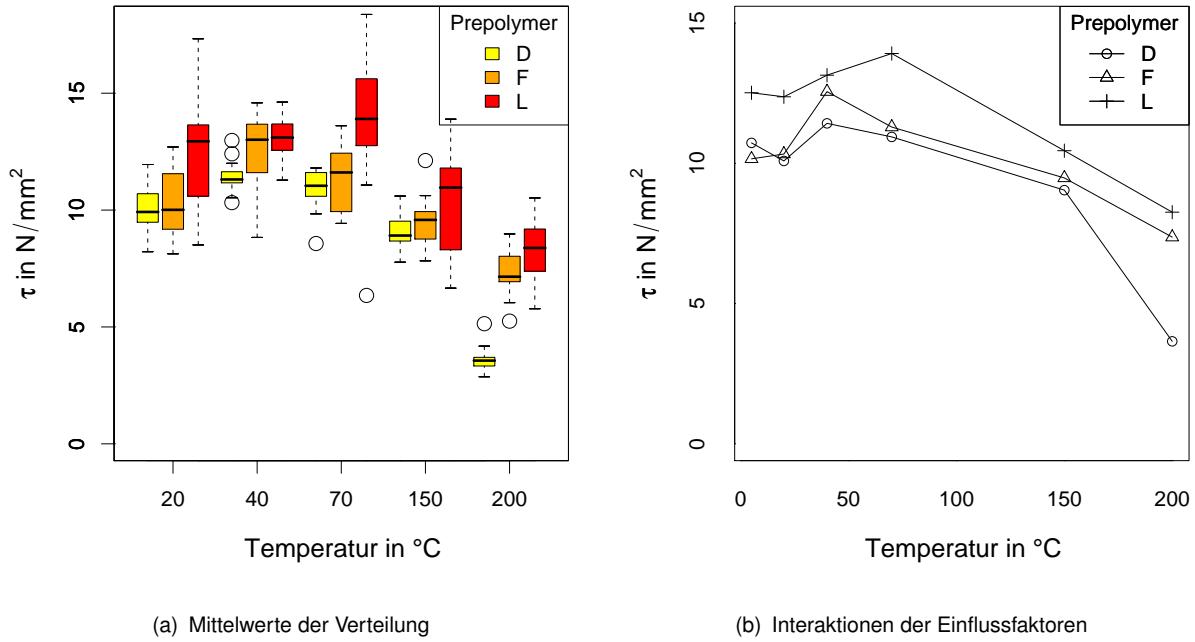


Abb. 5: Zugscherfestigkeit von Klebverbindungen in Abhängigkeit der Temperatur
(Buche, $\omega = 12 \%$)

5.2.4 Einfluss der Holzfeuchte bei der Verklebung

Die Holzfeuchte ω bei der Verklebung wurde in den Stufen 6 und 12 % variiert, wobei ebenfalls die Presszeit angepasst wurde. Bei $\omega = 6 \%$ verblieben die Probekörper 65 h, bei $\omega = 12 \%$ 12 h in der Presse. Man muss festhalten, dass die Prepolymere keine Beschleuniger enthalten, welche die Reaktion antreiben. Im Ergebnis wurde ersichtlich, dass durch eine angepasste Presszeit auch bei geringer Holzfeuchten ausreichende Festigkeiten erzielt werden konnten (Abb. 6). Teilweise waren diese sogar signifikant höher als bei einer Holzfeuchte von $\omega = 12 \%$.

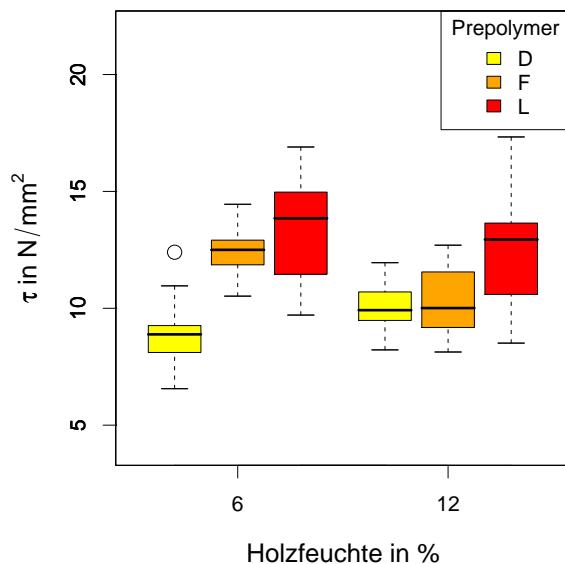


Abb. 6: Zugscherfestigkeit von Klebverbindungen bei Variation der Verklebungsholzfeuchte (Buche, Behandlungsart A1 (Normalklima))

5.2.5 Kochwasserbeständigkeit der Verklebung

Für die Zuordnung von Klebstoffen zu Klebstofftyp I nach DIN EN 301 sind Prüfungen der Zugscherfestigkeit nach unterschiedlichen Behandlungsarten nach DIN EN 302-1 zu erbringen. Dazu zählen die Prüfung im Normalklima A1, die Prüfungen nach Lagerung im warmen Wasser (A2 und A3) und Kochwasserprüfungen (A4 und A5). Klebstoffe dieser Zuordnung dürfen uneingeschränkter Bewitterung bei Temperaturen unter 50 °C oder auch längere Zeit hohen Temperaturen (>50 °C) ausgesetzt werden (EN 301, 2006). Zur Prüfung der Zugscherfestigkeit wurde nach Behandlungsart A1 und A4 verfahren. Die Behandlung A4 schreibt eine sechsständige Behandlung der Prüfkörper in kochendem Wasser und anschliessende Lagerung von 2 h in 20 °C warmen Wasser vor. Anschliessend sind die Proben umgehend im feuchten Zustand zu prüfen. Die zu erreichende mittlere Zugscherfestigkeit beträgt $6 \frac{N}{mm^2}$. Bei der Behandlungsart A1 werden die Prüfkörper nach 7-tägiger Lagerung im Normalklima geprüft. Die zu erreichende Festigkeit beträgt hier $10 \frac{N}{mm^2}$.

Die ausgewählten Prepolymere erreichten nach Behandlungsart A1 allesamt den durch die Norm geforderten Wert. Nach Behandlungsart A4 hingegen wurde die Anforderung

bei allen Klebstoffen klar unterschritten. In Abb. 7 zeigt sich das ersichtlich höhere Niveau des Prepolymers L im Fall der Behandlungsart A1. Nach Kochwasserexposition war kein Unterschied zwischen der Prepolymeren feststellbar. Hier lagen alle Klebstoffe auf gleichem Niveau. Das Versagen war, unabhängig von der Behandlungsart, vollständig auf Klebstoffbruch zurückzuführen. Lediglich bei Prepolymer L kam es bei vereinzelten Proben zu Holzbruch (max. 10 %).

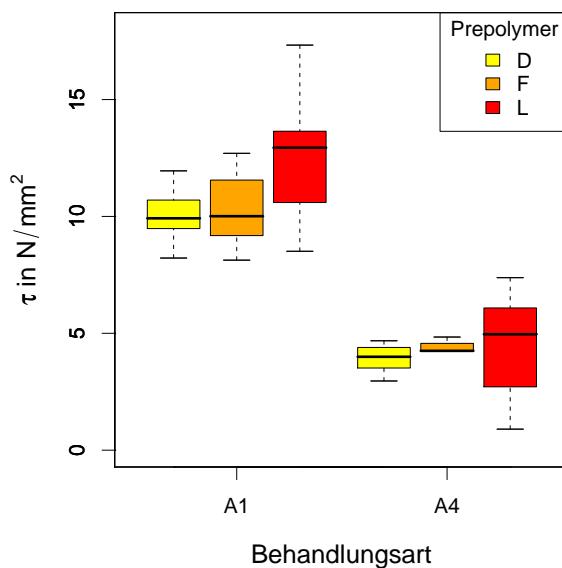


Abb. 7: Zugscherfestigkeit von Klebverbindungen nach Behandlungsart A1
(Normalklima) und A4 (Kochwasserexposition) (Buche, $\omega = 12\%$)

5.3 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Variation der chemischen Parameter liessen sich Zusammenhänge zwischen diesen Parametern und der Zugscherfestigkeit der Holz-Klebstoffverbindung erkennen. Besonderen Einfluss auf die Festigkeit hatte demnach der Harnstoffgruppengehalt. Unterhalb von $2 \frac{mol}{kg}$ wurden nur mässige Festigkeiten erreicht. Des Weiteren spielte die Vernetzungsdichte eine entscheidende Rolle für das Endergebnis. Bei hoher Vernetzungsdichte konnten sowohl bei $2 \frac{mol}{kg}$ als auch bei $2.5 \frac{mol}{kg}$ Harnstoffgruppengehalt gute Ergebnisse erzielt werden. Tendenziell stieg die Zugscherfestigkeit mit Zunahme von Harnstoffgruppengehalt und Vernetzungsdichte im gesamten Temperaturbereich. Der Urethangruppengehalt und der Ethylenoxididgehalt hatten keinen signifi-

kanten Einfluss auf die Zugscherfestigkeit. Die Methoden zur Variation der Funktionalität zeigten keine signifikanten Unterschiede in der Zugscherfestigkeit. Ein Einfluss der Feuchte vor der Verklebung konnte zwar in einigen Serien nachgewiesen werden, jedoch ist das Ergebnis durch die unterschiedlichen Presszeiten nicht aussagekräftig. Festzustellen ist, dass bei ausreichender Presszeit trotz geringer Holzfeuchte praktisch identische Festigkeiten erreicht werden konnten. Die Dauer der Temperierung zeigte lediglich bei reinen Holzproben einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit. Bei verklebten Proben war der Einfluss aufgrund der Streuung nicht nachweisbar. Nach der Kochwasserexposition (A4) fielen die Zugscherfestigkeiten aller Klebstoffe auf etwa 40 % des Wertes, welcher bei Normalklima (A1) ermittelt wurde. Der Harnstoffgruppengehalt war der wesentliche Einflussfaktor für die Zugscherfestigkeit bei Feuchteexposition. Die Vernetzungsdichte, der Urethangruppengehalt, sowie der Ethylenoxidgehalt zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die Zugscherfestigkeit.

6 Prüfung von gefüllten 1K-PUR Klebstoffen

6.1 Material und Methoden

6.1.1 Klebstoff

Für die Untersuchung zum Einfluss des Füllstoffgehalts wurde der labortechnisch hergestellte Klebstoff Purbond VN 3060 der Firma Purbond verwendet. Es handelte sich hierbei um einen 1K-PUR Klebstoff auf Basis eines Isocyanat-Prepolymers, der in drei verschiedenen Varianten vorlag. Die nachstehende Tabelle gibt Auskunft über die unterschiedlichen Gehalte des Füllstoffs Kreide. Der Isocyanat-Anteil des Prepolymers betrug ca. 15 %. Nebst Kreide waren zusätzlich ca. 10 % eines organischen Füllstoffs beigemischt.

Tabelle 4: Verschiedene Kreideanteile bei Purbond VN 3060

Klebstoff	Kreideanteil
Purbond VN 3060/1	0 %
Purbond VN 3060/2	15 %
Purbond VN 3060/3	30 %

Füllstoffe sind nichtflüchtige, im Klebstoff unlösliche, nicht klebende Stoffe (Zeppenfeld u. Grunwald, 2005). Ein Füllstoff wird einem Klebstoff zugesetzt, um die Festigkeit, die Beständigkeit, die Verarbeitungseigenschaften oder andere Klebstoffeigenschaften zu modifizieren DIN EN 923. Füllstoffe erhöhen den Feststoffanteil der Dispersion und haben im Gegensatz zu Streckmitteln keine Klebkraft. Sie können jedoch die Verarbeitungseigenschaften verbessern und werden vor allem aus Preisgründen zugegeben. Je höher die Zugabe von Streck- und Füllmitteln, desto höher ist die Viskosität des Klebstoffs, sofern nicht gleichzeitig auch Lösemittel zugegeben wird (Dunký u. Niemz, 2002). Füllstoffe erhöhen die Warmwasser- und Kochwasserbeständigkeit der Klebfuge und bei dicken Klebfugen die Fugenbeständigkeit. Sie werden dem Klebstoff in Mengen von 5 – 30 % zugesetzt. Als Füllstoffe eignen sich mineralische Stoffe (Silikate, Porzellanerde, Kaolin), ausgehärtete Duroplaste, Mikrohohlkugeln, Russ, Fasern, Aluminiumpulver sowie Mehl von Rinden, Nuss- oder Kokosnussschalen und Holzmehl

(Zeppenfeld u. Grunwald, 2005). Die häufigsten Füllstoffe sind Calciumcarbonat (Kreide), Calciumsulfat (Leichtspat), Tonerde, Bentonite und Holzmehl (Dunký u. Niemz, 2002). Die Eignung der verschiedenen Füllstoffe ist abhängig von ihrer Teilchenform, der chemischen Zusammensetzung, Kristallstruktur, Dispergierbarkeit und Mischbarkeit mit dem Klebstoff. Weitere Einflussgrößen sind deren Farbe, Löslichkeit, Feuchte, pH-Wert, Dichte und Härte. Kreide gehört zusammen mit Quarz und Schwerspat zu den kubischen Füllstoffen, die eine raue Oberfläche haben, sich gut benetzen und dispergieren lassen. Kreide erhöht die Härte und wird sehr häufig eingesetzt (Zeppenfeld u. Grunwald, 2005).

6.1.2 Holz

Die Prüfung der Zugscherfestigkeit nach DIN EN 302-1 erfolgte an Prüfkörpern aus Buchenholz (*Fagus sylvatica* L.). Als Probekörper wurden gradfasrige Bretter ohne Farbkern gewählt. Die Rohdichte ρ des Holzes im Normalklima betrug $(700 \pm 50) \frac{kg}{m^3}$, die Holzfeuchte ω betrug $(12 \pm 1) \%$. Die Jahrringneigung α des Holzes lag zwischen 30 und 90°.

6.1.3 Verklebung der Probekörper

Die Verklebung der Prüfkörper erfolgte nach DIN EN 302-1 sowie den Angaben der Hersteller. Die Auftragsmenge bei einseitigem Auftrag des Klebstoffs mit einem Spachtel wurde auf $200 \frac{g}{m^2}$ festgelegt. Die Presszeit betrug 150 min und bei einem Pressdruck von $0.7 \frac{N}{mm^2}$. Die Temperatur während des Pressvorgangs lag bei 20 °C bei einer rel. Lf. von ca. 40 %.

6.1.4 Behandlungsarten

Um die geforderte Holzfeuchte zu erreichen, wurden die Prüfkörper während mindestens zwei Wochen in Klimaschränken gelagert. Die temperierten Varianten wurden möglichst genau zwei Stunden lang der geforderten Temperatur ausgesetzt. Um die Holzfeuchte möglichst konstant zu halten, wurden die Prüfkörper während der Temperierung bei 40, 60 und 80 °C im Plastikbeutel eingeschlossen. Bei 100 und 150 °C wur-

den die Prüfkörper ohne Plastikbeutel in den Trockenschränke gelegt, was sich deutlich auf die Holzfeuchte auswirkte. In Tabelle 5 sind die verschiedenen Behandlungsarten zusammengefasst.

Tabelle 5: Klimavarianten der verwendeten Prüfkörper

$T [C]$	$\varphi [\%]$	$\omega_{soll} [\%]$	$\omega_{ist} [\%]$	t_{klima}	Art
20	35	6	6.4	≥ 14 d	Klimaschrank
20	65	12	11.96	≥ 14 d	Klimaraum
20	85	18	16.52	≥ 14 d	Klimaschrank
20	95	26	21.44	≥ 14 d	Klimaschrank
40	-	12	11.85	2 h	Trockenschränke im Plastikbeutel
60	-	12	11.46	2 h	
80	-	12	11.03	2 h	
100	-	0	1.85	2 h	Trockenschränke ohne Plastikbeutel
150	-	0	± 0	2 h	

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Feuchtebeständigkeit der Verklebung

Zugscherfestigkeit Abb. 8 zeigt die Zugscherfestigkeit in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts der verschiedenen Klimavarianten. Bei einer rel. Lf. von $\varphi = 35\%$ zeigte sich ein deutlicher Einfluss des Füllstoffgehalts auf die Festigkeit. Bei den Stufen $\varphi = 65\%$ und $\varphi = 85\%$ zeigte sich nur noch zwischen 15% und 30 % Füllstoffgehalt ein Einfluss auf die Zugscherfestigkeit. Ab einer rel. Lf. von $\varphi = 95\%$ bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten der Verteilungen. Ein paarweiser T-Test bestätigte diese Aussagen bei einem Signifikanzniveau von 5 %.

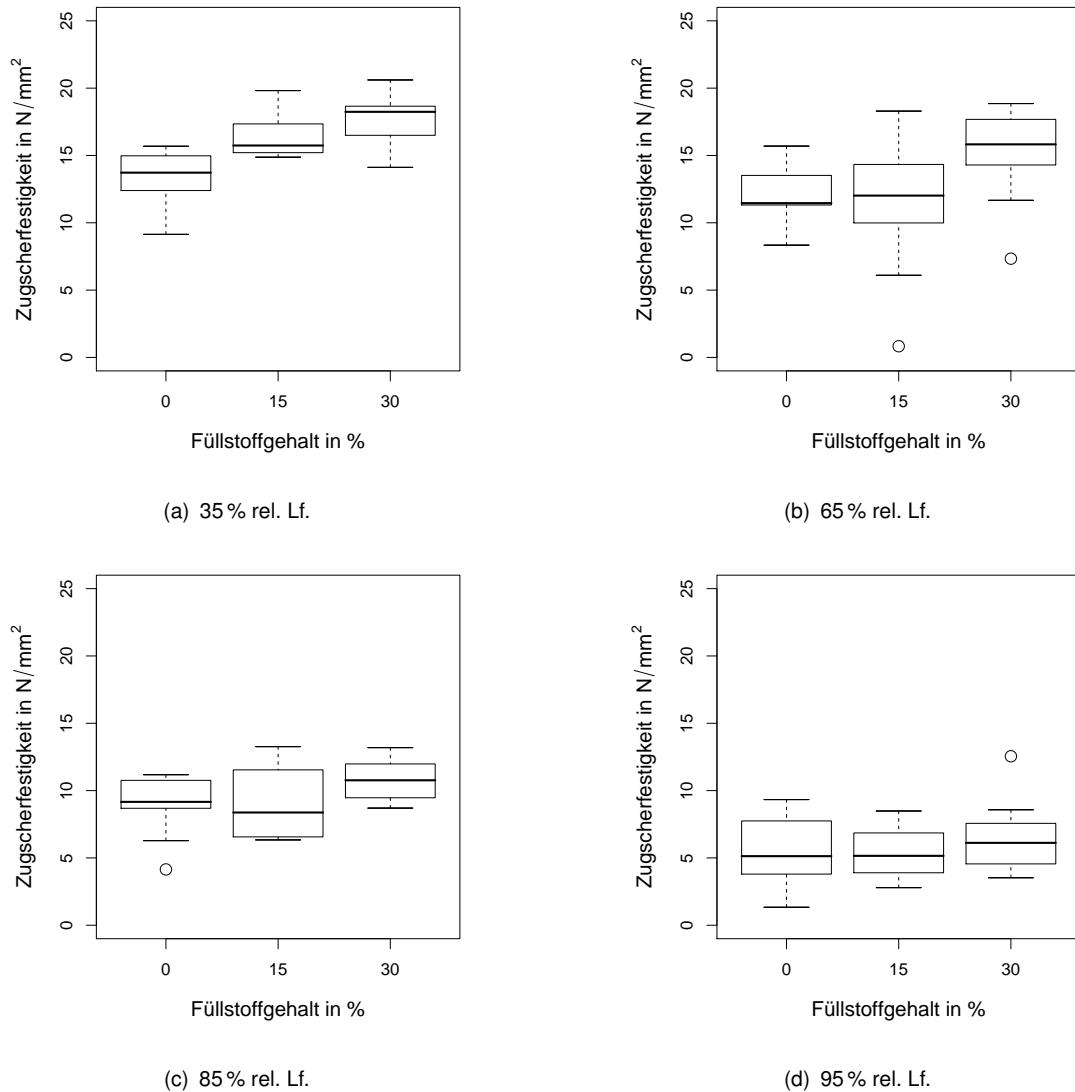


Abb. 8: Zugsscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte

In Abb. 9 zeigte sich ein deutlicher Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts auf die Zugscherfestigkeit. Die Festigkeit nahm mit zunehmender Luftfeuchte, bzw. daraus resultierender Holzfeuchte, deutlich ab. Eine Interaktion von Klebstoff und Luftfeuchte, d.h. eine wechselseitige Beeinflussung der Faktoren wurde auf dem Signifikanzniveau von 5% knapp ausgeschlossen.

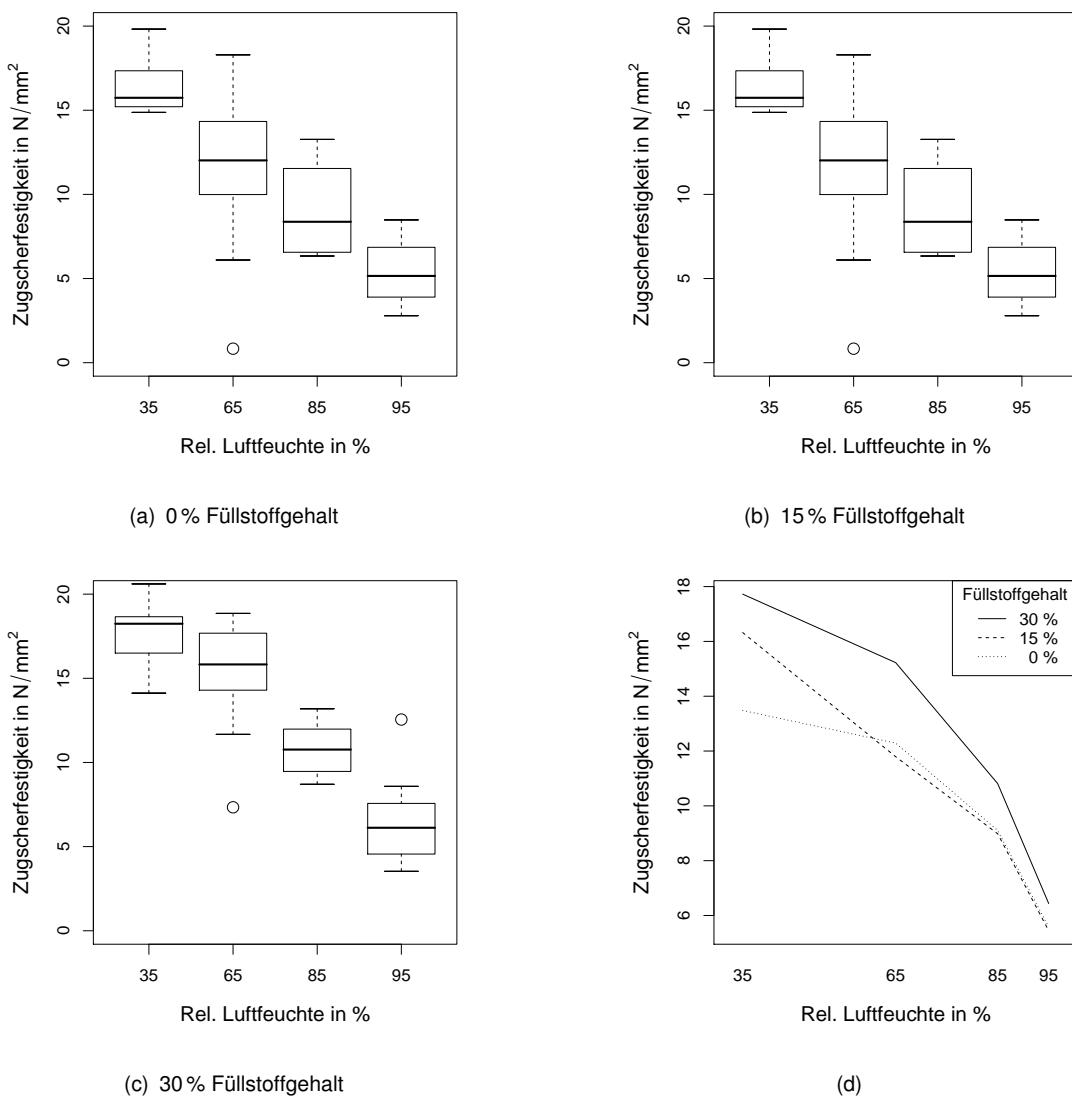


Abb. 9: Zugscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte

Holzbruchanteil Aus Abb. 10(d) wird ersichtlich, dass kein Einfluss des Füllstoffgehalts auf den Holzbruchanteil vorhanden war. Die Luftfeuchte, bzw. die daraus resultierende Holzfeuchte, bewirkte jedoch eine stetige Abnahme des Holzbruchanteils bei zunehmender Luftfeuchte (Abb. 10(a)-10(c)). Es bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen Holzbruchanteil und Luftfeuchte im gesamten Messbereich von 35 bis 95 % rel. Lf. Bei einer rel. Lf. von 95 % ging der Holzbruchanteil praktisch gegen Null. Der Bruch wurde demnach ausschliesslich durch Klebstoffversagen verursacht.

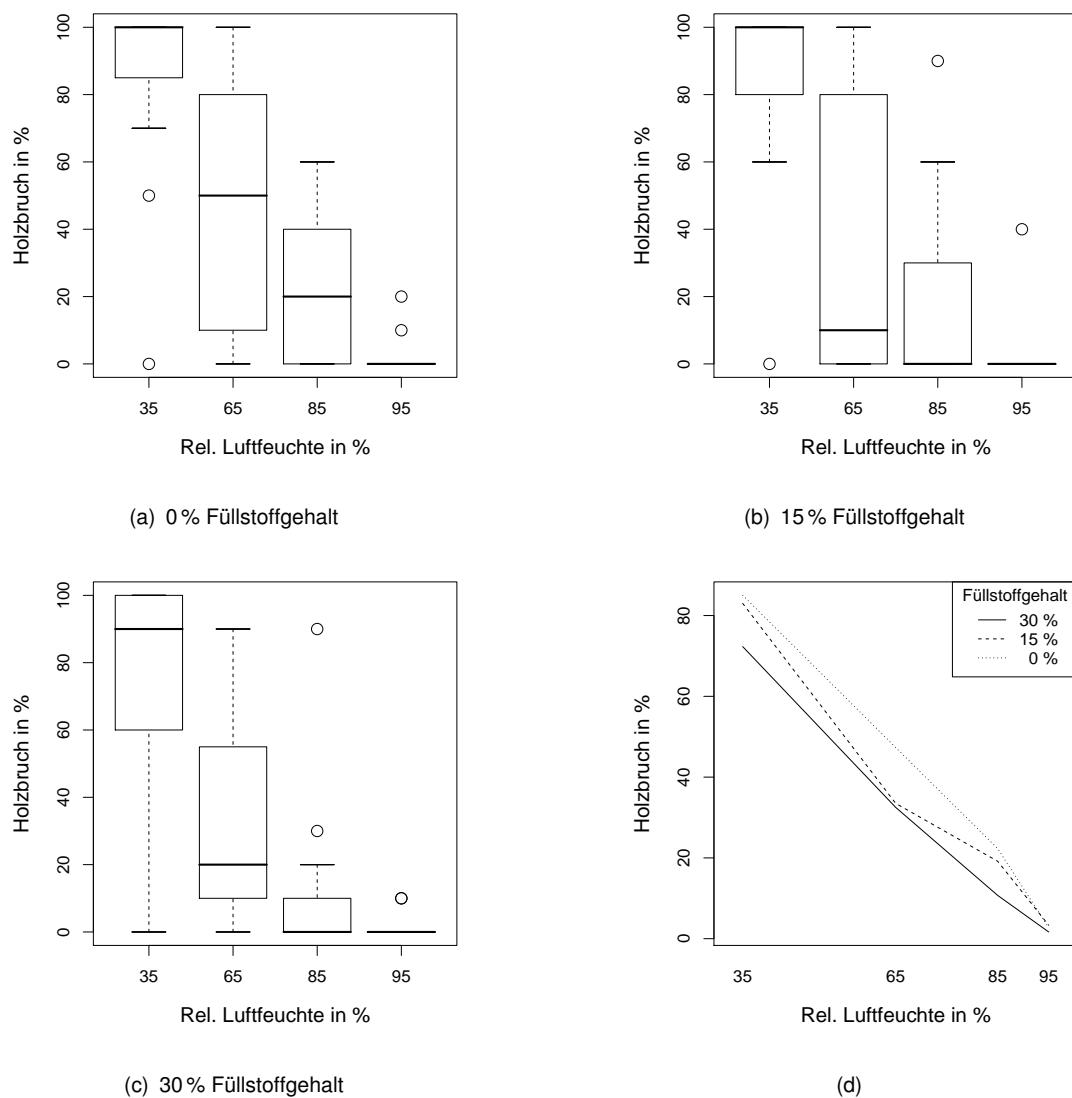
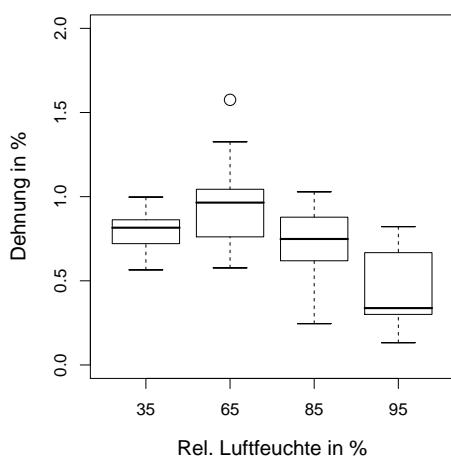
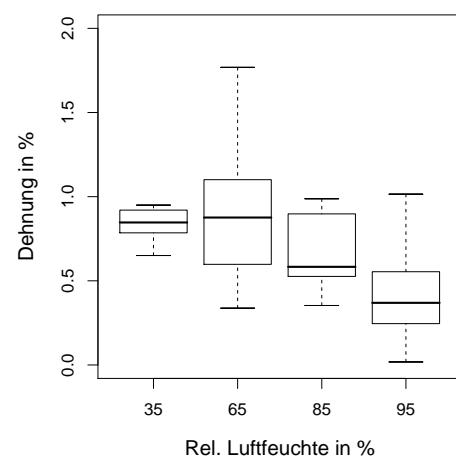


Abb. 10: Holzbruchanteil von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte

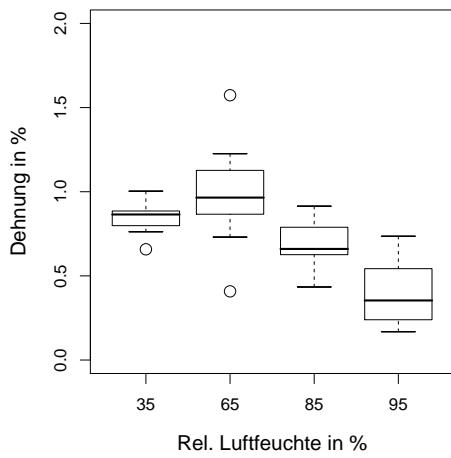
Dehnung Die Varianzanalyse zum Einfluss der Luftfeuchte und des Füllstoffgehalts auf die Dehnung bis zum Versagen des Prüfkörpers ergab für den Füllstoffgehalt keine Signifikanz. Der Feuchteeinfluss auf die Dehnung war hingegen hoch signifikant (Abb.11). Der Zusammenhang zwischen Dehnung und Feuchte ergab bei 65 % rel. Lf. ein Maximum im Kurvenverlauf.



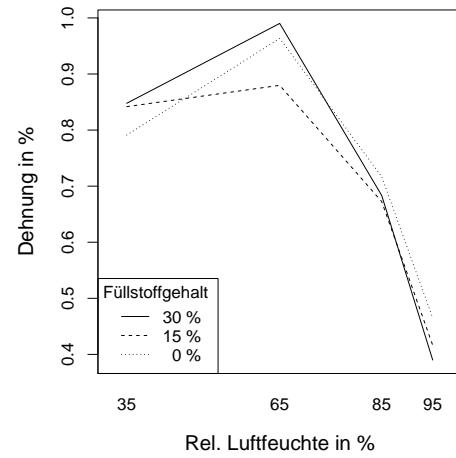
(a) 0 % Füllstoffgehalt



(b) 15 % Füllstoffgehalt



(c) 30 % Füllstoffgehalt



(d)

Abb. 11: Dehnung bis zur Maximalkraft von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte

6.2.2 Temperaturbeständigkeit der Verklebung

Zugscherfestigkeit Die Untersuchung zum Einfluss des Füllstoffgehalts auf die Zugscherfestigkeit bei hohen Temperaturen ergab einen hochsignifikanten Zusammenhang. Mit zunehmendem Füllstoffgehalt nahm die Festigkeit im gesamten Temperaturbereich von 20 bis 150 °C zu (Abb. 12). Ein Temperatureinfluss auf die Festigkeit war ebenso vorhanden, jedoch zeigte dieser nur geringe Effekte (Abb. 13). Tendenziell nahm die Zugscherfestigkeit mit steigender Temperatur um etwa $1.7 \frac{N}{mm^2}$ je 100 °C ab. Eine Erhöhung des Füllstoffgehalts von 0 auf 30 % bewirkte hingegen eine Erhöhung der Zugscherfestigkeit um $3.5 \frac{N}{mm^2}$.

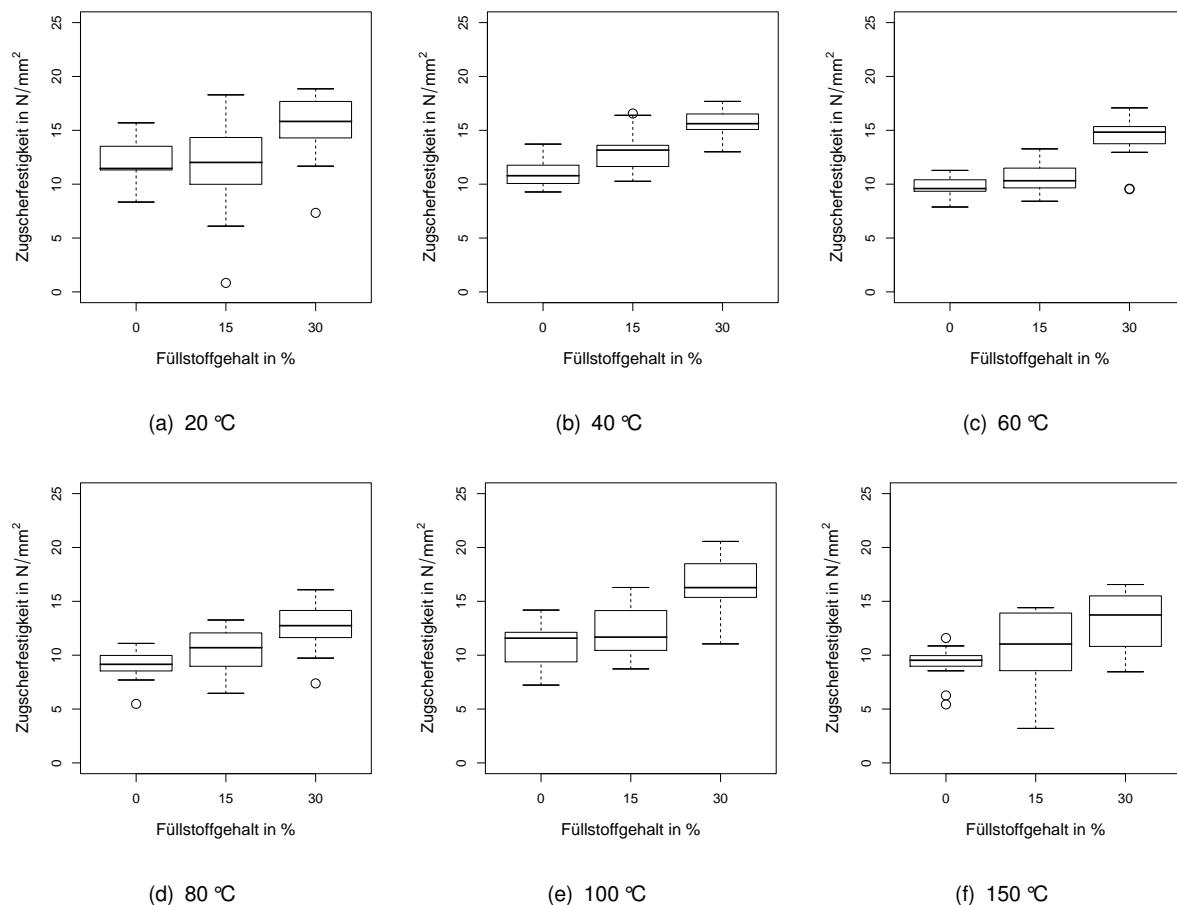


Abb. 12: Zugscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur

Eine Interaktion der Faktoren Klebstoff und Temperatur war nicht vorhanden. Beson-

ders fiel auf, dass bei allen Füllstoffgehalten bei 100 °C ein erhöhter Wert der Zugscherfestigkeit zu verzeichnen war. Ein paarweiser T-Test mit den benachbarten Faktorstufen ergab einen signifikanten Unterschied der Mittelwerte.

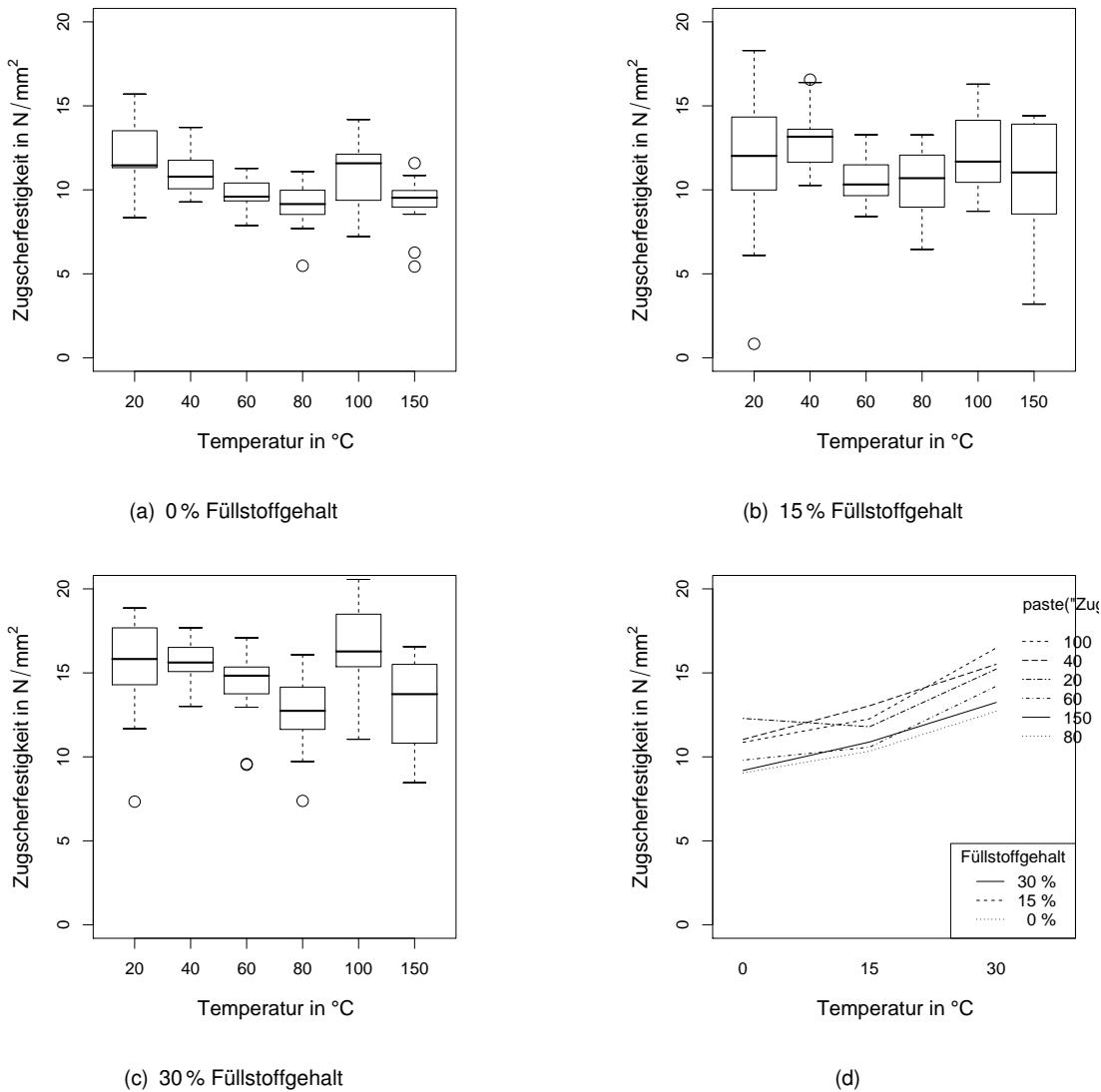


Abb. 13: Zugscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur

Holzbruchanteil Der Holzbruchanteil wurde durch keinen der beiden Faktoren, Temperatur und Füllstoffgehalt, beeinflusst.

Dehnung Die Dehnung wurde durch die Temperatur lediglich bei ungefüllten Klebstoffen beeinflusst (Abb. 14). Dennoch bestand keine signifikante Interaktion zwischen Füllstoffgehalt und Temperatur. Der Füllstoffgehalt hingegen hatte einen starken Einfluss auf die Dehnung im gesamten Temperaturbereich von 20 bis 150 °C (Abb. 15).

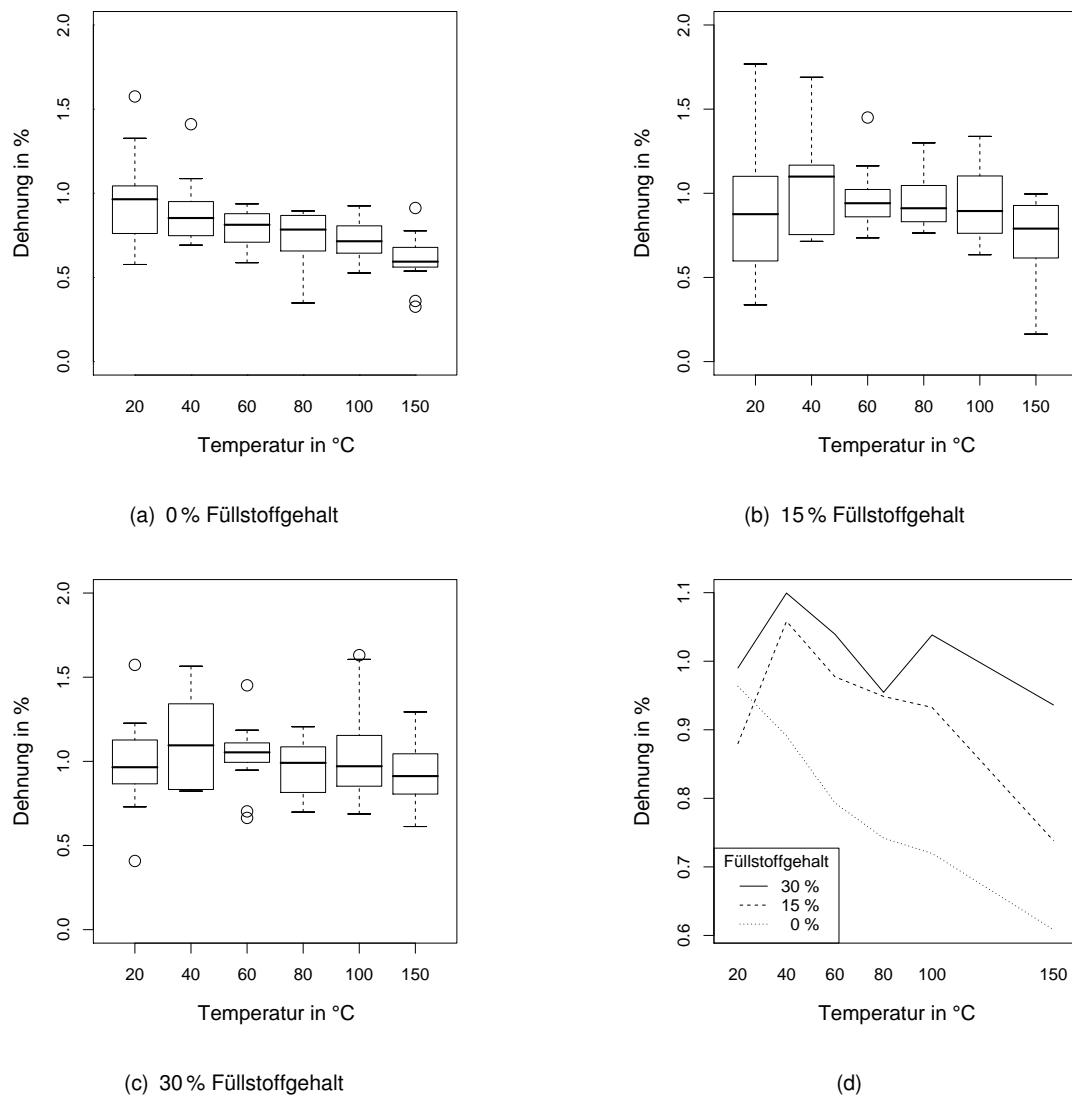


Abb. 14: Dehnung bis zur Maximalkraft von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur

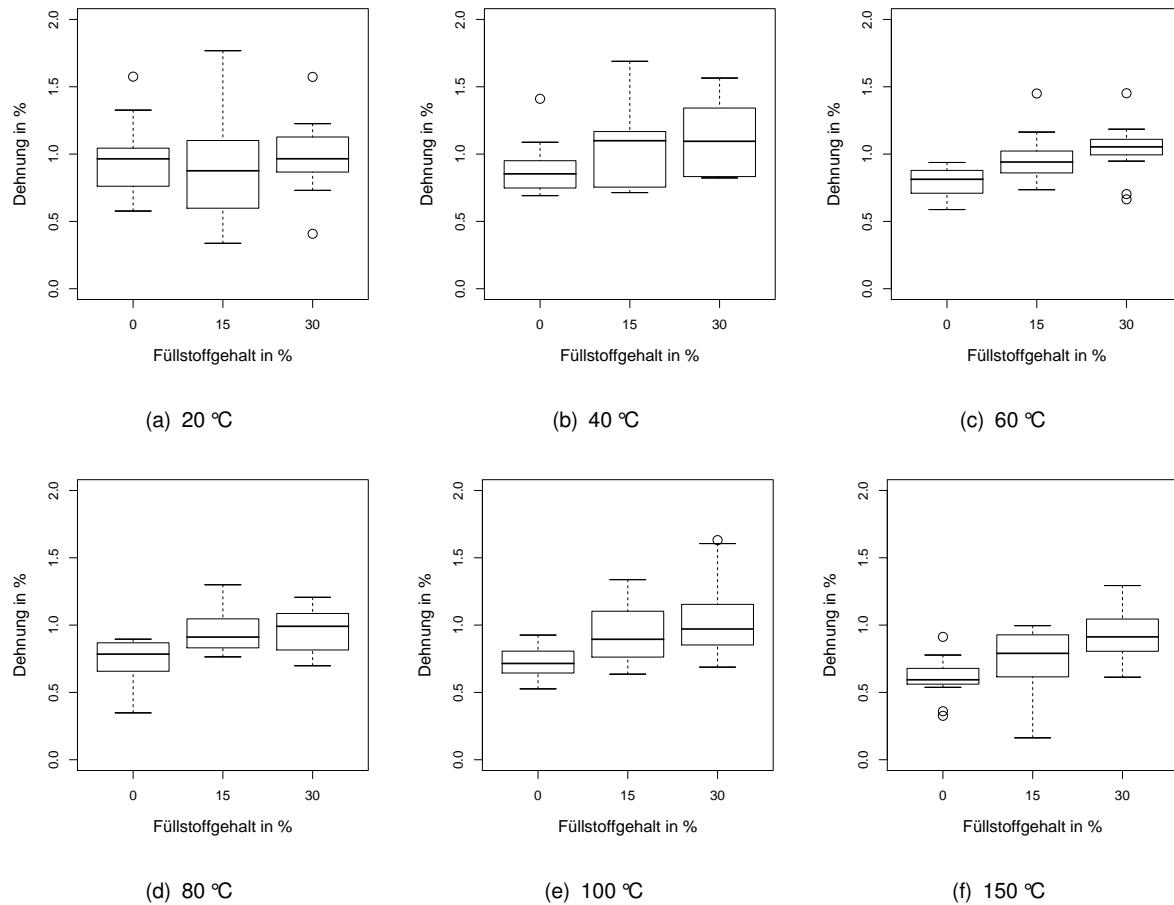


Abb. 15: Dehnung bis zur Maximalkraft von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur

6.3 Zusammenfassung und Ausblick

Der Füllstoffgehalt von Kreide hat einen deutlichen Einfluss auf die Zugscherfestigkeit von Holz-Klebstoffverbindungen bei Feuchte- und Temperaturbelastung. Im Bereich niedriger Umgebungsfeuchte erreichten die Klebstoffe mit zunehmendem Kreideanteil höhere Festigkeiten. Bei hohen Luftfeuchten ($\varphi = 95\% \text{ rel. Lf.}$) war kein signifikanter Einfluss feststellbar.

Ein Einfluss des Füllstoffgehalts auf die Dehnung sowie den Holzbruchanteil bei Feuchteexposition war nicht feststellbar. Die Temperaturbeständigkeit der Klebstoffe wurde durch den Füllstoffgehalt deutlich verbessert. Im gesamten Temperaturbereich von 20

bis 150 °C stieg die Festigkeit signifikant mit Zunahme des Füllstoffgehalts an.

Der Holzbruchanteil wurde durch den Füllstoffgehalt nicht beeinflusst.

Aus den Ergebnissen ging hervor, dass Klebstoffe ohne Kreide bei Temperierung an Dehnbarkeit verloren. Bereits ab 40 °C wurde diese Erscheinung deutlich. Die Bruchdehnung war im Vergleich zum Normalklima deutlich reduziert. Bei 30 % Kreideanteil lag die Bruchdehnung konstant bei 1 % über den gesamten Temperaturbereich.

Bei der Verklebung kam es vermehrt zur Blasenbildung des Klebstoffs. Auswirkungen auf die Festigkeit konnten jedoch nicht festgestellt werden.

7 Dynamisch Mechanische Analyse

Das Verfahren der Dynamisch-Mechanischen Analyse (DMA) ermöglicht eine qualitative und quantitative Bestimmung mechanischer Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur, Zeit und Frequenz. Bei einer aufgebrachten oszillierenden Probenbelastung können der Elastizitätsmodul, das Dämpfungsverhalten und Informationen zum Fließ- und Relaxationsverhalten sowie zum Aufbau und der Struktur von Polymeren gewonnen werden.

7.1 Theorie des Verfahrens

Die eingespannte Probe wird, je nach Modus, bei oszillierender Probenbelastung auf Biegung, Scherung, Zug, Druck oder Torsion beansprucht. Dabei wird der Kraft-Wegverlauf über der Zeit aufgenommen. Aus den gemessenen Kraft- und Wegamplituden F_a , L_a und deren Phasenverschiebung δ kann der Modul berechnet werden.

$$|M^*| = S \cdot g = \frac{F_a}{L_a} g \quad (1)$$

Die Grösse S entspricht hierbei der Steifigkeit, welche aus den Kraft- und Wegamplituden berechnet werden kann. Der Geometriefaktor g berücksichtigt die Dimensionen der Probe und wird aus deren Abmessungen errechnet. Aus dem komplexen Modul M^* lassen sich der Speichermodul M' , der Verlustmodul M'' , und der Verlustfaktor δ berechnen.

$$M' = |M^*| \cos \delta \quad (2)$$

$$M'' = |M^*| \sin \delta \quad (3)$$

$$\tan \delta = \frac{M''}{M'} \quad (4)$$

Der Verlustmodul ist proportional zu der in Wärme umgewandelten Energie, wohingegen der Speichermodul proportional zur elastisch reversibel gespeicherten Energie ist.

Bei rein elastischen Stoffen tritt demnach keine Phasenverschiebung δ auf, rein viskose Stoffe dagegen weisen 90° Phasenverschiebung zwischen Kraft- und Wegverlauf auf (Abb. 16).

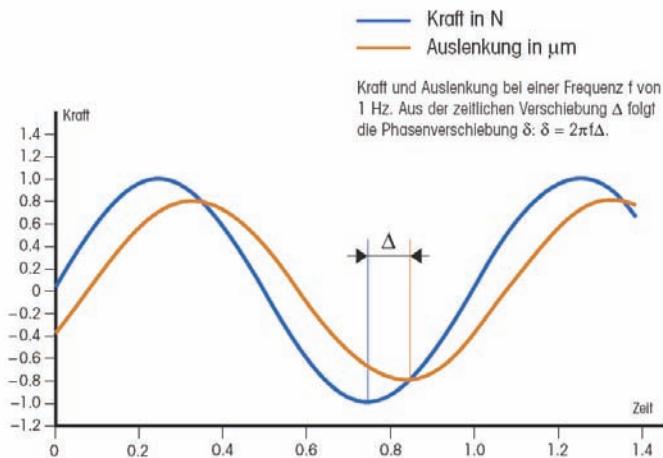


Abb. 16: Phasenverschiebung zwischen Kraft- und Wegverlauf (Mettler-Toledo, 2007)

7.2 Material und Methode

Die DMA Analyse wurde durch die Bayer MaterialScience AG in Leverkusen durchgeführt. Dabei wurde der E-Modul bei Zugbelastung und der Schubmodul bei Scherbelastung ermittelt. Die Holzproben wurden an der ETH Zürich, in Form von Flachproben, mit den Abmessungen $L \times B \times H = 50 \times 10 \times 4 \text{ mm}$ hergestellt. Es wurden die Holzarten Buche (*Fagus sylvatica* L.), Fichte (*Picea abies* Karst.) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Franco) geprüft. Die Längsrichtung der Proben entsprach zum einen der longitudinalen Orientierung des Holzes und zu anderen der radialen. Die Orientierung in der Probendicke entsprach jeweils der tangentialen Orientierung.

Die Temperatur wurde im Versuch zwischen -150 und 300 °C mit einer Heizrate von $2 \frac{\text{°C}}{\text{min}}$ variiert. Die Messfrequenz betrug 1 Hz bei einer Amplitude von $10 \mu\text{m}$.

7.3 Versuchsergebnisse

In den Abb. 17-20 werden die Messkurven der Holzproben abgebildet. Es werden jeweils die Speichermoduln bei Zug E' und Scherung G' sowie die Verlustfaktoren der unterschiedlichen Holzarten über der Temperatur dargestellt. Eine statistische Auswertung war aufgrund der geringen Datenbasis nicht möglich.

Bei Scherbelastung zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Holzarten. Die Speichermoduln G' von Buche lagen im gesamten Temperaturbereich über den Werten von Fichte und Douglasie, sowohl in der LT-Ebene (Abb. 17(a)), als auch in der RT-Ebene (Abb. 18(a)). Douglasie wies in beiden gemessenen Ebenen höhere Schubmoduln als Fichte auf. Tendenziell nahmen die Schubmoduln mit zunehmender Temperatur ab.

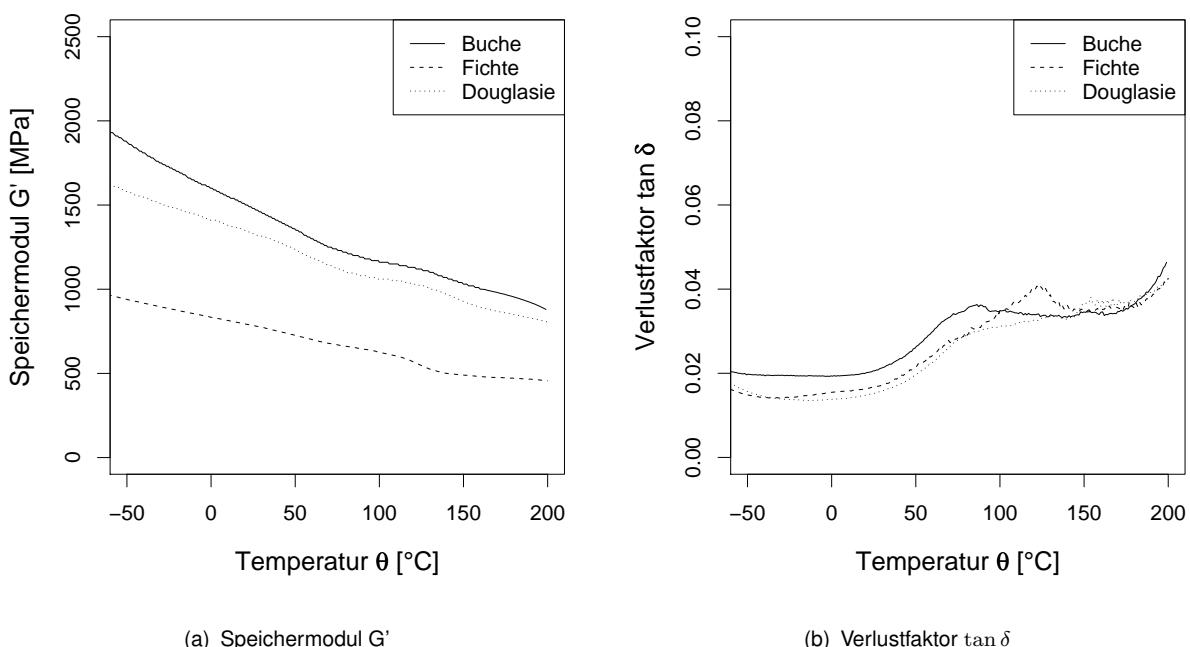


Abb. 17: Viskoelastische Eigenschaften von Holzproben in der LT-Ebene bei dynamischer Scherbelastung in Abhängigkeit der Temperatur

In der RT-Ebene waren die Unterschiede zwischen den Holzarten deutlicher zu erkennen. Im Vergleich mit Literaturwerten, welche im quasi-statischen Versuch ermittelt wurden, ergaben sich bei der DMA niedrigere Werte (Tabelle 6).

Die steigenden Verlustfaktoren mit einem Peak im Bereich 50 bis 100 °C in den Abb.

17(b) und 18(b) weisen auf die Glasübergangstemperatur des Lignins hin. In Salmén (1984) sowie in Nairn (2005) wird für Fichte eine Glasübergangstemperatur des Lignins von 72 bzw. 74 °C angegeben. In den genannten Arbeiten wurde festgestellt, dass sich die Glasübergangstemperaturen von Laub- und Nadelholz signifikant unterscheiden.

Tabelle 6: Gegenüberstellung des Schubmoduls nach dynamischer und statischer Prüfung bei 20 °C (Werte nach (Grimsel, 1963) (Fi, Bu), Nairn (2005) (Dou))

	θ [°C]	G' [MPa]	G'' [MPa]	G_{statisch} [MPa]
Buche (LT)	20	1510	30	1080
Buche (RT)	20	1050	27	465
Fichte (LT)	20	795	13	775
Fichte (RT)	20	199	6	37
Douglasie (LT)	20	1350	20	
Douglasie (RT)	20	547	12	80

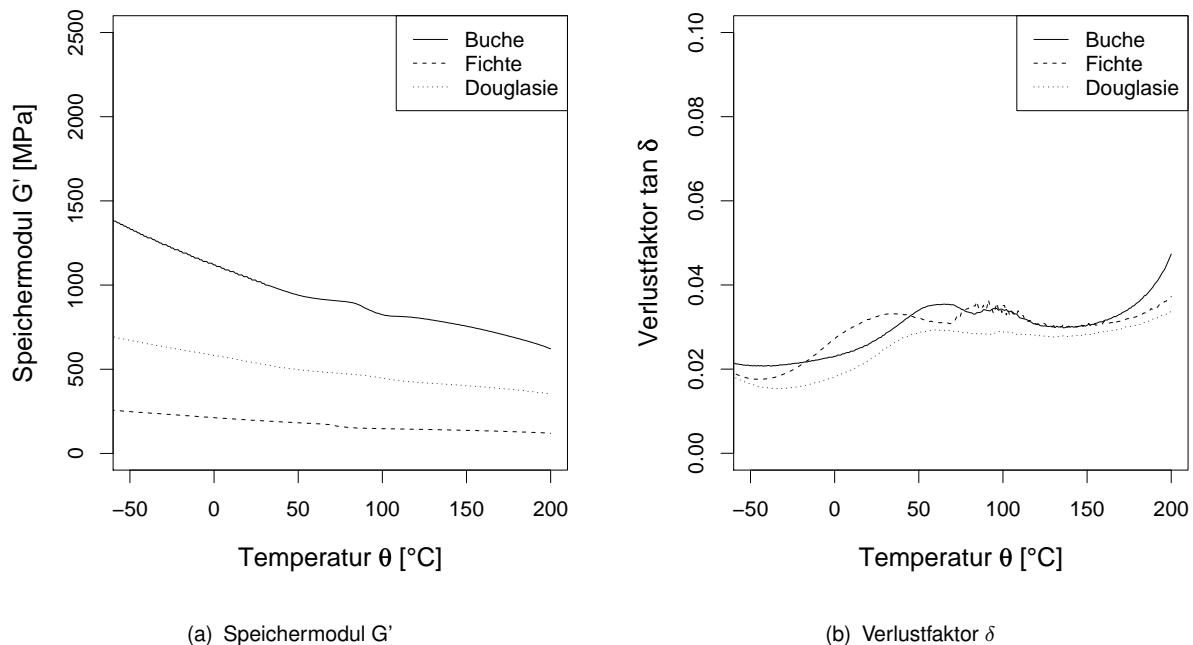


Abb. 18: Viskoelastische Eigenschaften von Holzproben in der RT-Ebene bei dynamischer Scherbelastung in Abhängigkeit der Temperatur

Die Ergebnisse der Messungen bei Zugbelastung zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Orientierungen des Holzes. In longitudinaler Orientierung (Abb. 19(a)) wur-

den wesentlich höhere E-Moduln erreicht als in radialer Orientierung (Abb. 20(a)). Dies entspricht den bekannten anatomisch bedingten Unterschieden, welche im quasistatischen 3-Punkt-Biegeversuch ermittelt wurden. In Tabelle 7 werden die Werte der dynamischen denen der statischen Prüfung gegenübergestellt.

Tabelle 7: Gegenüberstellung des E-Moduls nach dynamischer und statischer Prüfung bei 20 °C (Werte nach (Grimsel, 1963) (Fi, Bu), Nairn (2005) (Dou))

	θ [°C]	E' [MPa]	E'' [MPa]	$E_{statisch}$ [MPa]
Buche (l)	20	8845	3785	14000
Buche (r)	20	1745	58	2280
Fichte (l)	20	7957	2440	16200
Fichte (r)	20	351	21	699
Douglasie (l)	20	9074	3986	14500
Douglasie (r)	20	439	20	960

Der E-Modul in radialer Orientierung entsprach, wie auch im statischen Versuch, etwa 20 % des E-Moduls in longitudinaler Orientierung. Jedoch lagen die dynamisch bestimmten Werte bei lediglich 50 % der statisch ermittelten Werte. Die Ursache hierfür bleibt unklar.

In longitudinaler Orientierung unterschied sich das Laubholz Buche kaum vom Nadelholz Douglasie. Erst bei Temperaturen über 100 °C lagen die Werte von Buche über denen von Douglasie. Die Werte von Fichte unterschieden sich bereits bei Temperaturen unter 0 °C von Buche und Douglasie.

In radialer Orientierung zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen Laub- und Nadelholz. Buche wies bis 150 °C einen wesentlich höheren E-Modul als die Nadelhölzer Douglasie und Fichte auf. Die statisch ermittelten Werte weisen den gleichen Unterschiede auf. Als Ursache ist hierfür der höhere Holzstrahlenanteil von Buche anzugeben, da die Holzstrahlen als verstärkendes Element in der Holzstruktur dienen. Weiterhin stellt die Grenze zwischen Früh und Spätholz eine Schwachstelle im anatomischen Bau der Nadelhölzer da.

Die Verlustfaktoren bei longitudinaler Orientierung ergaben zwei Peaks im Bereich um 0 und 100 °C (Abb. 19(b)). In Untersuchungen von Backman u. Lindberg (2001) wird

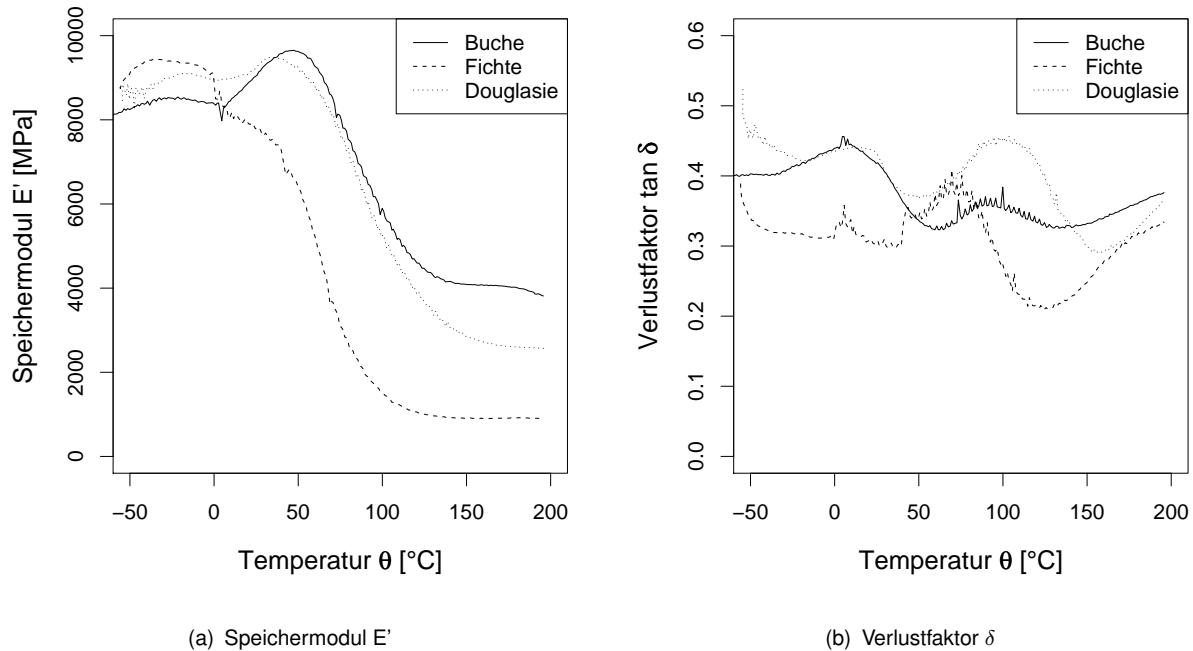


Abb. 19: Viskoelastische Eigenschaften longitudinal orientierter Holzproben bei dynamischer Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Temperatur

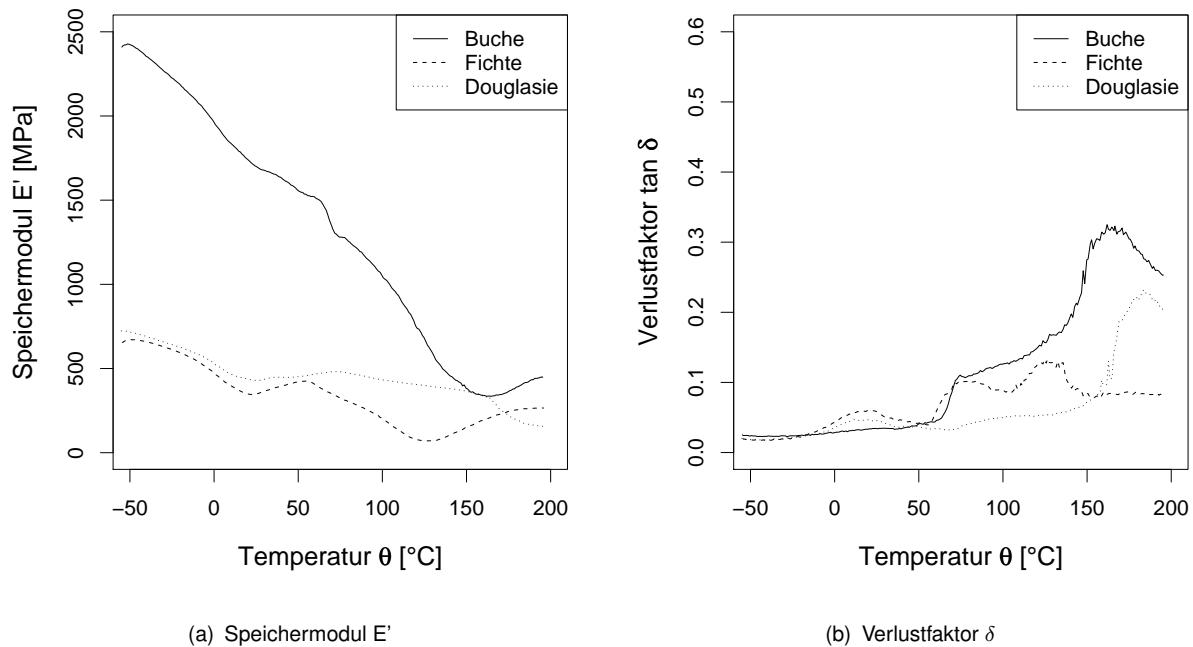


Abb. 20: Viskoelastische Eigenschaften radial orientierter Holzproben bei dynamischer Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Temperatur

das Auftreten eines Peaks bei 0 °C diskutiert. Als mögliche Ursache wird eine Glasübergangstemperatur der Hemicellulose angegeben. Als mögliche Ursache für den Peak zwischen 70 u. 100 °C, ist die Glasübergangstemperatur des Lignins zu nennen.

In Abb. 20(b) ist der Verlustfaktor der radial orientierten Proben dargestellt. Hierbei ist auffällig, dass der o.g. Peak bei 0 °C um etwa 20 °C verschoben war und wesentlich geringer ausfiel. Generell lag der Verlustfaktor auf einem niedrigeren Niveau als bei longitudinaler Orientierung. Weiterhin zeigten sich bei Douglasie und Buche deutliche Peaks bei 150 °C, die in longitudinaler Orientierung nicht auftraten.

7.4 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde das Verfahren der Dynamisch Mechanischen Analyse an Holzproben aus Buche, Douglasie und Fichte angewendet.

Die dynamisch bestimmten E-Moduln lagen wesentlich niedriger (ca. 50 %) als E-Moduln, die im quasistatischen 3-Punkt-Biegeversuchen ermittelt wurden. Unterschiede im elastischen Verhalten bezüglich der anatomischen Orientierungen waren feststellbar. Dabei wurden bei longitudinaler Orientierung, entsprechend den Literaturangaben, 80 % höhere E-Moduln erreicht als in radialer Orientierung.

Die dynamisch ermittelten Schubmoduln wichen ebenfalls von den Literaturwerten ab, jedoch lagen diese höher als die statisch ermittelten Werte. Die Unterschiede in den betrachteten anatomischen Ebenen entsprachen den Erwartungen. In der RT-Ebene wurden höhere Werte erreicht als in der LT-Ebene. Um die Unterschiede statistisch auszuwerten sind umfangreichere Untersuchungen notwendig.

Die Auswertung der Verlustfaktoren ergab Peaks im Bereich von 0 °C und im Bereich von 100 °C. Letzterer kann durch die Glasübergangstemperatur des Lignins bei ca. 80 °C erklärt werden. Für den Peak bei 0 °C wird in der Literatur eine Glasübergangstemperatur der Hemicellulose angegeben. Die Holzarten unterschieden sich dabei z.T. deutlich hinsichtlich der Temperatur und dem Absolutwert des Peaks. Um sichere Aussagen für die verwendeten Holzarten zu machen, sind weitere Untersuchungen mit erhöhtem Stichprobenumfang nötig.

Literatur

[DIN 2005] Norm DIN EN 923 2005. *Klebstoffe – Benennungen und Definitionen*

[MPA 2007] *Klebstoffliste I der MPA Universität Stuttgart betreffend geprüfter Klebstoffe im Geltungsbereich der DIN 1052 und allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen.* 2007

[AS/ 2007] Vornorm AS/NZS 4364(Int) 2007. *Timber—Bond performance of structural adhesives*

[Allenspach 2007] ALLENSPACH, K.: *Untersuchungen zum Versagensverhalten von Klebfugen bei mechanischer Belastung*, ETH Zürich, IfB Holz, Diplomarbeit, 2007

[Backman u. Lindberg 2001] BACKMAN, A. C. ; LINDBERG, K. A. H.: Differences in wood material responses for radial and tangential direction as measured by dynamic mechanical thermal analysis. In: *Journal of material science* 36 (2001), Nr. 15, S. 3777–3783

[Brockhaus 2005] BROCKHAUS: *Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 30 Bänden*. Leipzig, Mannheim : F.A. Brockhaus GmbH, 2005-2007 (21., neu bearbeitete Auflage)

[Clauss 2008] CLAUSS, S.: *Verklebung von Holz mit 1K-PUR Prepolymeren und gefüllten 1K-PUR Klebstoffen*. 2008. – Forschungsbericht

[Dunký u. Niemz 2002] DUNKY, M. ; NIEMZ, P.: *Holzwerkstoffe und Leime – Technologie und Einflussfaktoren*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2002

[EN 301 2006] EN 301: *Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Phenoplaste und Aminoplaste – Klassifizierung und Leistungsanforderungen*. 2006

[EN 302-1 2004] EN 302-1: *Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit*. 2004

[Eng 2006] ENG, R.: *Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf das Versagensverhalten verschiedener Klebstoffe*, ETH Zürich, IfB Holz, Semesterarbeit, 2006

- [Falkner u. Teutsch 2006] FALKNER, H. ; TEUTSCH, M.: Die Tragfähigkeit verleimter Brettschichtholzbinder in Abhängigkeit von der Temperatureinwirkung. In: *Bautechnik* 83 (2006), Nr. 6, S. 391–393
- [Frangi et al. 2004] FRANGI, A. ; FONTANA, A. ; MISCHLER, A.: Shear behaviour of bond lines in glued laminated timber beams at high temperatures. In: *Wood Science and Technology* 38 (2004), Nr. 2, S. 119–126
- [George et al. 2003] GEORGE, B. ; SIMON, C. ; PROPERZI, M. ; PIZZI, A.: Comparative creep characteristics of structural glulam wood adhesives. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), Nr. 1, S. 79–80
- [Glos u. Henrici 1990] GLOS, P. ; HENRICI, D.: Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen / Institut für Holzforschung der Universität München. 1990. – Forschungsbericht
- [Grimsel 1963] GRIMSEL, M.: *Mechanisches Verhalten von Holz - Struktur- und Parameteridentifikation eines anisotropen Werkstoffes*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1963
- [Grøstad u. Ormstad 2005] GRØSTAD, K. ; ORMSTAD, E. B.: Melamine and Melamine-Urea Adhesives for the European Glulam Market. In: FRIHART, C. R. (Hrsg.): *Wood Adhesives 2005*, Forest Products Society, 2005, S. 191–193
- [Kägi et al. 2006] KÄGI, A. ; NIEMZ, P. ; MANDALLAZ, D.: Einfluss der Holzfeuchte und ausgewählter technologischer Parameter auf die Verklebung mit 1K-PUR Klebstoffen unter extremen klimatischen Bedingungen. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 64 (2006), Nr. 4, S. 261–268
- [Kläusler 2007] KLÄUSLER, O.: *Untersuchung zur Auswirkung von Polyurethan-Prepolymeren auf die Verklebungsgüte von Buchenholz*, Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Diplomarbeit, 2007
- [Mettler-Toledo 2007] METTLER-TOLEDO: *Dynamisch Mechanische Analyse für höchste Ansprüche*. 2007. – Gerätebeschreibung

- [Na et al. 2005] NA, B. ; PIZZI, A. ; DELMOTTE, L. ; LU, X.: One-component polyurethane adhesives for green wood gluing: Structure and temperature-dependent creep. In: *Journal of Applied Polymer Science* 96 (2005), Nr. 4, S. 1231–1243
- [Nairn 2005] NAIRN, J. A.: A numerical study of the transverse modulus of wood as a function of grain orientation and properties. In: *Holzforschung* 61 (2005), Nr. 4, S. 406–413
- [Niemz 2006] NIEMZ, P.: Einfluss der Temperatureinwirkung auf Klebstoffe. In: *Holz-Zentralblatt* (2006), Nr. 30, S. 878
- [Niemz et al. 2004] NIEMZ, P. ; MANNES, D. ; LEHMANN, E. ; VONTOBEL, P. ; HAASE, S.: Untersuchungen zur Verteilung des Klebstoffes im Bereich der Leimfuge mittels Neutronenradiographie und Mikroskopie. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 62 (2004), Nr. 6, S. 424–432
- [Pizzi u. Owens 1995] PIZZI, A. ; OWENS, N. A.: Interface Covalent Bonding Vs Wood-Induced Catalytic Autocondensation of Diisocyanate Wood Adhesives. In: *Holzforschung* 49 (1995), Nr. 3, S. 269–272
- [Properzi et al. 2003] PROPERZI, M. ; PIZZI, A. ; UZIELLI, L.: Comparative wet wood glueing performance of different types of Glulam wood adhesives. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 61 (2003), Nr. 1, S. 77–78
- [Radovic u. Goth 1994] RADOVIC, B. ; GOTH, H.: Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoffe für die Herstellung von tragenden Holzbauteilen. In: *Bauen mit Holz* (1994), Nr. 1, S. 22–32
- [Salmén 1984] SALMÉN, L.: Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions. In: *Journal of material science* 19 (1984), Nr. 9, S. 3090–3096
- [Schirle et al. 2002] SCHIRLE, M. A. ; KÜNNIGER, T. ; FISCHER, A. ; RICHTER, K.: Charakterisierung und Optimierung der Verklebung mit 1 Komponenten Polyurethan (1K-PUR) Klebstoffen / EMPA Abteilung Holz. 2002 (4126.1). – KTI-Abschlussbericht
- [Schnider 2007] SCHNIDER, T.: Eignung mittlerer Stammabschnitte aus Schweizer Laubholz / ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Holzphysik. 2007 (39). – Interner Bericht

[Togni 2007] TOGNI, S.: *Untersuchungen zum Einfluss eines Wechselklimas auf die Eigenschaften von Holzverklebungen*, ETH Zürich, IfB Holz, Diplomarbeit, 2007

[Vick u. Okkonen 2000] VICK, C. B. ; OKKONEN, E. A.: Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent. In: *Forest Products Journal* 50 (2000), Nr. 10, S. 69–75

[Wyss 2006] WYSS, M.: *Untersuchungen zum Versagensverhalten von Holzverklebungen im makroskopischen und mikroskopischen Bereich bei Scherbelastung*, ETH Zürich, IfB Holz, Diplomarbeit, 2006

[Zeppenfeld u. Grunwald 2005] ZEPPENFELD, G. ; GRUNWALD, D.: *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie*. DRW-Verlag, 2005

Abbildungsverzeichnis

1	Varianten des Bruchbildes	18
2	Streuung und Wahrscheinlichkeitsdichte des Holzbruchanteils des Holzbruchanteils von Fichte, $\omega = 12\%$ (Box: Quartile der Verteilung, Whiskers: $1.5 \times$ Interquartilabstand, Datenpunkte: Ausreisser)	19
3	Zugscherfestigkeit des Holzes in Abhängigkeit von Behandlungsart und Holzart	20
4	Zugscherfestigkeit von Buche in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer der Temperierung	21
5	Zugscherfestigkeit von Klebverbindungen in Abhängigkeit der Temperatur (Buche, $\omega = 12\%$)	22
6	Zugscherfestigkeit von Klebverbindungen bei Variation der Verklebungsholzfeuchte (Buche, Behandlungsart A1 (Normalklima))	23
7	Zugscherfestigkeit von Klebverbindungen nach Behandlungsart A1 (Normalklima) und A4 (Kochwasserexposition) (Buche, $\omega = 12\%$)	24
8	Zugscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte	29
9	Zugscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte	30
10	Holzbruchanteil von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte	31
11	Dehnung bis zur Maximalkraft von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der rel. Luftfeuchte	32
12	Zugscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur	33
13	Zugscherfestigkeit von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur	34

14	Dehnung bis zur Maximalkraft von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur	35
15	Dehnung bis zur Maximalkraft von Verklebungen mit 1K-PUR in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts und der Temperatur	36
16	Phasenverschiebung zwischen Kraft- und Wegverlauf	39
17	Viskoelastische Eigenschaften von Holzproben in der LT-Ebene bei dynamischer Scherbelastung in Abhängigkeit der Temperatur	40
18	Viskoelastische Eigenschaften von Holzproben in der RT-Ebene bei dynamischer Scherbelastung in Abhängigkeit der Temperatur	41
19	Viskoelastische Eigenschaften longitudinal orientierter Holzproben bei dynamischer Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Temperatur	43
20	Viskoelastische Eigenschaften radial orientierter Holzproben bei dynamischer Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Temperatur	43

Tabellenverzeichnis

1	Zusammenstellung der Behandlungsarten und Anzahl der Prüfkörper (Erklärung der Behandlungsarten in Abschnitt 5.1.3)	14
2	Chemische Strukturparameter der Prepolymere	15
3	Einflussgrößen auf die Zugscherfestigkeit	17
4	Verschiedene Kreideanteile bei Purbond VN 3060	26
5	Klimavarianten der verwendeten Prüfkörper	28
6	Gegenüberstellung des Schubmoduls nach dynamischer und statischer Prüfung bei 20 °C (Werte nach (Grimsel, 1963) (Fi, Bu), Nairn (2005) (Dou))	41
7	Gegenüberstellung des E-Moduls nach dynamischer und statischer Prüfung bei 20 °C (Werte nach (Grimsel, 1963) (Fi, Bu), Nairn (2005) (Dou))	42