
Int. Bericht ETHZ/IfB-HP Nr. 55

Verfahrenstechnische Optimierung von PUR-basierten Klebstoffen zur Verklebung von Laubholz und Materialkombinationen

Wald & Holz Projekt Nr. 2008.09

A. Brandmair, M. Wetzig, N. Aigner, P. Haß, S. Clauß, P. Niemz

Praxispartner:	Purbond AG, Sempach	Dr. J. Gabriel
	Geistlich AG, Schlieren	U. Fankhauser
	Sika AG, Zürich	Dr. S. Koch

Zürich, 29. Juni 2010

Abstract

Durch den stattfindenden Waldumbau ist in Zukunft mit mehr Laubholz auf dem Markt zu rechnen, für das neue Verwendungsmöglichkeiten erschlossen werden müssen. Die Verklebbarkeit von Laubholz ist dafür von besonderer Bedeutung, weil sie für die meisten Anwendungen gefordert wird. Probleme stellen dabei besonders die höheren Quell- und Schwindmasse der Laubhölzern dar. Bei einer Änderung der Holzfeuchte können dadurch grosse Eigenspannungen in den Klebstoffugen entstehen, die zu einer Delamination führen.

Im ersten Teil der Arbeit sind die Eigenschaften der Klebstoffe anhand dünner Klebstofffilme im Zugversuch ermittelt worden. Weiter wurden Zugscherproben mit unterschiedlich ausgebildeten Klebstoffugen einer statischen und zyklischen Beanspruchung unterzogen. Eine zyklische Belastung tritt auch bei wiederholter Änderung der Holzfeuchte auf. Mit den im Zugversuch gewonnenen Kennwerten der Klebstoffe, konnte auf Eigenschaften der Verklebung mit dem jeweiligen Klebstoff geschlossen werden. Steife Klebstoffe zeigten hohe Zugscherfestigkeiten. Bei der zyklischen Belastung konnte bei elastischen Klebstoffen eine Abnahme des E-Moduls innerhalb der ersten Zyklen festgestellt werden.

Dreischichtige Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau und unterschiedlich ausgebildeten Klebstoffugen wurden im zweiten Teil der Arbeit hinsichtlich ihres Verhaltens bei Klimaänderung untersucht. Dabei wurden die Quellwerte und die Dehnungen in den Deckschichten und Klebstoffugen ermittelt, sowie die in den Plattenaufbauten entstandenen Eigenspannungen bei Feuchtezunahme untersucht. Betrachtet wurden weiter die Entstehung von Rissen bei Überführung der Platten ins Trockenklima und der Einfluss künstlicher Bewitterung. Bei Platten mit dicken elastischen Klebstoffugen konnten die einzelnen Schichten ungehindert Quellen und wiesen keinen Plattenverzug auf. Bei diesen traten auch die kleinsten Eigenspannungen auf. Mit dem elastischen Klebstoff wurden auch dünnere Klebstoffugen realisiert, wobei mit abnehmender Fugendicke die Eigenspannungen zunahmen.

Die Verklebung von Laubholz mit 1K-PUR-Klebstoffen für den konstruktiven Holzbau wurde anhand eines Zugscher- und eines Druckscherversuchs untersucht. Der Einfluss einer Kochwasserlagerung wurde dabei im Druckscherversuch getestet. Normalklimatisierte Proben zeigten im Zug- und Druckscherversuch mit steifen Klebstoffen eine meist ausreichende Zugscherfestigkeit. Bei der Kochwasserlagerung sanken die erzielten Druckscherfestigkeiten bei allen und der Holzbruch bei den meisten Holz-Klebstoff-Kombinationen.

Inhalt

1	Einleitung.....	6
1.1	Wissensstand.....	6
1.1.1	Aktualität des Themas.....	6
1.1.2	Spannungen in Holz und Holzwerkstoffen.....	7
1.1.3	Grundlagen des Klebens.....	10
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit.....	15
2	Ermittlung von Klebstoffkennwerten.....	17
2.1	Einleitung.....	17
2.2	Material und Methoden.....	17
2.2.1	Verwendete Klebstoffe.....	17
2.2.2	Herstellung der Prüfkörper aus Klebstofffilmen.....	18
2.2.3	Herstellung der Zugscherproben nach DIN EN 205 (2003).....	19
2.2.4	Zugversuch nach DIN EN ISO 527 – 1 (1996).....	20
2.2.5	Statische und zyklische Zugscherversuche.....	21
2.3	Ergebnisse und Diskussion.....	22
2.3.1	Zugversuch nach DIN EN ISO 527 – 1.....	22
2.3.2	Zugscherversuch mit statischer Belastung.....	30
2.3.3	Zugscherversuch mit zyklischer Belastung.....	34
2.4	Zusammenfassung.....	36
3	Untersuchungen zu dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau	38
3.1	Einleitung.....	38
3.1.1	Wissensstand.....	38
3.1.2	Zielstellung der Arbeit.....	38
3.2	Material und Methoden.....	39
3.2.1	Verwendete Holzarten.....	39
3.2.2	Verwendete Klebstoffe.....	40
3.2.3	Verwendete Klimata.....	41

Inhalt	4
3.2.4 Herstellung der Prüfkörper.....	42
3.2.5 Kennzeichnung der Prüfkörper.....	44
3.3 Prüfverfahren.....	46
3.3.1 Freie Quellung.....	46
3.3.2 Rissbildung.....	48
3.3.3 Eigenspannungen.....	48
3.3.4 Optische Dehnungsmessung.....	53
3.3.5 Künstliche Bewitterung.....	55
3.3.6 Bestimmung der Holzfeuchte.....	57
3.4 Ergebnisse und Diskussion.....	57
3.4.1 Freie Quellung.....	57
3.4.2 Rissbildung.....	60
3.4.3 Eigenspannungen.....	65
3.4.4 Optische Dehnungsmessung.....	67
3.4.5 Künstliche Bewitterung.....	73
3.5 Zusammenfassung.....	79
3.6 Ausblick.....	83
4 Laubholzverklebung für konstruktive Anwendungen.....	87
4.1 Einleitung.....	87
4.1.1 Brettschichtholz aus Laubholz.....	88
4.1.2 Wissensstand zur Laubholzverklebung im konstruktiven Holzbau.....	89
4.1.3 Zielstellung der Arbeit.....	90
4.2 Material und Methoden.....	91
4.2.1 Holzarten und Klebstoffe.....	91
4.2.2 Zugscherfestigkeit nach DIN EN 302 – 1 (2004).....	92
4.2.3 Druckscherversuch an normalkonditionierten Prüfkörpern.....	95
4.2.4 Druckscherversuch nach Kochwasserlagerung.....	98
4.3 Versuchsergebnisse und Diskussion.....	99
4.3.1 Zugscherversuch nach DIN EN 302 – 1.....	99
4.3.2 Druckscherversuch an normalkonditionierten Prüfkörpern.....	103

4.3.3 Druckscherversuch nach Kochwasserlagerung.....	104
4.4 Zusammenfassung.....	108
Literaturverzeichnis.....	110
Verzeichnis der Bilder.....	116
Verzeichnis der Tabellen.....	122

1 Einleitung

Klebverbindungen stellen heute eine der wichtigsten Verbindungsformen in der Holzindustrie dar. Die Unternehmen Purbond AG (Sempach Station, Schweiz), Sika AG (Zürich, Schweiz) und Geistlich Ligamenta AG (Schlieren, Schweiz), die an dieser Arbeit beteiligt waren, sind besonders im Bereich der Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis (1K-PUR-Klebstoffe) weltweit führend.

Bei verklebtem Laubholz können Delaminierungen auftreten. Gründe dafür liegen in den hohen Quell- und Schwindmassen und E-Moduln der Laubhölzer, durch die grosse Spannungen in der Klebstofffuge entstehen können. Die für Laubholz genannten Delaminierungen treten auch bei der Verklebung von Hölzern mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen, bei der kreuzweisen Verklebung von Holz, bei Feuchtedifferenzen in den verklebten Schichten und bei Materialkombinationen auf.

In Zusammenarbeit mit den drei genannten Schweizer Klebstoffherstellern wurden verschiedene Versuche durchgeführt, um Verklebungen von Laubhölzern zu verbessern. Zunächst werden im Unterkapitel *Wissensstand* die Grundlagen der Problematik näher erörtert. *Ziele und Aufbau der Arbeit* sind im darauf folgenden Unterkapitel beschrieben.

1.1 Wissensstand

1.1.1 Aktualität des Themas

Die Verwendung von Laubholz wird künftig auch für die Herstellung von Plattenelementen und Brettschichtholz verstärkt von Interesse sein. Anlass dafür ist die Entwicklung der Wälder und des dadurch zur Verfügung stehenden Bestandes an Laub-Nutzholz (Cioldi et al. 2009). Einige Gründe für den steigenden Laubholzanteil in den Wäldern sind die verstärkt beachtete Biodiversität der Bestände, wodurch die Beständigkeit gegenüber Kalamitäten und Stürmen erhöht werden soll, sowie die stark an der Naturverjüngung orientierte Waldbaupraxis (Schärer et al., 2006).

Nach Untersuchungen von Sykes und Prentice (1996) ist auf Grund der klimatischen Erwärmung mit einem generellen Wandel der Waldverteilung in weiten Teilen Europas zu rechnen. Untersucht wurden unter anderem die Bestände an Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.). In Bild 1.1 sind die momentanen, sowie die anhand von Berechnungsmodellen erstellten Bestandsentwicklungen dieser Baumarten dargestellt.

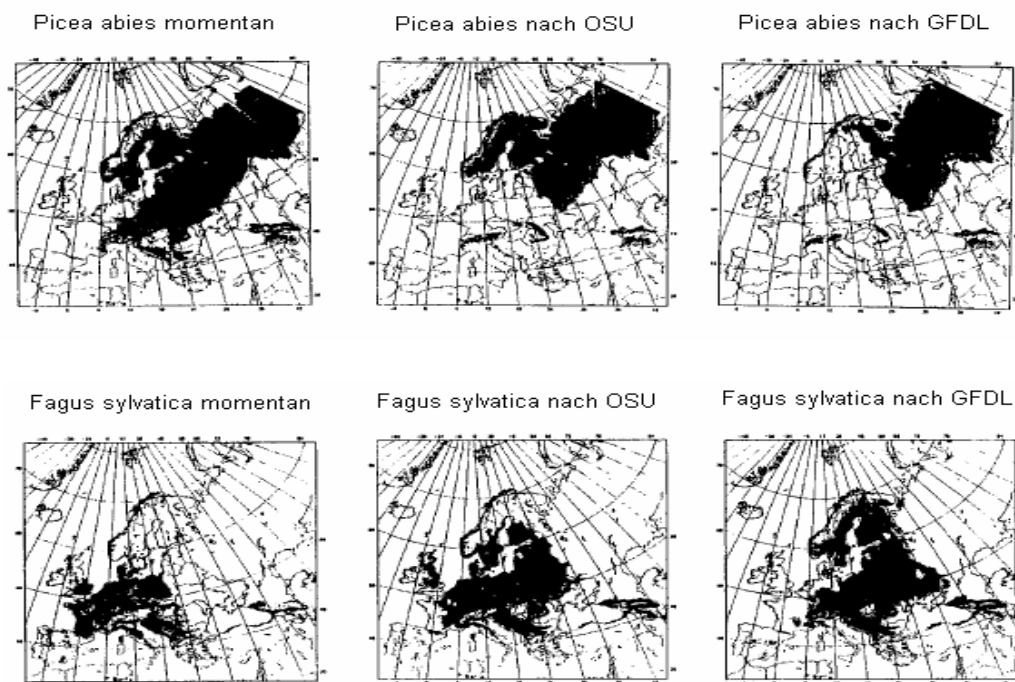


Bild 1.1: Verteilung des Buchen- und Fichtenbestandes momentan und zukünftig anhand von Berechnungsmodellen (Quelle: modifiziert nach Sykes und Prentice (1996) , Seite 166)

Auf Grund der aktuellen Entwicklungen der Waldverteilung und des damit verbundenen erhöhten Laubholzaufkommens, werden vermehrt Untersuchungen zur Nutzung des Laubholzes in Holzwerkstoffen durchgeführt.

1.1.2 Spannungen in Holz und Holzwerkstoffen

Spannungen in Holz, sowie in Holzwerkstoffen können durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren entstehen. Spannungszustände, die ohne das Einwirken äusserer Kräfte vorliegen, werden nach Welling (1988) als Eigenspannungen bezeichnet. Diese

treten stets bei ungleichmässig erfolgten Dehnungen der Materialien über deren Querschnitt oder Volumen auf.

Im stehenden Baum herrscht ein Kräftegleichgewicht. Druck und Zugspannungen sind über den Stammquerschnitt so verteilt, dass sie sich gegeneinander ausgleichen. Untersuchungen dazu haben ergeben, dass in den Aussenschichten des Stammes starke Längszugspannungen vorherrschen, wogegen in den inneren Schichten Längsdruckspannungen nachgewiesen werden konnten (Trendelenburg und Mayer-Wegelin, 1955). Hervorgerufen werden sie durch Zugbeanspruchungen, die auf die Holzschichten während ihrer Bildung einwirken. Die Zugbeanspruchungen entstehen dadurch, dass sich die aus dem Kambium gebildeten Zellen zusammenziehen versuchen. Die daraus resultierenden Spannungen erreichen dabei Werte von $3...7 \text{ N/mm}^2$ (Trendelenburg und Mayer-Wegelin, 1955).

Des Weiteren führen unregelmässige Jahrringbreiten zu Spannungen im Holz. Nach Kollmann (1951) können dabei drei Varianten auftreten. Über den Stammquerschnitt kann zwischen innen schmalen und nach aussen breiter werdenden Jahrringen, innen breiten und nach aussen schmaler werdenden Jahrringen, sowie wiederholtem Wechsel der Jahrringbreiten unterschieden werden. Verursacht werden diese Unterschiede in den Jahrringbreiten unter anderem durch Veränderungen im Grundwasserspiegel. Als Folge treten bei der Trocknung des aus einem solchen Stamm gewonnenen Holzes oftmals Risse entlang der Jahrringgrenzen auf.

An jedem Baum vorzufinden ist Reaktionsholz. Münch (1937/38) geht davon aus, dass Reaktionsholz als aktives dynamisches Element zur Richtungsbewegung des Stammes und der Äste zur Erzielung der Gleichgewichtslage des Baumes entsteht und nicht, wie weitläufig gelehrt wird, als Folge äusserer statischer Einflüsse auf den entsprechenden Baum. Dabei bilden Nadelbäume stets Druckholz und Laubhölzer Zugholz aus. Druckholz, welches auf Grund des erhöhten Ligningehaltes (20...35% gegenüber normal) rotbraun erscheint, wird auf der konvexen Seite des beanspruchten Stammes gebildet. Zugholz hingegen entsteht stets auf der konkaven Seite des

beanspruchten Baumes. Reaktionsholz zeichnet sich durch veränderte Quell- und Schwindwerte aus.

In Schnittholz und Holzwerkstoffen entstehen Eigenspannungen immer dann, wenn über dem Querschnitt ein Eigenschaftsprofil vorhanden ist. Eigenschaftsprofile sind unter anderem durch die Rohdichte und die Holzfeuchte bestimmt.

Besonders ausgeprägt sind feuchtebedingte Eigenschaftsprofile beispielsweise während des Trocknungsprozesses von Holz. In Bild 1.2 sind beispielhaft die Feuchteprofile für Buche und Fichte während der Holz Trocknung dargestellt.

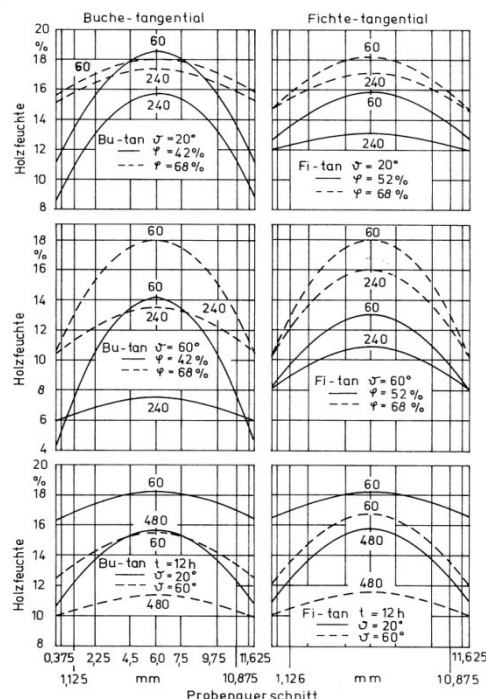


Bild 1.2: Feuchtegefälle über dem Holzquerschnitt bei der Trocknung; die Zahlenwerte bei den Kurven geben die Trocknungszeit in Minuten an (Quelle: Niemz (1993), Seite 63)

Beeinflussende Parameter während des Trocknungsvorganges sind vor allem die Trocknungsgeschwindigkeit, der Ausgangs- und Endfeuchtegehalt des Holzes, die Holztemperatur während der Trocknung, sowie die Dauer der Einwirkung des entsprechenden Trockenklimas. Die durch den Feuchtegradienten hervorgerufenen Spannungen müssen je nach Trocknungsphase betrachtet werden. Nach Trübswetter

(2006) treten zu Beginn der Trocknung zunächst Schwindzugspannungen in den trockenen, oberflächennahen Holzschichten auf und Druckspannungen im noch feuchten inneren Bereich. Im Laufe des Trocknungsprozesses kommt es zur Spannungsumkehr, wenn die inneren Schichten trocknen und ebenfalls zu schwinden beginnen. Vorübergehend stellt sich ein Spannungsgleichgewicht ein, welches gegen Ende der Trocknung durch entstehende Zugspannungen im Inneren der Trockenware wieder aufgehoben wird. Um die bestehenden Spannungen nach dem Trocknungsprozess möglichst abzubauen, muss das Holz konditioniert werden, das heisst es muss durch Regelung des Klimas ein weitgehend gleichmässig verteiltes Feuchteprofil über den Querschnitt der Trockenware eingestellt werden.

Holzwerkstoffe können bedingt durch ihren Aufbau Eigenschaftsprofile aufweisen. Durch asymmetrischen Plattenaufbau und/oder unterschiedlicher Quell- und Schwindwerte einzelner Plattenschichten verschiebt sich das Spannungsgleichgewicht aus der Symmetrieachse und führt zum so genannten Plattenverzug. Auch durch Lagerung im Differenzklima bildet sich ein Feuchteprofil aus und führt zu Plattenverzug.

1.1.3 Grundlagen des Klebens

Adhäsion und Kohäsion

Klebstoffe sind nichtmetallische Stoffe, die Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden können, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt (DIN EN 923 (2008)). Adhäsion ist die Haftung eines Stoffes an einem anderen durch Wirkung physikalisch-mechanischer, physiosorptiver, chemisorptiver, chemischer Kräfte oder von Nebervalenzkräften, wobei von einer Kombination verschiedener Mechanismen ausgegangen wird (Zeppenfeld und Grunwald 2005). Kohäsion, abstammend vom lateinischen *cohaerere* „zusammenhängen“, wird wie folgt definiert: „Der innere Zusammenhalt der Stoffe, beruht auf elektr. Kräften, welche die Atome oder Moleküle eines Stoffes aufeinander ausüben. „Die im Anzie-

hungsbereich wirksame Kohäsion verursacht die Festigkeit der Körper, den Zusammenhang der Flüssigkeiten und deren Oberflächenspannung.“ (Brockhaus 1970)

Für die tatsächlich in den Grenzschichten zwischen Klebstoff und Bauteil auftretenden Kräfte sind verschiedene Modelle und Theorien erforscht worden. Eine Übersicht darüber gibt Bild 1.3. Für Holz wurde lange Zeit davon ausgegangen, dass die mechanische Verankerung des ausgehärteten Klebstoffes in den Hohlräumen der Oberfläche der Fügeteile einen wesentlichen Anteil an den Adhäsionskräften besitzt. Heute wird die Haftung zwischen Klebstoff und Fügeteil jedoch hauptsächlich auf chemische und physikalische Kräfte der zugehörigen Moleküle zurückgeführt. Ausführliche Darstellungen zu entsprechenden Adhäsionstheorien können unter anderem bei Habenicht (2009), Zeppenfeld und Grunwald (2005) entnommen werden.

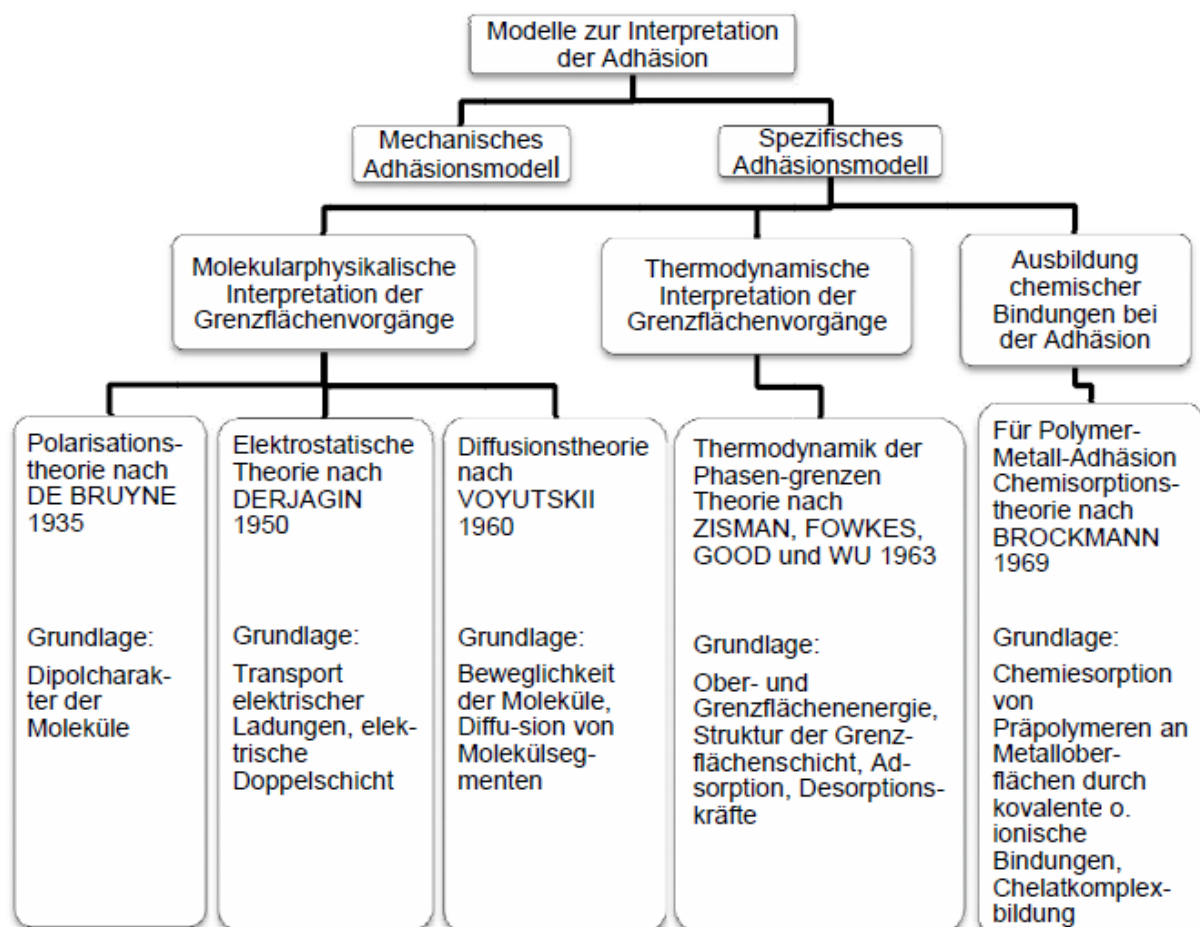


Bild 1.3: Übersicht über Adhäsionstheorien (Quelle: modifiziert nach Brockmann et al. (2005), Seite 15)

Wesentlich für eine gute Ausbildung adhäsiver Bindungskräfte ist die vollständige Benetzung der Flächen durch den Klebstoff. Veranschaulicht werden kann die Benetzung durch die Applikation eines Tropfens auf einen Festkörper, wie es in Bild 1.4 dargestellt ist. In Abhängigkeit von der Grenzflächenspannung des Festkörpers zur Umgebung und jener des Tropfens, bildet sich der Randwinkel α zwischen Festkörperoberfläche und Tropfenoberfläche aus. Theoretisch kann dieser Winkel zwischen 0° und 180° liegen. Für eine technisch nutzbare Adhäsion wird allerdings ein Randwinkel kleiner gleich 90° benötigt.

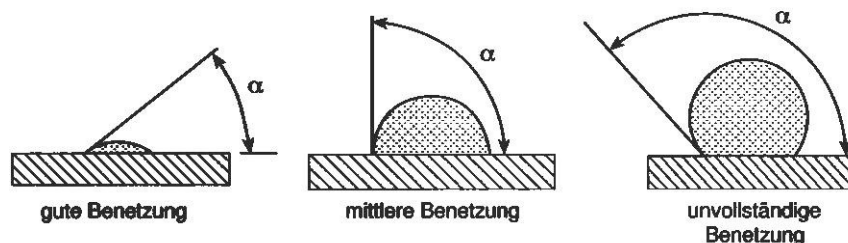


Bild 1.4: Abhängigkeit der Oberflächenbenetzbarkeit vom Benetzungswinkel (Quelle: Brockmann et al. (2005), Seite 113)

Dabei können die Bindekräfte chemisch wie auch physikalisch ausgebildet werden. Chemische Bindungen sind jedoch stabiler als physikalische. Bei ihnen unterscheidet man die kovalenten Bindungen, auch Elektronenpaarbindungen genannt, die Ionenbindungen und die Metallbindungen. Die physikalischen Kräfte werden wesentlich durch die van-der-Waalschen Bindungen sowie die Wasserstoffbrückenbindungen beschrieben (Zeppenfeld und Grunwald 2005).

Klebstoffe können nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifiziert werden. Eine häufig genutzte Einteilung erfolgt nach den Abbindemechanismen, wie sie in Bild 1.5 dargestellt ist.

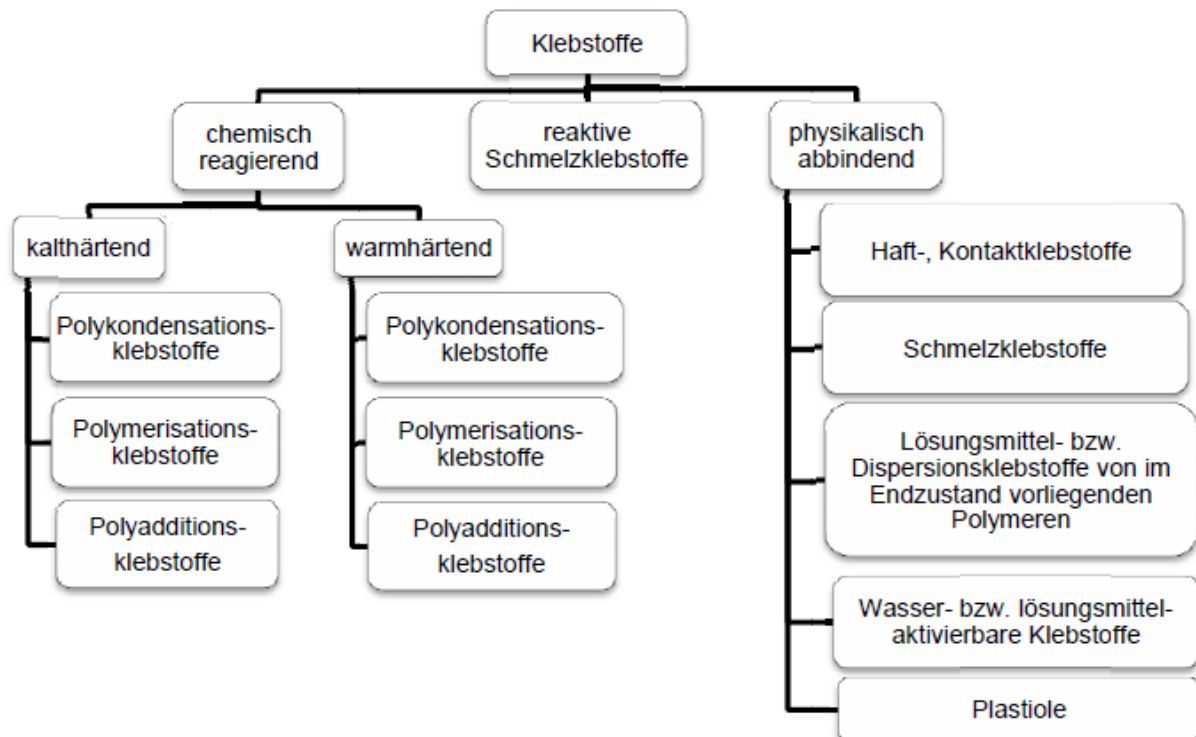


Bild 1.5: Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Abbindemechanismus (Quelle: modifiziert nach Habenicht (2009), Seite 6)

Polyurethanklebstoffe

Die für die Versuche in dieser Arbeit eingesetzten Polyurethanklebstoffe zählen nach dieser Klassifizierung zu den Polyadditionsklebstoffen, die zur Gruppe der chemisch-reaktiven Klebstoffe zählen. Die Eigenschaften der Klebstoffe sind abhängig von der Anzahl der reaktiven Gruppen innerhalb des Reaktionsgemisches, sowie den stöchiometrischen Verhältnissen der Reaktionspartner.

Polyurethanklebstoffe sind als ein- und zweikomponentige Klebstoffe erhältlich. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Verwendung von einkomponentigen Polyurethanklebstoffen (1K-PUR Klebstoffe) liegt, sollen auch nur diese in den weiteren Ausführungen berücksichtigt werden. Durch die Polarität der Polyurethane ist deren Haftung auf Holz und anderen Werkstoffen möglich, denn starke polare Kräfte sind Voraussetzung für eine gute Haftung innerhalb der Grenzflächen.

Zur Herstellung von 1K-PUR Klebstoffen verwendete Rohstoffe sind Isocyanate, Polyole, Katalysatoren, sowie Füllstoffe und Additive. Die Isocyanatkomponente bildet dabei chemisch betrachtet den Grundstoff der Polyurethanklebstoffe. Die Füllstoffe dienen in erster Linie zur Verbesserung rheologischer und physikalischer Eigenschaften und tragen wesentlich zur Senkung der Herstellungskosten bei. Bei der Reaktion der Polyole mit Di- oder Polyisocyanaten entstehen langkettige Polymere mit reaktiven Isocyanatgruppen, welche unter Einfluss von Feuchte aushärten. Aus diesem Grund muss bei der Verarbeitung lösemittelfreier 1K-PUR-Klebstoffe eine ausreichende Substratfeuchte sichergestellt sein (vgl. Untersuchungen von Kägi et al. (2006)).

Es ist zu beachten, dass beim Abbinden des Klebstoffes Kohlendioxid (CO_2) abgespalten wird (Bild 1.6). Dadurch kann es zu unerwünschter Blasenbildung in der Klebstofffuge kommen und im Zuge dessen zu einer Reduktion der Festigkeit des Klebverbundes. Begünstigt wird die Blasenbildung durch einen hohen Gehalt an Isocyanatgruppen in den Ausgangskomponenten, einer geringen Viskosität des Klebstoffes, sowie von der Porosität des Substrates (Habenicht 2009). Verringert werden kann die Blasenbildung in den Klebstofffugen unter anderem durch erhöhten Pressdruck. Auch eine verringerte Reaktionsgeschwindigkeit führt zu verminderter Blasenbildung innerhalb des Klebstofffilmes.

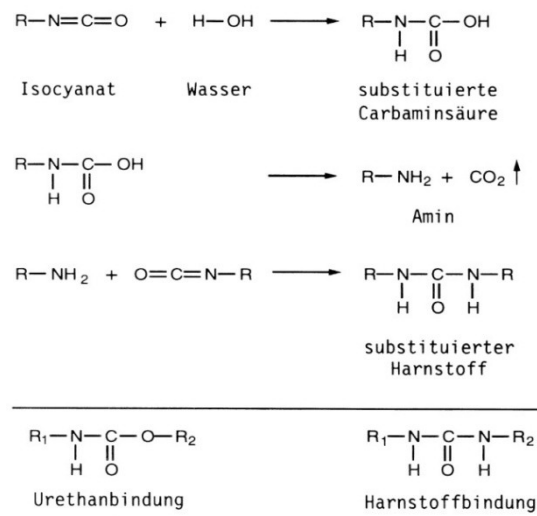


Bild 1.6: Reaktion eines 1K-PUR Klebstoffes unter Einwirkung von Wasser (H₂O) und Abspaltung von Kohlendioxid (CO₂) (Quelle: Habenicht (2009), Seite 97)

Ein wesentlicher Vorteil der 1K-PUR-Klebstoffe ist ihre Feuchtebeständigkeit. Zudem können sie auf Grund ihrer chemischen Struktur völlig lösemittelfrei hergestellt werden. Formaldehydabspaltungen, wie sie bei den meisten Klebstoffen der Holzindustrie vorkommen, können somit ausgeschlossen werden. Des Weiteren sind 1K-PUR-Klebstoffe vergilbungsfrei, was im sichtbar-konstruktiven, sowie dekorativen Bereich einen Vorteil darstellt.

1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit

Am Institut für Baustoffe der ETH Zürich, Arbeitsgruppe Holzphysik, sind in den letzten Jahren vermehrt Untersuchungen zur Holzverklebung durchgeführt worden, wobei der Schwerpunkt auf 1K-PUR-Klebstoffen lag. So wurde der Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte ausgewählter Klebstoffe bei Zugscherbeanspruchung erforscht (Niemz und Allenspach, 2009). Weiter untersuchten Clauss et. al. (2008) die Optimierung von 1K-PUR Klebstoffen für Vollholz hinsichtlich einer besseren Temperatur- und Feuchtebeständigkeit. Die vorliegende Arbeit knüpft an die bisherigen Arbeiten an und untersucht die Verklebbarkeit von verschiedenen Laubhölzern und von mehrschichtigen Massivholzplatten mit 1K-PUR-Klebstoffen.

Eine Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigt Tab. 1.1. Mit Versuchen zur Ermittlung der Klebstoffkennwerte (Kapitel 2) wurden die verwendeten Klebstoffe charakterisiert. Untersuchungen zu dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau sind im dritten Kapitel beschrieben. Im Kapitel vier sind Verklebungen für konstruktive Verwendung untersucht worden, die auf konkrete Anforderungen überprüft wurden.

Tab. 1.1: Übersicht zur vorliegenden Arbeit. Aufgeführt sind die einzelnen Kapitel mit den darin beschriebenen Versuchen.

Ka- pitel	Titel	Versuche	Bearbeiter
2	Ermittlung von Klebstoffkennwerten	Zugversuche an Klebstofffilmen Statische und zyklische Zugscherversuche	N. Aigner
3	Untersuchungen zu dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau	Freie Quellung Rissbildung Eigenspannung Optische Dehnungsmessung Künstliche Bewitterung	M. Wetzig
4	Laubholzverklebung für konstruktive Anwendungen	Ermittlung der Zugscherfestigkeit Ermittlung der Druckscherfestigkeit Ermittlung der Druckscherfestigkeit nach Kochwasserlagerung	A. Brandmair

2 Ermittlung von Klebstoffkennwerten

2.1 Einleitung

Zur Bestimmung der mechanischen Kenngrößen von Klebstoffen, wurden Zugversuche an dünnen Filmen aus reinem Klebstoff durchgeführt. Weiter wurden Zugscherprüfkörper nach DIN EN 205 (2003) hergestellt und einer statischen, sowie einer zyklischen Belastung ausgesetzt. Mit der zyklischen Belastung der Klebverbindung sollte eine wechselnde Belastung simuliert werden, wie sie auch bei einer Änderung der Holzfeuchte durch Quellung und Schwindung auftritt. Motivation für diese Versuche war, Potential für eine Optimierung von Klebstoffen zur Verklebung von Laubhölzern zu erkennen. Besonderer Schwerpunkt lag bei 1K-PUR-Klebstoffen, die für ihr breites Spektrum an unterschiedlichen Eigenschaften bekannt sind.

2.2 Material und Methoden

2.2.1 Verwendete Klebstoffe

Neben 1K-PUR-Klebstoffen sind auch andere in der Holzindustrie üblichen Klebstoffen den Versuchen unterzogen worden. Weiter sind 1K-PUR-Systeme einbezogen worden, die einen sehr niedrigen Elastizitätsmodul besitzen und als Dichtstoff eingesetzt werden. Eine vollständige Auflistung der Klebstoffe zeigt Tab. 2.2.

Tab. 2.1: Verwendete Klebstoffe mit Hersteller, typischer Verwendung und Versuchen, denen sie unterzogen wurden

Klebstoffbezeichnung	Klebstoffart	Hersteller	Zugversuch	Zugscherversuch	
				statisch	zyklisch
Miraflex 9550	1K-PUR-Dichtstoff	Geistlich	x	x	x
Miraflex 9560	1K-PUR-Dichtstoff		x	x	
Mirapur 9500 Speed	1K-PUR-Bauklebstoff		x	x	
Placol 4507	UF Harz		x		
Miracol 8F1	PVAc		x		
Miracol 6274	PVAc		x		
PURBOND HB S409	1K-PUR-Klebstoff	Purbond	x	x	
PURWELD 1302	1K-PUR-Klebstoff		x	x	x
PURBOND HB 181	1K-PUR-Klebstoff		x		
PURBOND HB 110	1K-PUR-Klebstoff		x		
Sikaflex®-228	1K PUR Dichtstoff	Sika	x		
SikaBond®-T52FC	1K PUR Dichtstoff		x	x	
Kauramin 683	MUF Harz	BASF	x		
Prefere 4040	PRF Harz	Dynea	x		

2.2.2 Herstellung der Prüfkörper aus Klebstofffilmen

Mit Hilfe eines Rakels (Bild 2.1) wurden Klebstofffilme aus den Klebstoffen in Tab. 2.2 gezogen. Das Umgebungsklima während der Herstellung war mit 20 °C und 50% rel. Luftfeuchte bei allen Filmen gleich. Das Ziehen der Filme aus 1K-PUR-Klebstoffen erfolgte auf mit Trennmittel beschichteten Kunststofffolien. Die Filme der anderen Klebstoffe wurden auf Glas gezogen. Die Dicke der Klebstofffilme war über die Auftragsdicke einzustellen. Die resultierende Dicke der ausgehärteten Filme hängt von dem Aushärteprozess des Klebstoffs ab.

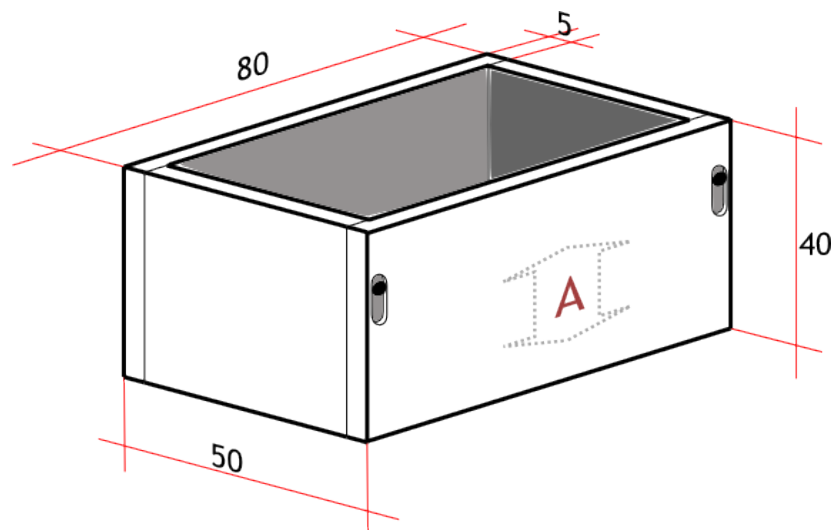


Bild 2.1: Rakel mit verstellbarer Auftragsdicke zum Ziehen von Klebstofffilmen mit Abmessungen in mm.

Die Abmessungen der verwendeten Prüfkörper sind in Bild 2.2 dargestellt. Die Prüfkörperform orientiert sich dabei an der DIN EN 527 – 3 (2003). Die Filme wurden in Streifen mit einer Breite von mehr als 15 mm geschnitten und anschliessend eine Verjüngung ausgestanzt.

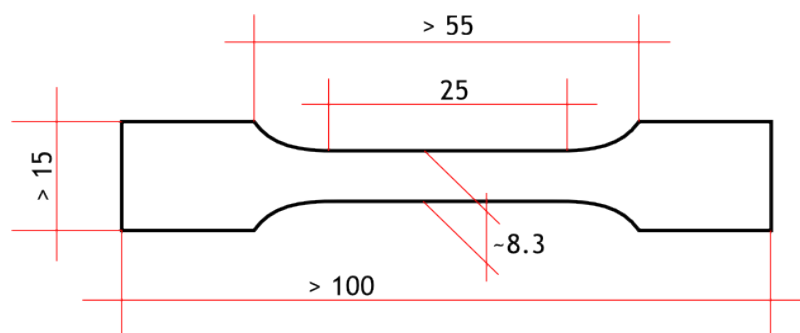


Bild 2.2: Prüfkörper mit Abmessungen in mm für die Zugversuche an Klebstofffilmen.

2.2.3 Herstellung der Zugscherproben nach DIN EN 205 (2003)

Für die Zugscherversuche wurden Proben aus Buche (*Fagus sylvatica* L.) gemäss den Vorgaben der DIN EN 205 hergestellt. Die Klebstoffe PURBOND HB S409, PURWELD 1302 und Mirapur 9500 Speed wurden für Prüfkörper mit dünner Klebstofffuge

verwendet. Mit den 1K-PUR-Dichtstoffen Miraflex 9550 und 9560, Sikaflex®-T52FC und Sikaflex®-228 wurden Prüfkörper mit dicker (1 mm) Klebstofffuge hergestellt. Zwischen Verklebung und Zuschnitt der Proben lag eine Woche Klimatisierung im Normalklima (20 °C/65% relative Luftfeuchte).

2.2.4 Zugversuch nach DIN EN ISO 527 – 1 (1996)

Die Prüfung der Klebstofffilme erfolgte mit einer Universal Prüfmaschine Zwick Z100 mit einer 500 N Kraftmessdose. Von der Prüfmaschine wurde die Kraft aufgezeichnet. Die Aufnahme von Dehnung und Querkontraktion erfolgte über ein Videoextensiometer. Die Prüfkörper wurden dafür schwarz gefärbt und mit weiss/schwarzen Dehnungsmessstreifen versehen. Die Prüfung erfolgte vorweissem Hintergrund. Die Software des Videoextensiometers erkennt dabei Kontrastgrenzen der während der Prüfung gefilmten Proben und errechnet daraus Dehnung und Querkontraktion.

Die Auswertung der Daten von Prüfmaschine und Videoextensiometer erfolgte mit der Software Zwick Testexpert II. Die Spannung zum jeweiligen Zeitpunkt der Prüfung errechnete sich nach Gleichung (1). Die benötigten Querschnittsangaben wurden vor der Prüfung gemessen und an die Prüfsoftware übertragen.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

σ Zugspannung in MPa

F Kraft in N

A Anfangsquerschnitt mm²

Die Klebstofffilme wurden in Klemmbacken eingespannt und auf Zug belastet. Die Prüfung wurde beendet, wenn die Bruchspannung erreicht war (die gemessene Kraft betrug noch 80% der Maximalkraft) oder die Dehnung 150% betrug.

Die Prüfungsgeschwindigkeiten wurden der Klebstoffart angepasst und sind in Tab. 2.1 aufgeführt.

Tab. 2.2: Prüfgeschwindigkeiten für die untersuchten Klebstoffe im Zugversuch.

Klebstoff	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]
Miraflex 9550	20
Miraflex 9560	20
Mirapur 9500 Speed	6
Placol 4507	0,5
Miracol 8F1	30
Miracol 6274	30
PURBOND HB S409	6
PURWELD 1302	6
PURBOND HB 181	20
PURBOND HB 110	2
Sikaflex®-228	20
SikaBond®-T52FC	20
Kauramin 683	1
Prefere 4040	1

2.2.5 Statische und zyklische Zugscherversuche

Die Durchführung der statischen und zyklischen Zugscherversuche erfolgte im Normklima (20°C/65% r. L.) mit einer Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z010. Zur Aufnahme der Kraft besitzt die Universalprüfmaschine eine Kraftmessdose bis 10 kN. Die Dehnung der Prüfkörper wurde mit einem Ansetzwegaufnehmer aufgenommen. Die Aufnahme der Prüfkörper in der Prüfmaschine erfolgte über Spannbacken.

Bei den statischen Zugscherversuchen wurde die Prüfgeschwindigkeit für jeden Klebstoff so gewählt, dass das Versagen des Prüfkörpers zwischen 30 und 90 Sekunden lag. Die zu ermittelnde Zugscherfestigkeit τ errechnet sich nach Gleichung (2).

$$\tau = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{l_2 \cdot b} \quad (2)$$

τ	Zugscherfestigkeit in MPa
F_{\max}	Höchstkraft in N
A	geklebte Prüffläche, in mm ²
l_2	Länge der geklebten Prüffläche, in mm
b	Breite der geklebten Prüffläche, in mm

Als weitere Grösse wurde die Brucharbeit bestimmt.

Für die zyklischen Versuche wurden Prüfkörper, verklebt mit 1K-PUR-Systemen, mit dünner Klebstofffuge (PURWELD 1302) und mit dicker Klebstofffuge (Miraflex 9550 und SikaBond®-T52 FC) verwendet. Die Prüfungsgeschwindigkeiten betrugen 0.5 mm/min und 50 mm/min. Geprüft wurde mit einer Maximalspannung, die 10%, 20% oder 50% der im statischen Zugscherversuch ermittelten Zugscherfestigkeit für den jeweiligen Klebstoff entsprach. Die Anzahl der Zyklen betrug 30.

2.3 Ergebnisse und Diskussion

2.3.1 Zugversuch nach DIN EN ISO 527 – 1

In Bild 2.3 sind die für die einzelnen Klebstoffgruppen typischen Spannungs-Dehnungsdiagramme an einzelnen Vertretern dargestellt. Steife 1K-PUR-Systeme wiesen typischerweise einen Streckpunkt auf. Die Spannung fiel nach dem Streckpunkt leicht ab und blieb bis zum Bruch auf einem weitgehend konstanten Niveau.

Elastomere Klebstoffe waren durch sehr hohe Dehnungen (bis 300%) gekennzeichnet. Die Spannungs-Dehnungskurven besaßen kaum lineare Bereiche, nach dem Entlasten blieb allerdings eine Längenzunahme von etwa 5%. Es ist zu beachten, dass bei derart grossen Dehnungen durch die Verjüngung des Querschnittes die Nominalspannung von der wahren Spannung stark abweicht.

Die Formaldehydharze zeigten ein sprödes Verhalten. Die Spannungs-Dehnungskurve ist weitestgehend linear und es kommt zu keiner plastischen Deformation.

PVAc Leime liessen ebenfalls hohe Dehnungen zu. Die Kurve im Spannungs-Dehnungsdiagramm ist die eines zähen Werkstoffs ohne Streckpunkt.

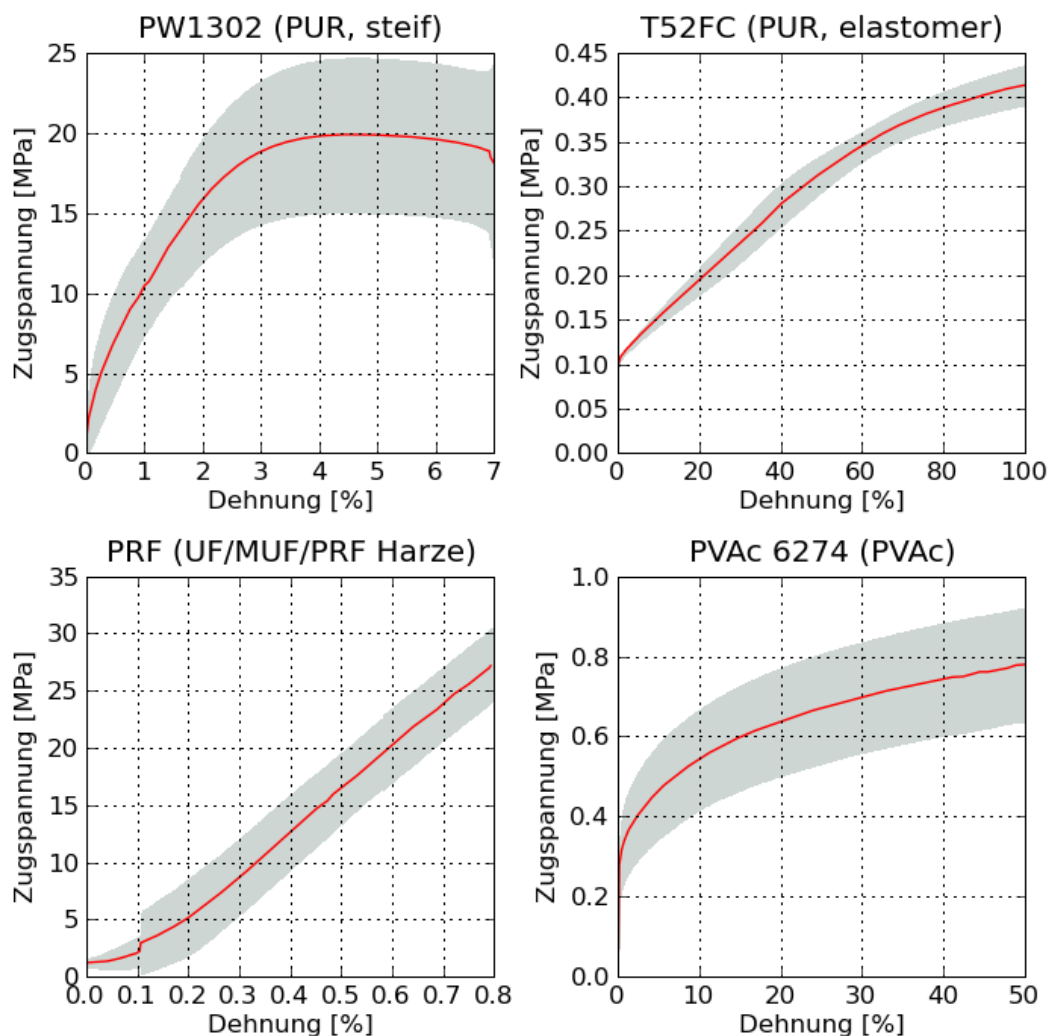


Bild 2.3: Spannungs-Dehnungsdiagramme mit Mittelwertkurven für steife 1K-PUR-Klebstoffe und elastische 1K-PUR-Dichtstoffe, PRF und PVAc Klebstoffe. Mittelwertkurven rot, grauer Hintergrund stellt die Standardabweichungen an jedem einzelnen Punkt dar.

Für dünne Fugen konzipierte Polyurethane deckten ein breites Spektrum in Bezug auf Steifigkeiten und Festigkeiten ab (Bild 2.4, Tab. 2.3). Die gemessenen E-Moduln

reichten von 150 MPa (Mirapur 9500 Speed) bis zu 1 GPa (PURBOND HB 181), die Festigkeiten bewegten sich zwischen 4 MPa (Mirapur 9500 Speed) und 28 MPa (PURBOND HB 181). Es konnte eine Korrelation (Korrelationskoeffizient=0.97) zwischen Festigkeit und Steifigkeit festgestellt werden.

Konnerth et al. (2007) untersuchten ebenfalls PURBOND HB 110 im Zugversuch, allerdings an nicht verjüngten Proben (rechteckig, 6-8 mm x 60 mm). Bei ihren Messungen mit ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry) betrugen die Werte für die Poissonzahl und E-Modul 0.3 bzw. 360 MPa. Der hier gemessene E-Modul (330 MPa) ist ähnlich, die Poissonzahl ist allerdings mit 0.5 deutlich höher. Dieser Umstand kann auf die andere Probengeometrie oder das Herstellungsverfahren der Proben zurückzuführen sein. Konnerth et al. (2007) gossen ihre Klebstofffilme auf PTFE-Platten und verwendeten wesentlich dickere Filme (1.4 mm). PURBOND HB 110 ist ein faserverstärkter Klebstoff. Bedingt durch das hier verwendete Verfahren des Ziehens der Klebstofffilme, kann es zu einer Ausrichtung der Fasern gekommen sein, was eine höhere Querkontraktion erklären würde. Eine Ausrichtung der Fasern könnte mit Proben quer zur Ziehrichtung nachgewiesen werden. Das ist allerdings mit der hier verwendeten Konfiguration nicht möglich, da die Länge der verwendeten Probekörper die Breite der Filme übersteigt.

Tab. 2.3: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Stichprobenumfang (n) für Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit und Poissonzahl von steifen 1K-PUR-Klebstoffen

Klebstoff	E-Modul [MPa]			Zugfestigkeit [MPa]			Poissonzahl μ		
	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n
Mirapur 9500 Speed	153	23	9	3.8	0,4	9	0,38	0,03	8
PURBOND HB 110	330	48	15	11,8	1	14	0,50	0,10	16
PURBOND HB 181	1002	91	8	28	1,2	7	0,42	0,02	8
PURBOND HB S409	952	106	20	23,1	2,2	20	0,40	0,04	18
PURWELD 1302	874	206	7	19,6	5,1	10	0,43	0,01	8

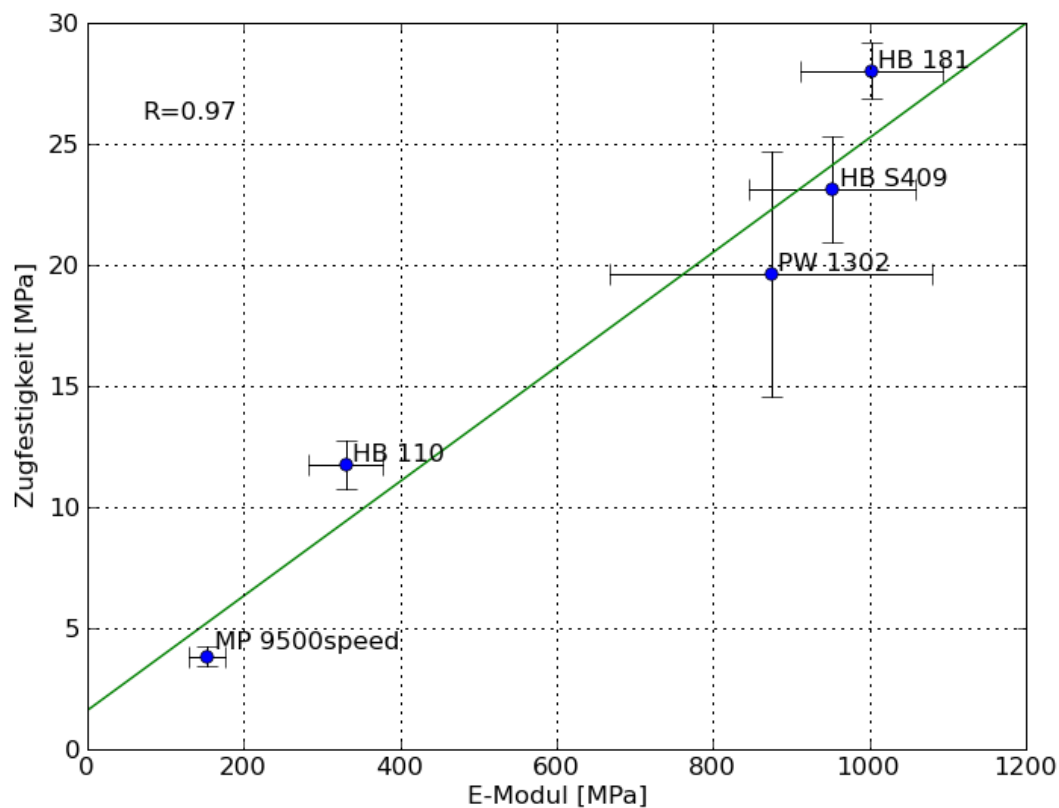


Bild 2.4: Zugfestigkeiten und Zugmoduln der 1K-PUR-Klebstoffe Mirapur 9500 Speed (MP9500speed), PURBOND HB 110 (HB110), PURWELD 1302 (PW 1302), PURBOND HB S409 (HB S409) und PURBOND HB 181 (HB181). Punkte stellen Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar. Regressionsgerade grün

Bei der Herstellung von Filmen mit 1K-PUR-Klebstoffen kam es teilweise zu einem Aufschäumen. Auch aus diesen Filmen wurden Prüfkörper hergestellt und gesondert geprüft. Die Zugfestigkeit lag dabei 60% unter dem Wert, den die selben Klebstoffe an einwandfreien Prüfkörpern erbrachten. Das Aufschäumen von 1K-PUR-Klebstoffen trat bei einer Filmdicke von 0,2 mm und Aushärtung im genannten Herstellungs-klima nicht auf.

Proben aus elastomeren PUR-Dichtstoffen liessen sehr hohe Dehnungen von bis zu 300 % zu. Bei etwa 160 % verliessen die angebrachten Messmarken das Gesichtsfeld des Videoextensometers. Die Proben wurden daher nicht bis zum Versagen be-

lastet, sondern nur bis 150 % gedehnt und anschliessend wieder entlastet. Es konnten deshalb keine Festigkeiten bestimmt werden.

Es wurden zwei unterschiedliche Moduln ermittelt. Für die Vergleichbarkeit mit den anderen Filmen der Testreihe wurde der Anstieg der Regressionsgerade im linearen Bereich der Spannungs- /Dehnungskurve ermittelt. Als weitere Kenngrösse wurde der 50 % Modul bestimmt. Dieser Wert entspricht der Zugspannung bei 50% Gesamtdehnung und ist eine gängige Kenngrösse für Elastomere. Er soll der Vergleichbarkeit mit anderen Materialien dienen. Die ermittelten Werte sind in Tab. 2.4 und Bild 2.5 zusammengefasst.

Die ermittelten 50% Moduln liegen in einem mit anderen Elastomeren vergleichbaren Bereich. Nomura et al. (2008) ermittelten Werte zwischen 0.43 MPa und 0.72 MPa für silylierte Polyurethane. Naturkautschuke mit unterschiedlichen Schwefel- und Russgehalten wurden von Choi (2000 ; 2001) untersucht. Die 50 % Moduln betrugen zwischen 1.8 und 2.3 MPa.

Auffallend war, dass der Klebstoff Miraflex 9560 bei unterschiedlicher Dicke der Filme unterschiedliche Ergebnisse lieferte (in Bild 2.5 mit "MF 9560 (~1 mm)" und "MF 9560 (~0.5 mm)" bezeichnet). Bedingt durch die chemische Reaktion kann es im Zuge der Aushärtung zum Schwinden des Klebstoffes kommen (Weiss 1966). Dass dieses Schwindverhalten bei PUR-Klebstoffen zur Rissbildung führen kann, wurde von Swanson (1977) gezeigt. Bei elastomeren Polyurethanen kommt es wegen der hohen Dehnbarkeit nicht zur Rissbildung, Nakamae et al. (1996) weisen allerdings darauf hin, dass durch das Schwinden im Material innere Spannungen entstehen und die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen können. Durch die grössere Dicke der Klebstofffilme kann es zu stärkeren Unterschieden in der Aushärtegeschwindigkeit zwischen der Luft, der dem Trägermaterial zugewandten Seite und dem Inneren des Filmes kommen, wodurch die inneren Spannungen verstärken.

Tab. 2.4: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (sd) und Stichprobenumfang (n) Elastizitätsmodul, 50% Modul und Poissonzahl für elastomere 1K-PUR-Klebstoffe

Klebstoff	E-Modul [MPa]			50% Modul [MPa]			Poissonzahl μ		
	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n
SikaBond®-T52FC	0,4	0,05	9	0,3	0,02	10	0,39	0,02	10
Miraflex 9560 (~1 mm)	1,2	0,07	8	0,6	0,03	10	0,45	0,03	9
Miraflex 9560 (~0.5 mm)	2,1	0,14	8	0,8	0,03	9	0,40	0,02	9
MF 9550	1,4	0,02	6	0,6	0,02	9	0,35	0,03	9
Sikaflex®-228	1,6	0,40	10	0,6	0,07	9	0,38	0,03	8

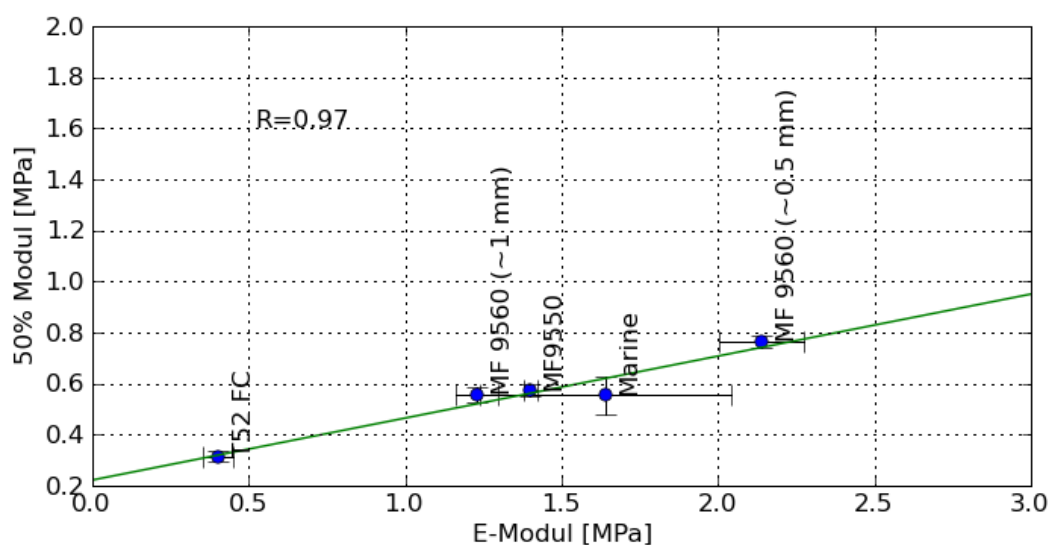


Bild 2.5: E-Moduln und 50% Moduln elastomerer 1K-PUR-Klebstoffe. Punkte stellen Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar. Regressionsgerade grün.

Von den Formaldehydharzen konnten nur MUF und PRF ausgewertet werden. Die gemessenen Werte sind in Bild 2.6 und Tab. 2.5 dargestellt. Klebstofffilme aus UF konnten nicht hergestellt werden. Die Problematik der Herstellung von massiven Körpern aus UF Harzen wird bereits von Clad (1964) angesprochen, wobei Proben aus UF Harz nach der Aushärtung nicht zu gebrauchen waren.

Tab. 2.5: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Stichprobenumfang (n) der ermittelten Werte für Formaldehydharze

Klebstoff	E-Modul [MPa]			Zugfestigkeit [MPa]			Poissonzahl μ		
	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n
Kauramin 683	2489	339	7	27,3	3,2	8	0,42	0,04	6
Prefere 4040	3988	343	8	31,7	2,3	8	0,34	0,10	8

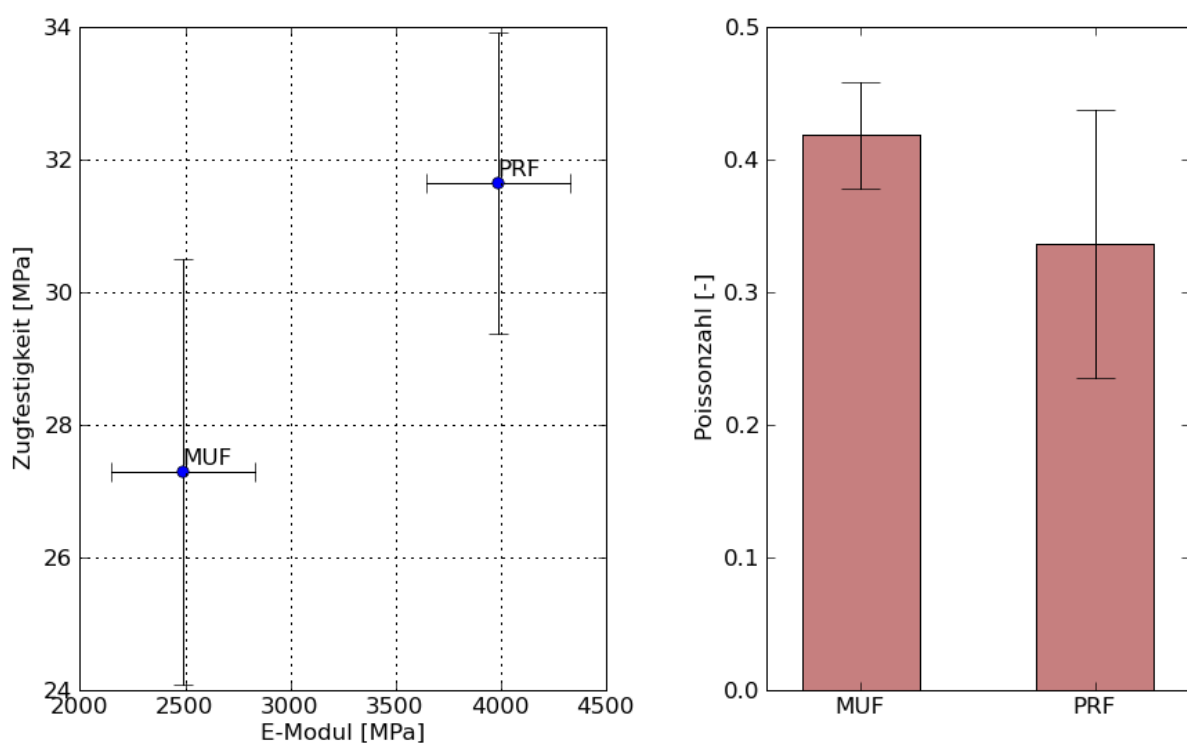


Bild 2.6: Festigkeiten, Steifigkeiten und Poissonzahlen von Kauramin 683 (MUF) und Prefere 4040 (PRF) Klebstofffilmen. Punkte und Balken stellen die Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar.

Von allen getesteten Klebstoffen besitzen MUF und PRF die höchsten E-Moduln (2,5 GPa, bzw. 4 GPa). Die ESPI Messungen von Konnerth et al. (2007) ergaben Werte von 7 GPa, bzw. 3,5 GPa und Poissonzahlen von 0,34, bzw. 0,36. Diese Werte weichen von den hier gemessenen ab, in der Publikation wurden allerdings Harze mit anderen Formulierungen geprüft. Konnerth et al. (2007) liessen ihre Filme auch wesentlich langsamer aushärten, als bei den hier verwendeten Verfahren, wodurch sich in ihren Filmen geringere innere Spannungen gebildet haben.

Tab. 2.6: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Stichprobenumfang (n) der ermittelten Werte für PVAc-Klebstoffe

Klebstoff	E-Modul [MPa]			Zugfestigkeit [MPa]			Poissonzahl		
	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n
Miracol 6274	320	185	6	0,8	0,2	6	0,44	0,03	6
Miracol 8F1	619	340	9	1,6	0,2	10	0,44	0,08	7

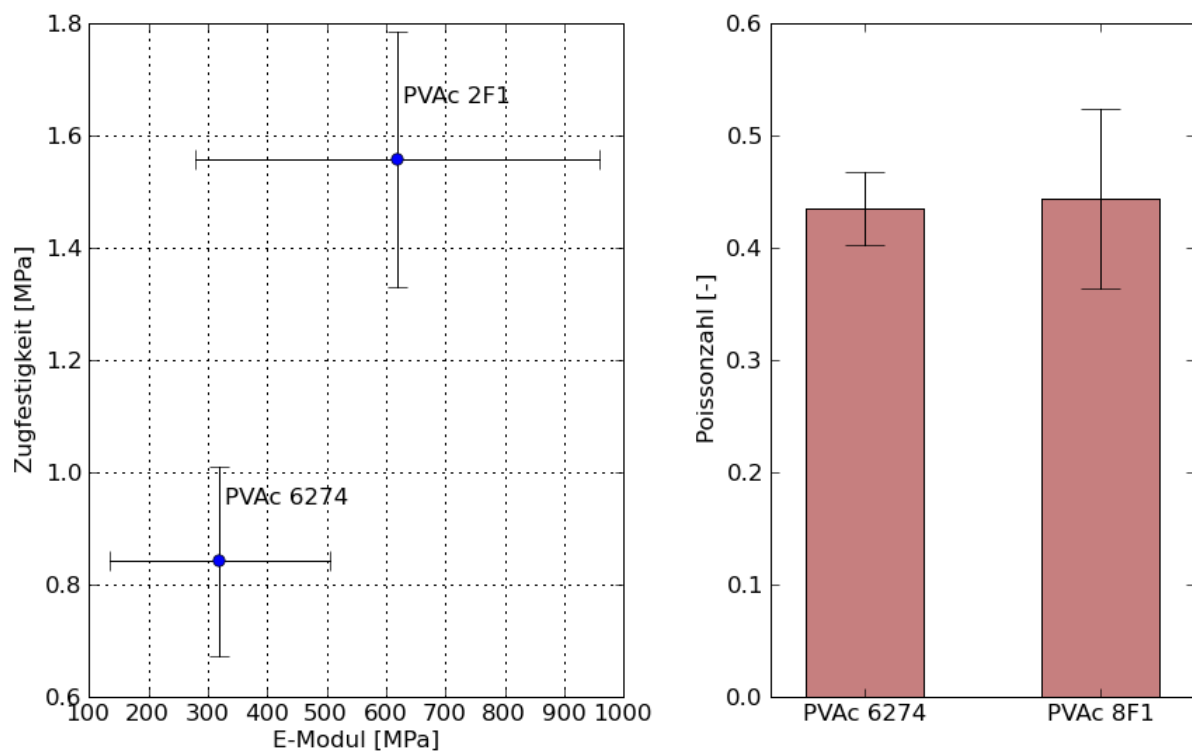


Bild 2.7: Festigkeiten, Steifigkeiten und Poissonzahlen von PVAc-Klebstoffen. Punkte und Balken stellen die Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar.

Die einzigen Unterschiede zwischen den beiden Weissleimen bestehen laut Herstellerangaben in ihrem Festkörpergehalt (Miracol 8F1: 50-52%, Miracol 6274: 45-47%) und damit verbunden in der Viskosität (Miracol 8F1: 8500 mPa s nach Brookfield, Miracol 6274: 2500 mPa s nach Brookfield). Dennoch gibt es Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften. Zugfestigkeiten und E-Moduln (Tab. 2.6 und Bild 2.7) der

beiden Klebstoffe unterscheiden sich höchstsignifikant von einander. Die Poissonzahlen (Tab. 2.6 und Bild 2.7) unterscheiden sich nicht signifikant-

2.3.2 Zugscherversuch mit statischer Belastung

Die Ergebnisse der statischen Zugscherprüfung sind in Tab. 2.7 dargestellt. Die ermittelten Zugmoduln und Zugscherfestigkeiten sind in Bild 2.8 abgebildet. Bild 2.9 stellt die Brucharbeit grafisch dar.

Tab. 2.7: Ergebnisse der statischen Zugscherversuche als Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Probenumfang (n)

Klebstoff	Zugschermodul [MPa]			Zugscherfestigkeit [MPa]			Bruchdehnung [%]			Brucharbeit [Nmm/mm ²]		
	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n	\bar{x}	s	n
Sikaflex®-228	0,2	0,0	15	0,9	0,1	15	65,4	6,9	15	5,0	0,6	15
SikaBond®-T52FC	0,3	0,0	16	1,0	0,1	16	66,8	11,3	16	5,8	1,2	16
Miraflex 9560	0,4	0,1	15	1,2	0,1	15	47,6	6,9	15	8,3	0,9	15
Miraflex 9550	0,5	0,1	15	2,2	0,3	15	53,8	5,0	15	5,4	1,1	15
Mirapur 9500 Speed	4,3	0,6	14	8,2	0,9	14	3,5	0,7	14	2,1	0,8	16
PURWLED 1302	6,5	0,7	16	11,3	1,3	16	2,1	0,4	16	1,4	0,4	16
PURBOND HB S409	6,7	0,7	15	12,5	1,5	15	1,5	1,3	15	1,2	0,5	16

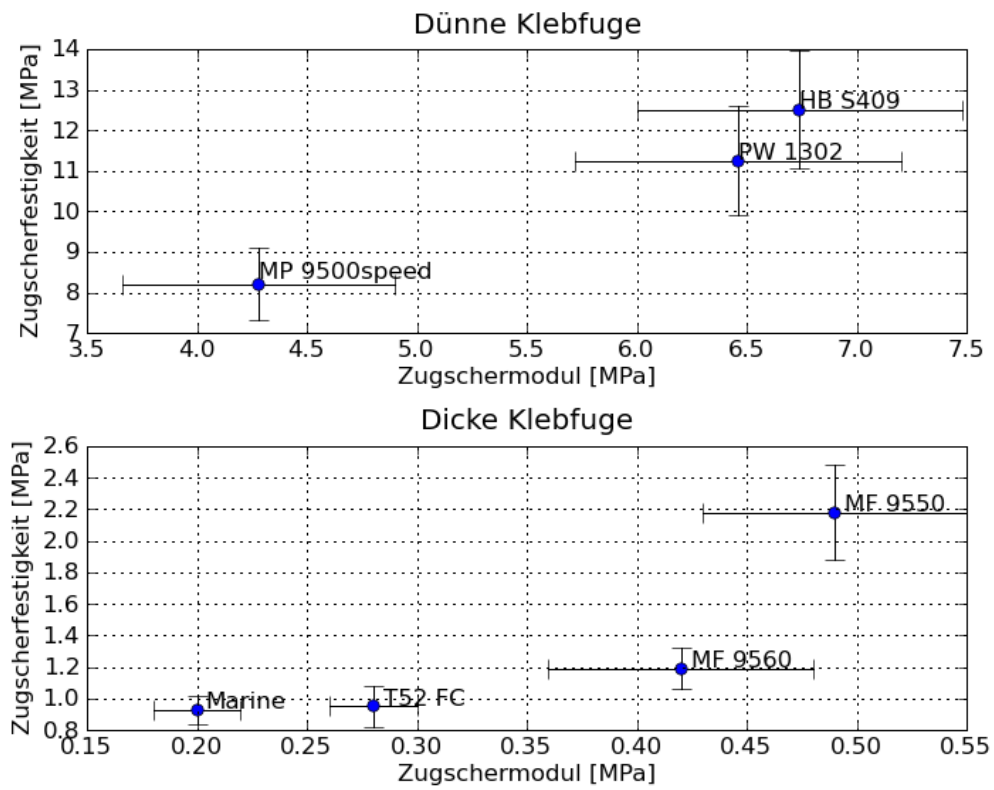


Bild 2.8: Zugschermoduln und Zugscherfestigkeiten von 1K-PUR-Klebstoffen mit dünner (PURBOND HB S409, PURWELD 1302 und Mirapur 9500 Speed) und dicker Klebfuge (Sikaflex®-228 (Marine), SikaBond®-T52FC, Miraflex 9560 und Miraflex 9550), gemessen an Zugscherproben nach EN 205. Punkte stellen Mittelwerte, Whisker Standardabweichungen dar.

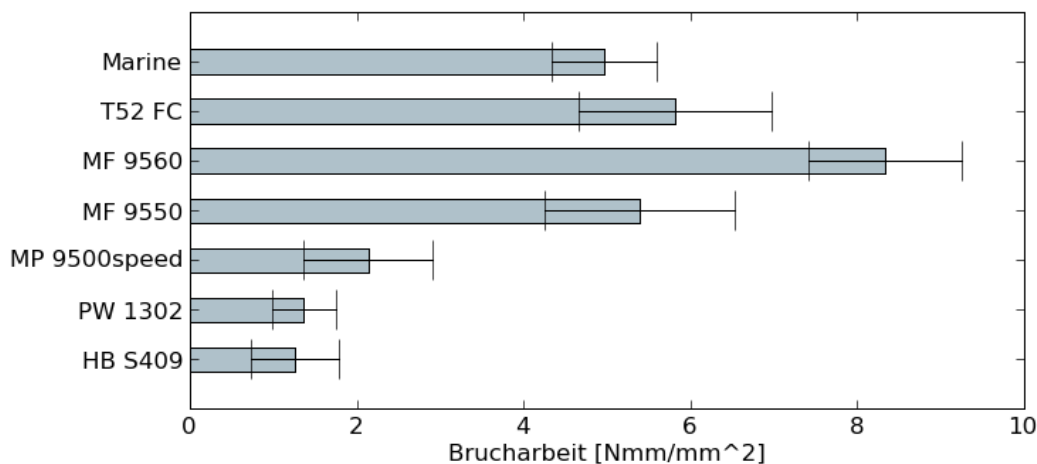


Bild 2.9: Mittelwerte der Brucharbeit aus den statischen Zugscherversuchen mit den Klebstoffen Sikaflex®-228 (Marine), SikaBond®-T52, Miraflex 9560, Miraflex 9550, Mirapur 9500 Speed, PURWELD 1302 und PURBOND HB S409.

Der Holzbruchanteil betrug bei den Klebstoffen PURWELD 1302, PURBOND HB S409 und Mirapur 9500 Speed (dünne Klebstoffugen) bis zu 100%. Die Dichtstoffe SikaBond®-T52 FC, Miraflex 9560, Miraflex 9550 und Sikaflex®-228 (Marine) (dicke Klebstoffugen) wiesen immer einen Bruch in der Klebstoffuge auf. Die ermittelten Zugscherfestigkeiten der 1K-PUR-Dichtstoffe liegen weit unter denen der steifen 1K-PUR-Klebstoffe wie in Bild 2.8 ersichtlich. Die Brucharbeit ist, wie in Bild 2.9 dargestellt bei den flexiblen 1K-PUR-Dichtstoffen allerdings bedeutend höher.

In Bild 2.10 sind in verklebtem Zustand gemessene Zugschermodule und - unter Annahme der Isotropie - errechnete Schubmodule in Diagrammen aufgetragen. Der Schubmodul errechnet sich nach Gleichung (3).

$$G = \frac{E}{2 + 2\nu} \quad (3)$$

G Schubmodul in MPa

E Elastizitätsmodul in MPa

ν Poissonzahl

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurden nicht alle Klebstoffe in einem Diagramm dargestellt. Eine lineare Regression (in Bild 2.10 nicht dargestellt) durch alle Werte (steife und elastomere Klebstoffe) ergibt einen Korrelationskoeffizienten von 0.93, der Zusammenhang zwischen Schubmodul (G) und Zugschermodul (G_{Zugscher}) kann mit Gleichung (4) dargestellt werden. In einem zweiten Schritt kann über eine weitere Korrelation auf die Zugscherfestigkeit geschlossen werden.

$$G_{\text{Zugscher}} = 0,84 + 0,02 \cdot G \quad (4)$$

Zugschermodul

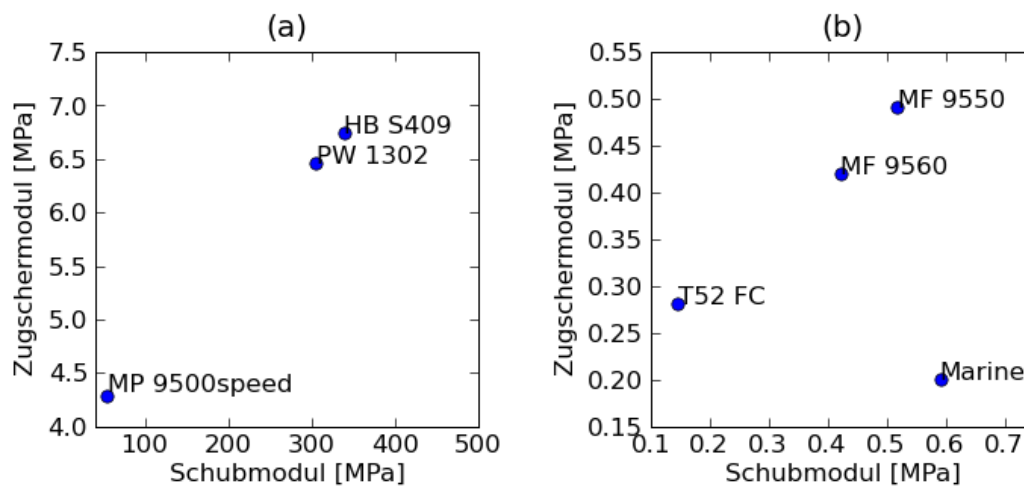


Bild 2.10: Zugschermoduln aus Zugscherproben und errechnete Schubmoduln aus Zugversuchen für steife (a) und elastomere (b) PU Klebstoffe

Trotz des hohen Korrelationskoeffizienten hat der Schätzwert für den Zugschermodul bei elastomeren Klebstoffen einen Fehler von über 100% (ein errechneter Zugschermodul für SikaBond®-T52FC beträgt über 0,8 MPa). Schätzwerte für Zugschermoduln von steifen Klebstoffen weisen allerdings wesentlich geringere Fehler auf. Diese Klebstoffe dominieren die Messreihe, da sie einen weitaus grösseren Bereich abdecken, als die Elastomere. Messwerte im Bereich von 1 bis 50 MPa für den Schubmodul würden der Regression mehr Aussagekraft verleihen.

2.3.3 Zugscherversuch mit zyklischer Belastung

Bild 2.11 zeigt schematisch die Hystereseschleife eines Prüfkörpers in einem zyklischen Zugversuch. Bei einem Belastungszyklus entsteht eine Schleife. Die Fläche, die von der Schleife umschlossen wird, ist die Verlustarbeit. Weiter zeigt Bild 2.11, dass trotz vollständiger Entlastung und Prüfung innerhalb des elastischen Bereichs der Prüfkörper seine Ausgangslänge bei Kraft Null nicht einnimmt. Der Elastizitätsmodul wurde aus der Steigung der Geraden zwischen dem Startpunkt und den Wendepunkten der Hystereseschleife ermittelt.

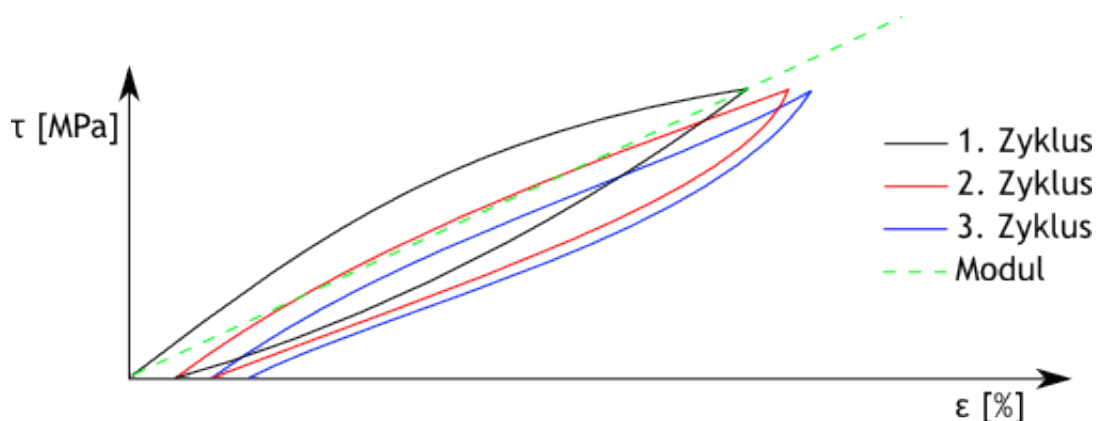


Bild 2.11: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei zyklischen Zugversuchen. Bestimmung des Elastizitätsmoduls aus den Hystereseschleifen

Durch die Verschiebung der Hystereseschleifen ändert sich sowohl der ermittelte Elastizitätsmodul als auch die Verlustarbeit. In Bild 2.12 ist die Veränderung des Elastizitätsmoduls über die Zyklenanzahl für die verschiedenen Klebstoffarten und Belastungsarten aufgezeichnet. Dieser Effekt dürfte auch bei zyklischer klimatischer Beanspruchung auftreten.

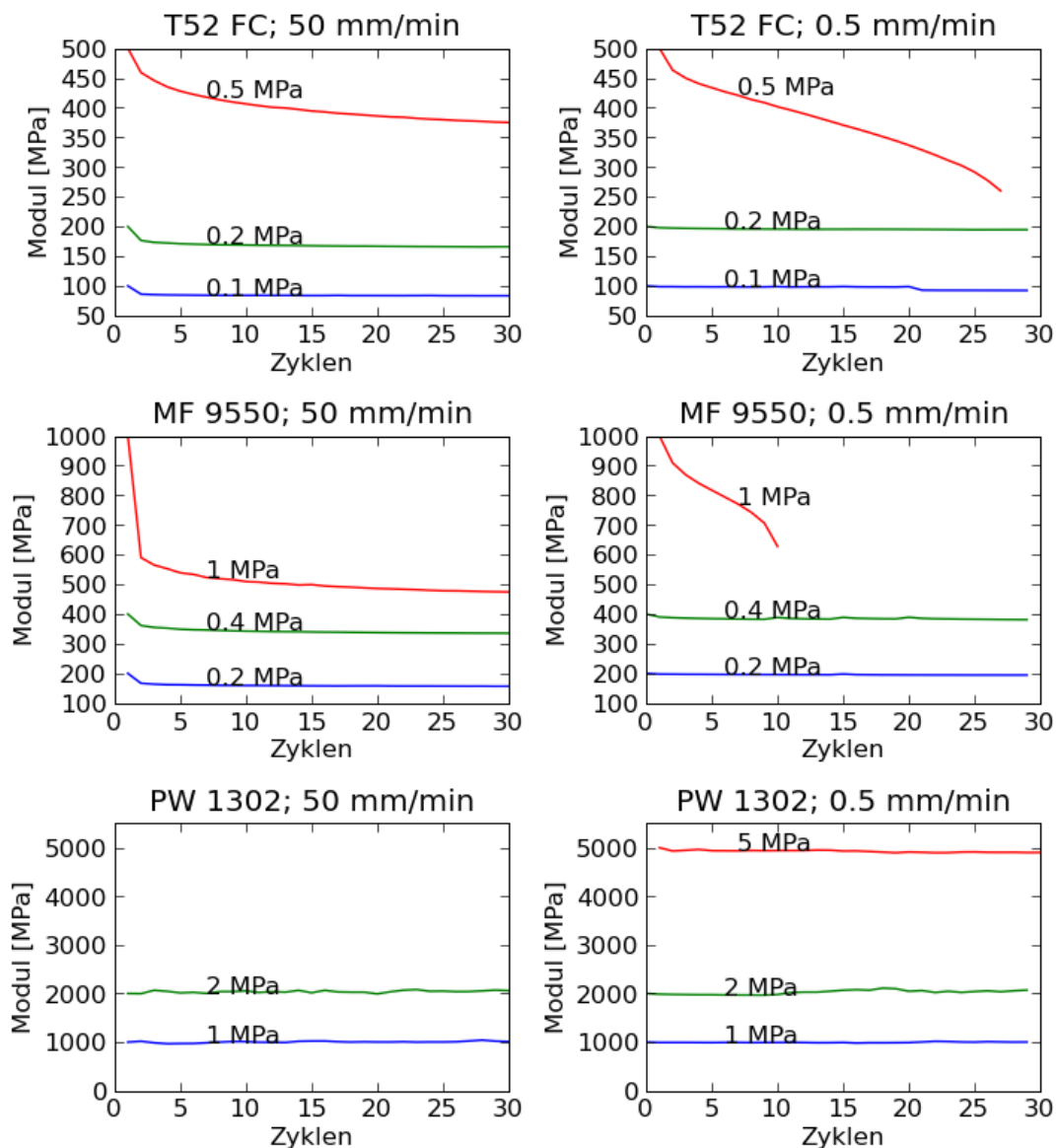


Bild 2.12: Zugscherproben mit dicker (Miraflex 9550 und SikaBond®-T52FC) und dünner (PURWELD 1302) Klebstofffuge bei zyklischer Belastung. Darstellung der Entfestigung der Verklebung über die Anzahl der Lastzyklen und unterschiedlichen Lastniveaus (rot 50%, grün 20%, blau 10% der im Zugversuch ermittelten Zugscherfestigkeit)

Die beiden elastomeren Klebstoffe (SikaBond®-T52 FC, Miraflex 9550) zeigten ein ähnliches Verhalten bei der zyklischen Belastung. Der Schubmodul nahm mit zunehmender Zyklenanzahl ab. Auf dem niedrigen Lastniveau (10%, 20%) fand bei hoher

Prüfgeschwindigkeit (50 mm/min) eine stärkere Entfestigung, als bei niedriger Prüfgeschwindigkeit (0.5 mm/min) statt. In allen Fällen stellte sich nach etwa fünf Zyklen eine konstante Steifigkeit ein. Auf dem hohen Lastniveau (50%) bei hoher Prüfgeschwindigkeit war eine stärkere Entfestigung, als bei den niedrigen Lastniveaus sichtbar. Bei niedriger Prüfgeschwindigkeit versagten die Proben innerhalb der beobachteten 30 Zyklen (27 Zyklen bei SikaBond®-T52FC, 10 Zyklen bei Miraflex 9550). Dies kann an der niedrigen Prüfgeschwindigkeit und selben Zyklenanzahl liegen. Die Prüfkörper wurden dabei bedeutend länger belastet. Von der Dauer der Belastung abhängige Effekte wie das Kriechen, können dadurch an Bedeutung gewonnen haben und so zum Versagen der Prüfkörper geführt haben.

Der steife Klebstoff PURWELD 1302 zeigt bei den 10% und 20% Lastniveaus bei beiden Prüfgeschwindigkeiten keine bedeutende Veränderung des Elastizitätsmoduls. Bei der Prüfgeschwindigkeit 0,5 mm/min und 50% Lastniveau war lediglich ein leichter Abfall des Elastizitätsmoduls erkennbar. 50% Lastniveau bei einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min konnte keiner Prüfung unterzogen werden.

2.4 Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Kennwerte von Klebstoffen wurden Klebstofffilmen in Zugversuchen untersucht. Weiter wurden statische und zyklische Zugscherversuche an verklebten Holzproben mit dünnen und dicken Klebstoffugen durchgeführt. Dabei lag der Fokus auf 1K-PUR-Klebstoffen mit unterschiedlichen E-Moduln. Mit den Zugversuchen an Klebstofffilmen wurde untersucht, ob sich die ermittelte Zugfestigkeit auf die an Zugscherproben ermittelte Zugscherfestigkeit übertragen lässt. Durch die zyklischen Zugscherversuche wurde eine Belastung in der Klebstoffuge simuliert, wie sie beispielsweise bei wiederholten Klimaänderungen durch Quellen und Schwinden des Holzes auftritt.

Der Zugschermodul aus den statischen Zugscherversuchen und der errechnete Schubmodul aus den Klebstofffilmen im Zugversuch korrelieren. Weiter zeigten die Versuche, dass bei höherem Zugschermodul auch mit einer höheren Zugscherfestig-

keit zu rechnen ist. Somit können mit dem Zugversuch an Klebstofffilmen Aussagen über die Eigenschaften einer Verklebung mit diesem Klebstoff getroffen werden. Die Holz-Klebstoff-Kombination sollte aber trotzdem auf Tauglichkeit untersucht werden.

Die zyklischen Zugscherversuche zeigten eine Veränderung des Schubmoduls der elastischen 1K-PUR-Dichtstoffe. Während der ersten Zyklen sank dieser ab und pendelte sich anschliessend auf einem konstanten Niveau ein. Bei dem steifen 1K-PUR-Klebstoff konnte keine Veränderung des Schubmoduls festgestellt werden. Es empfiehlt sich daher, für die Prüfung dicker Klebstofffugen, Konditionierungszyklen vorzuschalten.

3 Untersuchungen zu dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau

3.1 Einleitung

3.1.1 Wissensstand

Dreischichtige Massivholzplatten bestehen aus drei flächig kreuzweise miteinander verklebten Brettlagen. Bei der Fertigung unterscheidet man das Block- und das Durchlaufverfahren. Beim Blockverfahren werden Seitenbretter zu einem Block verklebt und daraus mittels Dünnschnittgatter oder Bandsäge die Brettlagen geschnitten. Beim Durchlaufverfahren werden Bretter an ihren Schmalflächen miteinander verklebt. Die so entstehenden Brettlagen werden mittels Etagen- oder Vakuumpressen miteinander verklebt. Zur Erhöhung der Formstabilität werden stehende Jahrringe (Sortierung, Riftschnitt oder Einsatz von Seitenware und Blockverleimung), Auftrennen einer dickeren Platte in zwei Decklagen oder ein Schlitzen der Mittellage angewendet (Dunky und Niemz, 2002).

Bei einer Klimaänderung kann es bei dreischichtigen Massivholzplatten zu einem Plattenverzug durch Einstellung eines Feuchteprofils kommen. Durch Untersuchungen von Hass (2007), sowie Gereke (2009) konnte dabei festgestellt werden, dass bei dreischichtigen Massivholzplatten bereits nach drei bis sieben Tagen Spannungsspitzen zu erwarten sind. Beeinflusst durch den jeweiligen Plattenaufbau wurden die Spannungen nach diesem Zeitraum geringer oder blieben weitgehend auf dem selben Niveau.

3.1.2 Zielstellung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden spezifische Eigenschaften von dreischichtigen Massivholzplatten untersucht, welche völlig bzw. teilweise aus Laubholz gefertigt waren. Die Einzellagen der Platten wurden sowohl in den Holzarten, als auch in den Schichtdicken variiert.

Zur Herstellung der Massivholzplatten wurden auf Grund der breiten Palette angebotener Klebstoffe mit unterschiedlichem E-Modul 1K-PUR-Klebstoffe genutzt.

Bei den hergestellten Verklebungen wurden sowohl die verwendeten Klebstoffe, als auch die Dicke der Klebstofffugen variiert. Dabei wird untersucht, ob die Klebstoffe auf Grund ihrer mechanischen Eigenschaften für den Einsatz von Laubholz oder auch in kombinierten Laub-/Nadelholz-Werkstoffen geeignet sind. Insbesondere soll untersucht werden, ob es möglich ist Spannungen durch Variation des Klebstoffes und der Klebfugendicke im bestimmten Masse zu kompensieren. Dabei werden im Laubholz durch den grösseren Elastizitätsmodul und die höheren Quellmasse grössere Spannungen erreicht als im Nadelholz.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschliessend diskutiert und zusammengefasst. Zudem werden unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse Anregungen und Empfehlungen für weiterführende Arbeiten, sowie Möglichkeiten zur weiteren Plattenmodifikation gegeben. Zudem wird auf mögliche Einsatzgebiete der untersuchten Plattenaufbauten eingegangen.

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Verwendete Holzarten

Bei den verwendeten Hölzern handelt es sich zum einen um die Laubhölzer Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) und Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und zum anderen um das Nadelholz Fichte (*Picea abies* Karst.). Ausgewählte Eigenschaften der Hölzer sind in Tab. 3.1 zusammengefasst. Dabei können die Werte innerhalb der Holzarten, wie auch innerhalb eines Stammes voneinander abweichen.

Tab. 3.1: Eigenschaften der verwendeten Holzarten nach Wagenführ (1996) und Niemz (1993)

		Rotbuche	Esche	Fichte
Rohdichte [kg/m ³]	saftfrisch ($\rho_{\text{saft-frisch}}$)	820... 1070...1270	600... 800...1140	700... 800...850
	normalklimat. (V., 2003) (ρ_N)	710	700	460
	darrtrocken ($\rho_{\text{dtr.}}$)	490...680...880	410...650...820	300... 430...640
Porenanteil [%]		55	57	71
maximales Schwindmass [%]	axial	0,3	0,2	0,3
	radial	5,8	4,6...5,0	3,5...3,7
	tangential	11,8	8,0...8,4	7,8...8,0
maximales Quellmass [%]	axial	0,2...0,6		0,2...0,4
	radial	6,2		3,7
	tangential	13,4		8,5
Zugfestigkeit [N/mm ²]	parallel ($\sigma_{\text{ZB II}}$)	57...135...180	70...165...293	21...90... 245
	senkrecht ($\sigma_{\text{ZB } \perp}$)	7...10,7	7...11,2	1,5...2,7... 4,0
Elastizitätsmodul [N/mm ²]	parallel ($E_{\text{b II}}$)	10.000... 16.000...18.000	4.400... 13.400...18.100	7.300... 11.000... 21.400

Wie den Werten der Tab. 3.1 entnommen werden kann, beeinflusst die Dichte das Schwind- wie auch das Quellmass des Holzes. Das Schwindmass wie auch das Quellmass steigt mit wachsender Dichte.

3.2.2 Verwendete Klebstoffe

Zur Fertigung der Prüfkörper wurden zwei 1K-PUR-Klebstoffe eingesetzt. Die Aushärtung dieser Klebstoffe erfolgt durch die Reaktion mit Wasser, welches sich in der Luft oder auch im Holz befindet. Genauer handelt es sich bei den Klebstoffen zum einen um den hochviskosen, lösemittelfreien, elastischen Klebstoff SikaBond®-

T52FC der Firma Sika Schweiz AG. Zum anderen wurde der Klebstoff PURWELD 1302 der Firma Purbond AG verwendet. Bei diesem handelt es sich ebenfalls um einen lösemittelfreien, jedoch niederviskosen 1K-PUR-Klebstoff. Er zeichnet sich durch eine unelastische/starre und farblose Klebfuge aus. Tab. 3.2 sind ausgewählte Eigenschaften der genannten Klebstoffe zu entnehmen.

Tab. 3.2: Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe

Bezeichnung	Viskosität [mPa.s]	Form	E-Modul [N/mm ²]	Anwendungsbereich
SikaBond®-T52FC	70.000	pastös	0,4	Verklebung von Parkett und Dielen
PURWELD 1302	5.000	flüssig	939,7	konstruktiver Holzbau im Innen- und Aussenbereich

Weitere Angaben zu SikaBond®-T52FC und PURWELD 1302 können den technischen Merkblättern, sowie den Sicherheitsdatenblättern entnommen werden.

3.2.3 Verwendete Klimata

In Tab. 3.3 sind alle Klimata aufgeführt, die zur Durchführung der Versuche eingesetzt worden sind. Die Bezeichnung der Klimata im Text erfolgt als einfache Zahlenkombination. Die vordere Zahl beschreibt dabei die Lufttemperatur in °C und die darauf folgende Zahl die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent (%). Der grosse Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit des Klimas 20/35 ist durch technisch bedingte Schwankungen der Regelfeuchte des Klimaraumes zu erklären.

Tab. 3.3: Abkürzungen der eingesetzten Klimata

Kürzel im Text	Bezeichnung	Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit
20/35	Trockenklima	20°C ± 2K	35% <...<50%
20/65	Normalklima	20°C ± 2K	65% ± 5%
20/85	Feuchtklima	20°C ± 2K	85% ± 5%

3.2.4 Herstellung der Prüfkörper

Die zur Herstellung der Prüfkörper zugeschnittenen Lamellen wiesen stehende Jahrringe (Jahrringwinkel 60...90°) auf.

Zur Fertigung der einzelnen Schichten wurden jeweils sechs Lamellen in einer Rahmenpresse miteinander verklebt. Dies erfolgte auf Grund der zur Verfügung stehenden Presse ohne definierten Pressdruck. Nach völliger Aushärtung des Klebstoffes konnten die Platten für die Verklebung zu dreischichtigen Massivholzplatten weiterverarbeitet werden. Die Breitflächenverklebung wurde maximal 24 Stunden nach dem Dickenhobeln der jeweiligen Schichten ausgeführt. Die Verklebung zu kreuzweise aufgebauten dreischichtigen Massivholzplatten erfolgte in einer Zschokke Laborpresse der Firma Conrad Zschokke AG aus Döttingen unter Einhaltung definierten Pressdruckes, Klebstoffauftrages sowie Zusatzwassermenge. Die genauen Parameter können Tab. 3.4 entnommen werden. Der Klebstoffauftrag erfolgte dabei stets einseitig.

Tab. 3.4: Pressparameter zur Herstellung der Breitflächenverklebungen

Klebstoff	Fugendicke [mm]	Klebstoffmen- ge [g/m ²]	Zusatzwasser [g/m ²]	Press- druck [N/mm ²]	Presszeit [h]
PURWELD 1302	0,1	150	50	0,8	2
SikaBond® -T52FC	0,1	120	50	0,8	6
SikaBond® -T52FC	1,0	430	50	0,36	24
SikaBond® -T52FC	2,0	810	50	0,33	24

Untersuchungen von Kägi, Niemz und Mandallaz (2006) ist zu entnehmen, dass für optimale Verklebungsfestigkeiten von 1K-PUR-Klebstoffen die vom Hersteller angegebenen Holz- und Luftfeuchten zwingend eingehalten werden müssen. Bei Unterschreitung der geforderten Holzfeuchte können Fehlverklebungen auftreten. Bezugnehmend auf die Untersuchungen von Kägi, Niemz und Mandallaz (2006) erfolgte ein gezielter, beidseitiger Auftrag von Zusatz- oder auch Oberflächenwasser bei den im Klima 20/35 konditionierten Prüfkörpern. Da für die in dieser Arbeit verwendeten Klebstoffe keine speziellen Untersuchungen hinsichtlich der optimalen Mengen an Zusatzwasser gemacht worden sind, sind die von Kägi, Niemz und Mandallaz (2006) für Polyurethan Klebstoffe als geeignete Menge ermittelten 50 g/m² aufgetragen worden. Um die vollständige Reaktion des Klebstoffes innerhalb der dicken Klebstofffugen gewährleisten zu können, wurde bei diesen die Presszeit abweichend von den Herstellerangaben auf 24 Stunden erhöht. Die Menge des Klebstoffauftrages zum Erreichen der dicken Klebstofffugen, ergab sich aus dem Fertigungsverfahren. Zum Gewährleisten einheitlich dicker Fugen, wurden Abstandshalter eingesetzt, welche auf den 600 x 600 mm grossen Platten fixiert wurde. Über diesen so gebildeten Rahmen wurde der Klebstoff abgezogen und somit gleichzeitig gleichmässig verteilt. (Schema siehe Bild 3.1). Damit der überschüssige Klebstoff während des Pressvor-

ganges entweichen konnte, wurden die Abstandshalter an mehreren Stellen unterbrochen.

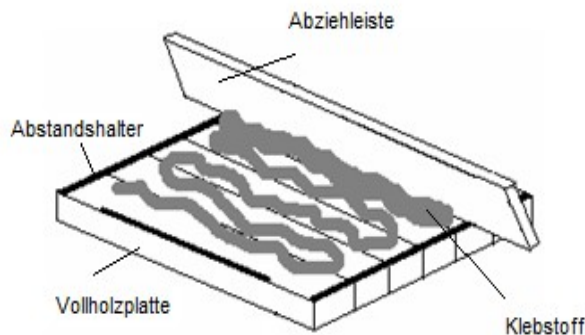


Bild 3.1: Herstellen der dicken Klebefugen durch Abziehen des Klebstoffes

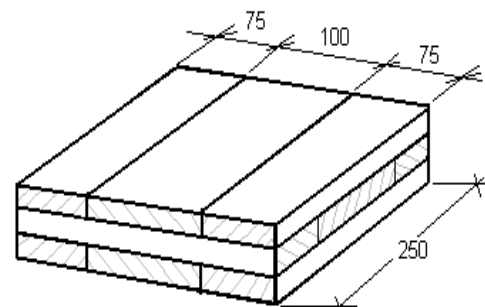






Bild 3.2: Prüfkörper mit Angabe der Fugenanordnung

Nach der vollständigen Aushärtung des Klebstoffes, wurden aus den grossformatigen Platten die entsprechenden Prüfkörper herausgetrennt. Dabei sind die Fugen innerhalb der Deckschichten möglichst symmetrisch über die Plattenbreite angeordnet worden (Bild 3.2). Zudem wurde eine spiegelgleiche Ausrichtung der Klebstofffugen beider Deckschichten zueinander angestrebt. Dies geschah unter dem Aspekt, Variationen der Versuchsergebnisse auf Grund abweichender Plattenausbildungen ausschliessen zu können. Anschliessend wurden alle Prüfkörper vor Versuchsbeginn nochmals mindestens sieben Tage im entsprechenden Ausgangsklima (siehe Gliederungspunkt *Prüfverfahren*) gelagert.

3.2.5 Kennzeichnung der Prüfkörper

Die Bezeichnung der Prüfkörper ergibt sich aus der Bezeichnung des Klebstoffes, der Fugendicke, des Plattenaufbaus und des Versuches. Die angewandten Bezeichnungen für den Plattenaufbau, sowie der durchgeführten Versuche werden in Tabelle 3.5 und Tabelle 3.6 erläutert. Die Klebstoffe wurden jeweils durch ihren Anfangsbuchstaben ersetzt. PURWELD 1302 mit P und SikaBond®-T52FC folglich mit S. Die Bezeichnungen der Klebstofffugen entsprachen ihrer Dicke (0,1mm, 1mm, 2 mm).

Tab. 3.5: Verwendete Bezeichnungen der Plattenaufbauten zur Kennzeichnung der Prüfkörper

Plattenaufbau	Schichten ^{*1,2}
 (B3)	DS Buche 10 mm MS Buche 10 mm DS Buche 10 mm
 (B2)	DS Buche 10 mm MS Fichte 10 mm DS Buche 10 mm
 (B1)	DS Buche 8 mm MS Fichte 10 mm DS Fichte 12 mm
 (E1)	DS Esche 8 mm MS Fichte 10 mm DS Fichte 12 mm

^{*1}DS: Deckschicht; MS: Mittelschicht

^{*2}Die Schichten des Versuches der Rissentwicklung sind jeweils 14 mm

Tab. 3.6: Verwendete Bezeichnungen der Versuche zur Kennzeichnung der Prüfkörper

Versuche	Prüfkörper	
	Anzahl je Variante	Dimension [mm]
Künstliche Bewitterung (B)	2	82/320
Eigenspannung (E)	4	250/250
Freie Quellung (Q)	2	250/250
Rissentwicklung (R)	5	100/100
Optische Dehnungsmessung (D)	1	140/140

Zum Verständnis der Prüfkörperbezeichnungen wird folgendes Beispiel aufgeführt:

P	01	B3	-E
Klebstoff	Klebfugendicke	Plattenaufbau	Versuch
(Purweld 1302)	(0.1 mm)	(Buche/Buche/Buche)	(Eigenspannung)

Bei mehreren Prüfkörpern innerhalb eines Versuches, wurden die Bezeichnungen zusätzlich durchlaufend nummeriert.

3.3 Prüfverfahren

3.3.1 Freie Quellung

Unter freier Quellung versteht man die ungehinderte Volumenzunahme des Holzes im Zuge der Wasseraufnahme bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte bzw. des Fasersättigungspunktes.

Zur Bestimmung der freien Quellung wurden zunächst von jedem Plattenaufbau zwei Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 250 mm zugeschnitten. Diese wurden bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes im Trockenklima 20/35 gelagert und dann zur Prüfung ins Feuchtklima 20/85 überführt. In diesem wurden in regelmässigen Abständen die Formatänderungen der Platten unter Verwendung von analogen Messuhren mit einer Genauigkeit von 0,01 mm erfasst. Die Messpunkte wurden durch Feingewindeschrauben mit Aussensechskant realisiert. Sie wurden mit einem Randabstand von 25 mm in die Platten eingeschraubt. Dabei wurden die Deckschichten nicht durchstossen, um jeglichen Einfluss auf die Messung ausschliessen zu können. Die Schraubenköpfe dienten als Kontaktpunkte für die Anschläge, wie auch für die Messuhren. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3.3 dargestellt. Von der Erfassung der Messdaten direkt an den Prüfkörperschmalflächen wurde aus zwei Gründen abgesehen. Zum einen konnten auf diese Weise Messfehler, bedingt durch das unterschiedliche Quellverhalten von z.B. Früh- und Spätholz vermieden werden und zum anderen war es möglich eine unendlich grosse Platte simulieren zu können. Dies wurde angestrebt, damit die Messungen zu Beginn des Versuches nicht dem Randeinfluss der Prüfkörperplatten unterlagen, wodurch auf Grund der schnelleren Feuchteaufnahme am Plattenrand ein, für die Gesamtbetrachtung der Prüfkörper, nicht repräsentativer Verlauf der Quellwerte entstanden wäre. Der Randeinfluss an einem Prüfkörper mit dicker Klebstoffuge ist in Bild 3.4 dargestellt.

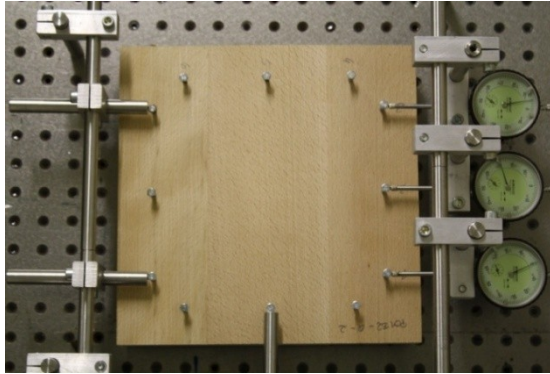


Bild 3.3: Versuchsaufbau der freien Quellung



Bild 3.4: Deutlich erkennbarer Randeinfluss bei dicke Klebfuge

Die Platten lagerten zum Zeitpunkt der Messungen auf drei Punkten. Dadurch konnte selbst bei Plattenverzug eine stabile Lagerung der Platten im Versuchsaufbau gewährleistet werden.

Damit neben den absoluten Werten auch Aussagen zum relativen Quellmass der Prüfkörper getroffen werden konnten, wurden zu Beginn die absoluten Abstände der Schrauben, sowie die jeweiligen Ausgangswerte der Messuhren erfasst. Vor dem Versuchsbeginn wurde der Prüfstand kalibriert, d.h. die Messuhren wurden unter Verwendung einer Kalibrierplatte mit 200 mm Kantenlänge genullt.

Mittels Gleichung (5) war es möglich das relative Quellmass zu errechnen.

$$Q = \frac{x_t - x_0}{l_0} \cdot 100 \quad (5)$$

Q relatives Quellmass [%]

x_0 Anfangswert der Messuhren [mm]

x_t Wert der Messuhren zum Zeitpunkt t [mm]

l_0 Anfangsabstand der Schrauben [mm]

Die Masse jedes Prüfkörpers ist vor der Überführung der Prüfkörper ins Klima 20/85 dokumentiert worden, um nach Abschluss dieses Versuches Aussagen über die Holzfeuchte zum jeweiligen Zeitpunkt der Messungen treffen zu können.

3.3.2 Rissbildung

Zur Untersuchung der Rissentstehung/-entwicklung wurden je Plattenaufbau fünf Prüfkörper mit den Massen 100 x 100 mm angefertigt. Abweichend von den in *Herstellung der Prüfkörper* erläuterten Ausführungen, erfolgte die Herstellung der Prüfkörper für diese Untersuchung ohne Schmalflächenverklebungen innerhalb der einzelnen Schichten. Diese waren auf Grund der geringen Abmasse nicht notwendig. Zudem ist bei der Flächenpressung auf die Zugabe von Oberflächenwasser verzichtet worden, da das Holz zuvor im Feuchtklima 20/85 konditioniert wurde und somit eine ausreichende Substratfeuchte sichergestellt werden konnte.

Zur Durchführung der Prüfungen wurden die Prüfkörper ins Trockenklima 20/35 überführt. In diesem wurden sie bis zum Erreichen ihrer Ausgleichsfeuchte gelagert. Die Ausgleichsfeuchte wurde durch Wägen ausgewählter Prüfkörper in Anlehnung an DIN EN 13183-1 (2002) ermittelt. Sie galt als erreicht nachdem die Massenänderung zwischen zwei Wägungen (24 Stunden) maximal 0,1% betrug.

Delaminierungen der Klebstofffugen, sowie Rissbildungen im Holz sind vor allem zu Beginn des Versuchsdurchlaufes zu erwarten gewesen. Aus diesem Grund sind die Prüfkörper nach der Überführung in das Klima 20/35 zunächst in engeren Zeitintervallen untersucht worden. Auf diese Weise sind im Zuge der Auswertungen nicht nur Aussagen zur Dimension der entstandenen Risse machbar, sondern auch über deren Entwicklung. Erfasst wurden die Risslängen mit einer Genauigkeit von 1 mm mittels eines handelsüblichen Gliedermassstabes.

3.3.3 Eigenspannungen

Von jeder Variante der Plattenaufbauten wurden vier Platten mit den Abmessungen 250 x 250 mm zur Bestimmung der Spannungen gefertigt. Drei von ihnen sind vom

Ausgangsklima 20/35 ins Klima 20/85 überführt worden, wo sie sieben Tage lagerten bevor sie geprüft wurden. Der vierte Prüfkörper jedes Plattenaufbaus wurde vor Beginn der Lagerung untersucht, um schon vorhandene Spannungen ermitteln zu können. Auf diese Weise war es möglich nach Versuchsabschluss die Spannungen zu ermitteln, die ausschliesslich auf Grund des Klimawechsels auftraten.

Zur Bestimmung der entstandenen Eigenspannungen beim Klimawechsel der Prüfkörper wurde die Methode des Freischneidens angewandt. Um die zwischen den Plattenschichten entstehenden Eigenspannungen ermitteln zu können, mussten die Dehnung, sowie der Elastizitätsmodul (E-Modul) der einzelnen Plattenschichten bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Werte konnten unter Anwendung des Hook'schen Gesetzes (6) die Spannungen errechnet werden.

$$\sigma = \epsilon \cdot E \quad (6)$$

σ Spannung [MPa]

ϵ Dehnung [%]

E Elastizitätsmodul [MPa]

Von den Prüfkörpern wurde für die Messungen zunächst allseitig ein Randstreifen von 25 mm abgetrennt, so dass schliesslich Platten von 200 x 200 mm verblieben. Diese Platten wiederum wurden senkrecht zum Faserverlauf der Deckschichten in Streifen von ca. 19 mm Breite aufgetrennt. Aus jeder Platte erhielt man somit neun Streifen (Bild 3.5).

Von diesen Streifen wurde unter Anwendung des Linearmessgerätes der Firma Mitutoyo die Ausgangslänge der Deckschichten mit einer Genauigkeit von 1 µm erfasst. Anschliessend wurden die Plattenschichten nach dem in Abbildung 3.6 dargestellten Prinzip voneinander getrennt. Dabei verliefen die Sägeschnitte in der Mittellage, welche zur Ermittlung der Eigenspannungen nicht weiter genutzt wurde. Die Decklagen konnten dadurch vollständig erhalten werden.

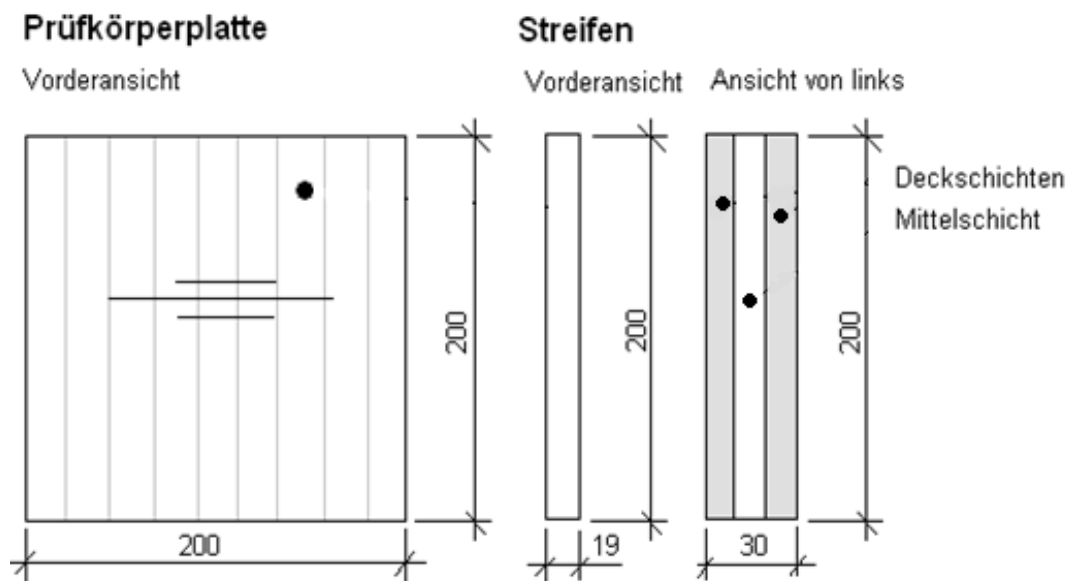


Bild 3.5: Schematische Darstellung zum Aufschneiden der Prüfkörperplatten zu Streifen (Quelle: modifiziert nach Schnider (2007), Seite 52)

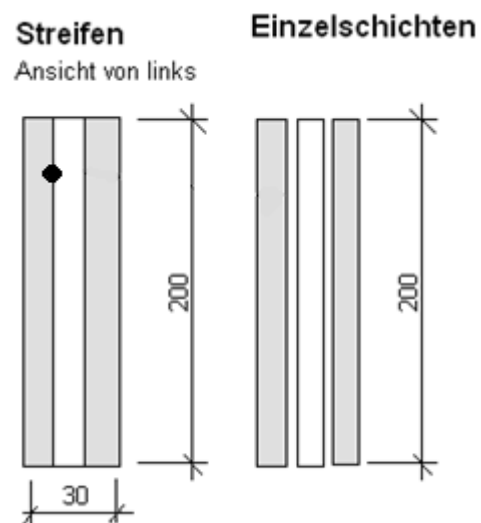


Bild 3.6: Schematische Darstellung der aufgetrennten Plattenschichten (Quelle: modifiziert nach Schnider (2007), Seite 53)

In einem weiteren Schritt wurden die entspannten einzelnen Schichten vermessen.

Durch Einsetzen der ermittelten Längen in Gleichung (7) konnte die Längenänderung bestimmt werden.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} \cdot 100 \quad (7)$$

ϵ	Dehnung [%]
Δl	Längenänderung [mm]
l_0	Ausgangsläng [mm]
l	Endlänge [mm]

Die Erfassung von Breite, Dicke und Masse der Streifen wurde für die Berechnung der Dichte nach Gleichung (8) genutzt. Die Dichte wiederum war für die Berechnung des E-Moduls nach Gleichung (9) erforderlich.

$$\rho = \frac{m}{V} \cdot 10^5 = \frac{m}{b \cdot d \cdot l} \cdot 10^5 \quad (8)$$

ρ	Dichte [kg/m ³]
m	Masse [g]
b	Breite [mm]
d	Dicke [mm]
l	Länge [mm]
V	Volumen [mm ³]

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{daraus folgt} \quad E = \rho \cdot c^2 \quad (9)$$

c	Schallgeschwindigkeit [m/s]
E	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
ρ	Dichte [kg/m ³]

Die zur Berechnung des E-Moduls benötigte Schallgeschwindigkeit wurde mit Hilfe des Ultraschallprüfgerätes Ultrasonic Tester BPV (Frequenz 50 kHz) der Firma Steinkamp ermittelt (Bild 3.7).

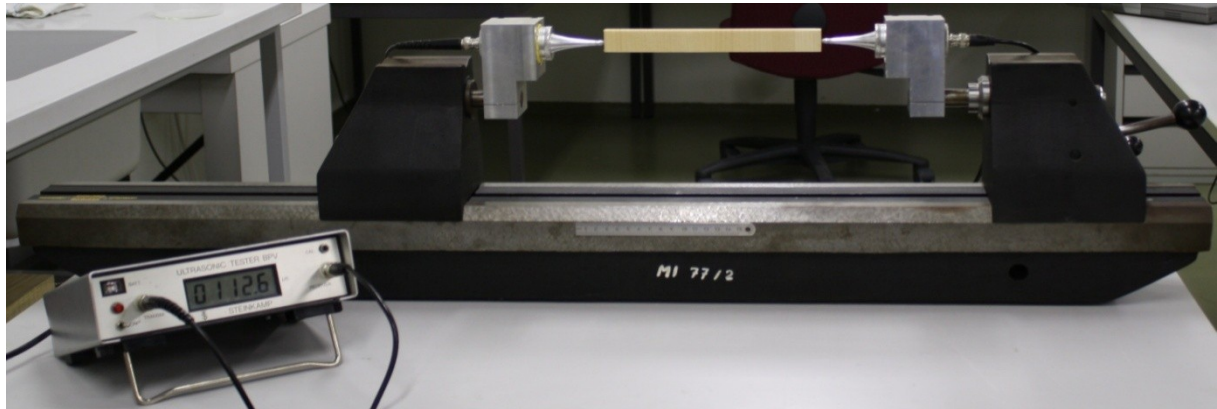


Bild 3.7: Ultraschallprüfgerät Ultrasonic Tester BPV

Der auf diesem Wege bestimmte E-Modul ist der dynamische E-Modul. Die erhaltenen Werte liegen dabei ca. 10% über jenen, die durch statische Messverfahren ermittelt würden. Der E-Modul gibt das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung im linear-elastischen Bereich an (siehe Bild 3.8) und beschreibt den Wert der Spannung, die notwendig ist um einen Stab auf das Doppelte seiner Ausgangslänge zu verlängern.

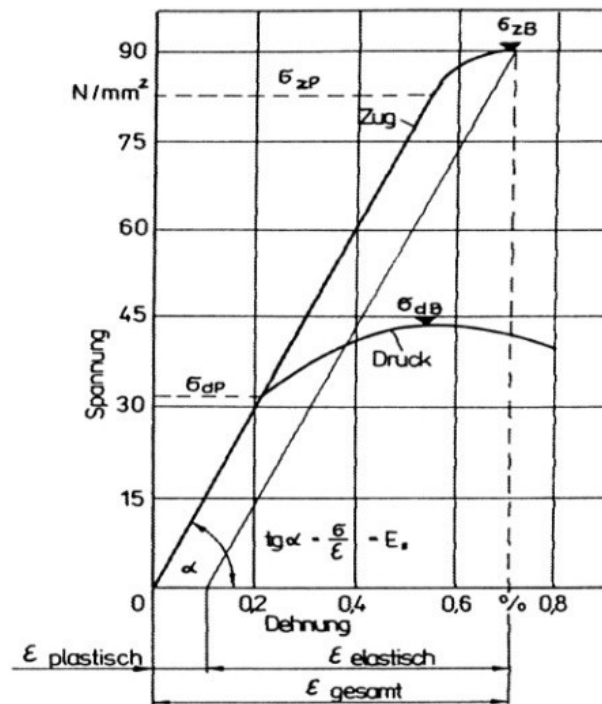


Bild 3.8: Spannungs-Dehnungsdiagramm von Holz (Quelle: Niemz (1993), Seite 147)

3.3.4 Optische Dehnungsmessung

Ziel dieses Versuches war es, die Dehnungen der Plattenschmalflächen bei Feuchteaufnahme der Prüfkörper zu visualisieren. Mittels VIC 2D, einer **V**ideo **I**mage **C**orrelation Software der Firma LIMEss, konnten anhand einer Kreuzkorrelation die Dehnungen/Verzerrungen sichtbar gemacht werden. Um Verzerrungen der Bildpunkte zu vermeiden, ist es erforderlich gewesen, dass die Kamera (Bild 3.9) genau senkrecht zum Prüfkörper ausgerichtet wurde. Ebenfalls um Verzerrungen der Bildpunkte bzw. des Speckle-Musters zu vermeiden, mussten die zu betrachtende Prüffläche, wie auch die untersuchten Verformungen eben sein. Ein Speckle-Muster ist ein schwarzes Punktemuster auf weißem Grund, das mit Hilfe eines Airbrush-Gerätes (Bild 3.10) auf die Prüfflächen aufgetragen wurde.

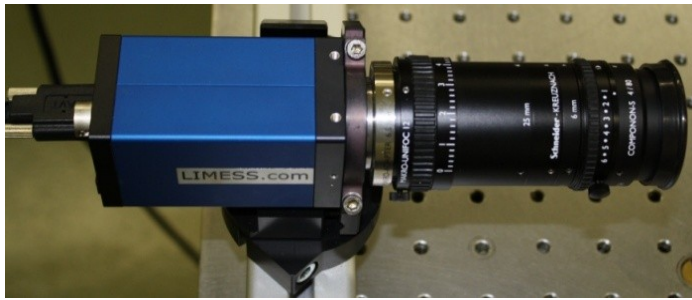


Bild 3.9: VIC 2D Kamera



Bild 3.10: Airbrush-Gerät

Damit die Software die aufgenommenen Bilder auswerten konnte war es wichtig, dass das Speckle-Muster möglichst homogen aufgetragen wurde. Bild 3.11 zeigt das Speckle-Muster eines untersuchten Prüfkörpers.



Bild 3.11: Speckle-Muster eines Prüfkörpers

Nachdem die Prüfkörper entsprechend vorbereitet wurden, sind sie in den in Bild 3.12 dargestellten Prüfstand eingelegt worden. Dieser befand sich im Feuchtklima 20/85.

Untersucht wurde von jedem Plattenaufbau (siehe Tab. 3.5) eine Platte mit den Abmessungen von 140 x 140 mm. Vor Beginn der Untersuchungen lagerten die Prüfkörper im Trockenklima 20/35. Ein Versuchsdurchlauf dauerte sieben Tage.

Die für die spätere Auswertung benötigten Bilder wurden in einem Zeitintervall von 15 Minuten aufgenommen. Zu Beginn des Versuches ist von jedem Prüfkörper ein Referenzbild erfasst worden. Anhand des Referenzbildes und der aufgenommenen Bilderserien, konnten durch die eingesetzte Software die Verschiebungen der Bildpunkte errechnet werden. Diese dienten der Visualisierung der Dehnungen/Verzerrungen, welche auf Grund der Quellung des Holzes entstanden.

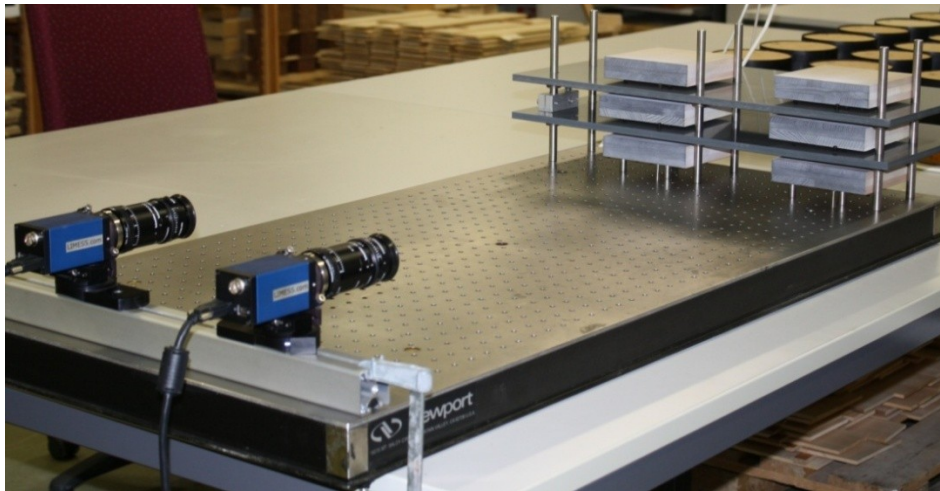


Bild 3.12: Aufbau des Prüfstandes zur Aufnahme der Prüfkörper mittels VIC 2D (links die beiden Kameras, rechts oben sechs der Prüfkörper)

Um Aussagen über die Feuchtaufnahme der Plattenaufbauten treffen zu können, wurde die Masse jedes Prüfkörpers vor der Überführung der Prüfkörper ins Klima 20/85 und nach Abschluss der Aufnahmen, sowie nach der anschließenden Darrtrocknung erfasst.

3.3.5 Künstliche Bewitterung

Die künstliche Bewitterung simuliert die natürliche Alterung der Prüfkörper. Dabei gilt, dass ein Monat künstliche Bewitterung etwa drei Monaten natürlicher Bewitterung entspricht (Schnider 2007). Eine direkte Korrelation zwischen künstlicher und natürlicher Bewitterung kann jedoch nicht erwartet werden, da bei der natürlichen Bewitterung Einflussfaktoren zum Tragen kommen, die durch die künstliche Bewitterung nicht nachgestellt werden können.

Für die Untersuchungen wurden von jedem Plattenaufbau zwei Prüfkörper mit den Massen 320 x 82 mm angefertigt. Um das Eindringen von Feuchtigkeit über die Schmalflächen der Prüfkörper zu verhindern, wurden diese allseitig mit Kunstharzlack versiegelt. Nach Konditionierung im Ausgangsklima 20/65, wurden die Prüfkör-

per in einem QUV Schnellbewitterungsgerät der Firma Q-LAB (Bild 3.13) künstlich bewittert, welches durch die SIKA Schweiz AG zur Verfügung gestellt wurde.

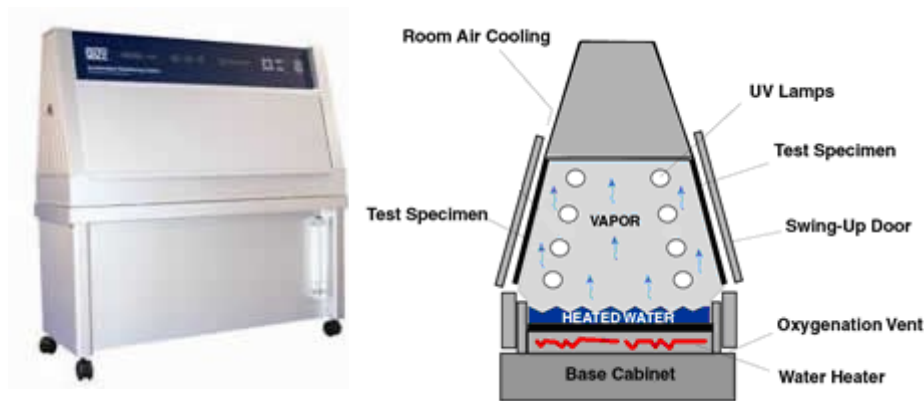


Bild 3.13: QUV Schnellbewitterungsgerät der Firma Q-LAB (rechts Modellbeispiel, links Schnittdarstellung der Prüfeinheit mit Detailbezeichnungen) (Quelle: www.q-lab.eu)

Bei allen Prüfkörpern ist eine Laubholzdeckschicht bewittert worden. Die Bewitterung wurde in Anlehnung an DIN EN 927-6 (2006) durchgeführt. Die genauen Parameter der in diesem Versuch durchlaufenen Bewitterung sind in Tab. 3.7 erfasst. Ein Zyklus, bestehend aus zwei Stufen, dauerte acht Stunden und wurde dreimal am Tag wiederholt.

Tab. 3.7: Parameter der angewandten künstlichen Bewitterung

Stufe	Funktion	Temperatur	Dauer	Bedingungen
1	UV-Bestrahlung	60 °C	6 h	simuliert das kurzwellige UV-Sonnenlicht Bereich: 295 bis 365 nm
2	Kondensation	50 °C	2 h	keine UV-Bestrahlung, 100% rel. Luftfeuchte mittels Heissdampf

Die Gesamtdauer der künstlichen Bewitterung betrug 672 Stunden bzw. vier Wochen.

Um im Zuge der Auswertungen Aussagen über die Entwicklung der jeweiligen Prüfkörperoberflächen während des Bewitterungsprozesses treffen zu können, wurden diese zu Beginn des Versuchsdurchlaufes, sowie nach jeweils sieben Tagen fotogra-

fiert. Zudem sind die Schmalflächen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten aufgenommen worden, um zusätzlich den Einfluss der künstlichen Bewitterung auf die Klebfugen zu erfassen und diesen in die Auswertungen einzubeziehen.

3.3.6 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit erfolgte nach der Darrmethode (DIN EN 13183-1 (2002)). Nach Bestimmung der Masse, wurden die Prüfkörper bis zum Erreichen der Massekonstanz bei 103°C im Trockenschrank gelagert. Nachdem sie im Exsikkator abgekühlt waren sind sie erneut gewogen worden. Anschliessend konnte die jeweilige Holzfeuchtigkeit nach Gleichung (10) berechnet werden.

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (10)$$

ω Holzfeuchte [%]

m_{ω} Masse des feuchten Holzes [g]

m_0 Masse des darrtrockenen Holzes [g]

3.4 Ergebnisse und Diskussion

3.4.1 Freie Quellung

In Tab. 3.8 sind die nach Abschluss des Versuches der freien Quellung erreichten Kennwerte der Prüfkörper aufgeführt. Dabei handelt es sich um die absolute Gewichtszunahme der Prüfkörper, den Holzfeuchteanstieg im Bezug auf die Gesamtmasse, sowie den Holzfeuchteanstieg im Bezug auf die reine Holzmasse der jeweiligen Plattenaufbauten. Auch sind die maximal erzielten Quellmasse der Prüfkörper aufgeführt.

Tab. 3.8: Im Versuch der freien Quellung erreichte Kennwerte dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau

Platten- aufbau	Ge- wichtszu- nahme [g]	Holz- feuch- teanstieg im Bezug auf ge- samte Platte [%]	Holz- feuch- teanstieg im Bezug auf reine Holzmas- se [%]	Maximales Quellmass [%]			
				radial		longitudinal	
				LH	NH	LH	NH
P01B3	52,12	4,20	4,24	0,08		0,08	
P01B2	46,99	4,32	4,38	0,12		0,00	
P01B1	34,65	3,80	3,86	0,69	-0,63	0,13	0,09
P01E1	35,30	4,24	4,31	0,25	-0,12	0,20	-0,10
S01B3	54,76	4,25	4,31	0,24		0,09	
S01B2	49,81	4,58	4,65	0,21		0,07	
S01B1	40,18	4,18	4,25	0,43	-0,42	0,17	-0,17
S01E1	34,97	4,01	4,09	0,28	-0,43	0,02	-0,02
S1B3	52,39	3,72	4,20	0,59		0,03	
S1B2	43,83	3,64	4,19	0,53		0,05	
S1B1	39,08	3,76	4,44	0,89	-0,37	0,03	-0,02
S1E1	37,76	3,90	4,67	0,49	-0,04	0,04	-0,05
S2B3	46,80	3,05	3,85	0,80		0,01	
S2B2	45,05	3,22	4,17	0,72		0,01	
S2B1	38,25	3,17	4,32	0,74	0,25	0,08	0,04
S2E1	35,40	3,18	4,46	0,56	0,14	0,08	0,04

Die negativen Quellmasse des Nadelholzes (NH) in radialer wie longitudinaler Richtung sind mit dem Plattenverzug zu erklären, welcher bei den entsprechenden Prüfkörpern auftrat. Ausgenommen die Prüfkörper mit 2 mm dicker Klebstoffuge, haben sich alle übrigen Plattenaufbauten mit Nadelholzdeckschicht (B1, E1; Klebfugendicke 0,1 mm, 1 mm) verformt. Auf Grund der Verfälschungen der tatsächlichen Quellwerte des Holzes durch den Plattenverzug, können die erfassten Werte dieser Plattenaufbauten nicht zum Vergleich mit den Quellwerten der übrigen Prüfkörper herangezogen werden.

gen werden. Aussagen zum Einfluss der Klebstoffugendicke auf das Quellverhalten der Deckschichten der verzogenen Prüfkörper können dennoch getroffen werden. Es ist zu erkennen, dass sich die Beträge der Quellmasse der Laubholzdeckschichten und die der Nadelholzdeckschichten nur geringfügig unterscheiden. Daraus kann geschlossen werden, dass auf Grund der starren Klebstoffuge, die durch die Quellung der einzelnen Deckschichten entstehenden Spannungen über die Mittelschicht aufeinander übertragen werden und sich dadurch gegeneinander stark beeinflussen. Der abweichende Wert der Nadelholzdeckschicht des Plattenaufbaus Esche/Fichte/Fichte (E1) mit 0,1 mm SikaBond®-T52FC Klebstoffuge in radialer Richtung ist mit Ausreissern eines Messpunktes zu erklären, welche den aufgeführten Mittelwert stark negativ beeinflussen. Durch Nichtberücksichtigung der Werte dieses Messpunktes zur Errechnung des arithmetischen Mittels, wird ein mittlerer Quellwert von -0,33% erreicht.

Die Beträge der radialen Quellmasse der Laubholzdeckschichten und Nadelholzdeckschichten bei den 1 mm dicken Klebstoffugen unterscheiden sich deutlich voneinander. Anhand der grossen Quellmasse der Laubholzdeckschichten und der geringen negativen Quellwerte der Nadelhölzer ist festzustellen, dass die dicke Klebstoffuge in der Lage ist, die Spannungen, welche durch das Quellen des Holzes entstehen, bis zu einem gewissen Masse aufzunehmen. Noch deutlicher wird dies bei der 2 mm dicken Klebstoffuge, bei welcher auch die Nadelholzdeckschichten positive Quellmasse aufweisen. Zudem ist erkennbar, dass die Quellwerte der Prüfkörper mit PURWELD 1302 unter denen der Prüfkörper des Klebstoffes SikaBond®-T52FC liegen. Dies verdeutlicht, dass durch den Einsatz des elastischen Klebstoffes SikaBond®-T52FC, auf Grund des wesentlich geringeren E-Moduls im Bezug auf den Klebstoff PURWELD 1302, ein wesentlich geringerer Absperreffekt der Deckschichten erreicht wurde. Eine weitere Abschwächung des Absperreffektes konnte durch die Verklebung der Prüfkörper mit dicken SikaBond®-T52FC Klebstoffugen erzielt werden. Ersichtlich wird dies an den, mit der Dicke der Klebstoffuge ansteigenden Quellwerten der Deckschichten.

Die Ausgleichsfeuchte der Prüfkörper wurde bis zum Abschluss des Versuches nicht erreicht. Bei Betrachtung der Gewichtszunahme und des daraus abzuleitenden Holzfeuchteanstieges kann festgestellt werden, dass mit steigender Klebstofffugendicke der prozentuale Holzfeuchteanstieg im Bezug auf die Gesamtmasse der Prüfkörper abnahm. Die absolute Gewichtszunahme hingegen ist bei allen Prüfkörpern in annähernd dem selben Bereich vorzufinden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass mit steigender Klebstofffugendicke die Masse auf Grund des erfolgten Klebstoffauftrages zunahm, nicht aber das Absorptionsvermögen der Prüfkörper, da der Holzanteil genau dem der Prüfkörper mit dünnen Fugen entsprach. Zudem wird die ermittelte Holzfeuchte dadurch beeinflusst, dass diese nicht direkt in den entsprechenden Schichten erfasst wurde, sondern durch das Darrverfahren bestimmt worden ist und somit das Gewicht des Klebstoffes mit einbezogen wurde. Um den Einfluss der Klebstofffugen auf das Diffusionsverhalten der Prüfkörper zu untersuchen, ist zudem der Holzfeuchteanstieg im Bezug auf die reine Holzmasse errechnet worden. Anhand der erlangten Werte ist kein signifikanter Einfluss des Klebstoffes bzw. der Klebstofffugendicke auf die Diffusion zu erkennen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Schmalflächen der Prüfkörper nicht isoliert wurden, wodurch die Mittelschichten auch über diese Feuchtigkeit aufnehmen konnten. Generell geltende Aussagen zum Einfluss der Klebstofffugen auf das Diffusionsverhalten der untersuchten Plattenaufbauten können somit nicht getroffen werden.

Die erfassten Längenänderungen in longitudinaler Richtung der Deckschichten lagen zum Teil im Bereich des Messfehlers, weswegen eindeutige Aussagen zum Einfluss der Plattenaufbauten nicht getroffen werden können.

3.4.2 Rissbildung

Die durch die Schwindbewegungen des Holzes auf die Klebstofffugen wirkenden Spannungen, überstiegen die Bruchspannungen der dünnen Klebstofffugen des Klebstoffes SikaBond®-T52FC, wodurch es zum Spannungsabbau durch Rissbildungen/Delaminierungen kam. Die Klebstofffugen des Klebstoffes PURWELD 1302 hin-

gegen konnten die auftretenden Spannungen aufnehmen. Dies kann auf die hohe Festigkeit des Klebstoffes zurückgeführt werden.

In Bild 3.15 und Bild 3.16 sind die Entwicklungen der Risse aller Plattenaufbauten innerhalb der dünnen Klebfugen (0,1 mm) des Klebstoffes SikaBond®-T52FC senkrecht (Bild 3.15) wie auch parallel (Bild 3.16) zum Faserverlauf der Deckschichten dargestellt (Zuordnung der Klebstofffugen siehe Bild 3.14).

Auf die Veranschaulichung der Rissentwicklungen der übrigen Prüfkörper ist verzichtet worden, um die markanten Plattenaufbauten dieses Versuches genauer darstellen zu können. Die Werte der übrigen Prüfkörper belaufen sich auf kleiner gleich zwölf Prozent.

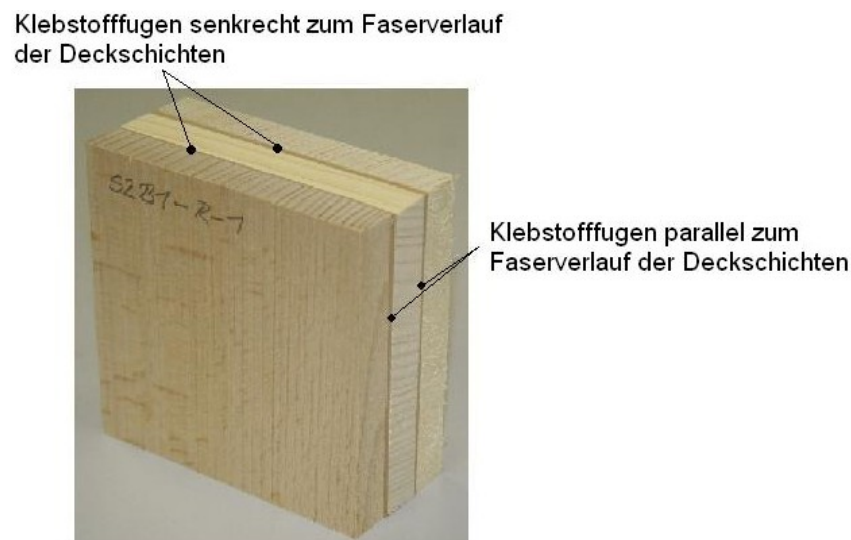


Bild 3.14: Prüfkörper des Versuches Rissbildung zur Veranschaulichung der Klebstofffugenzuordnung

Die in Bild 3.15 und Bild 3.16 dargestellten Werte beschreiben die Summe aller Risslängen in Prozent, bezogen auf die Gesamtlänge der entsprechenden Klebstofffugen. Dabei wurde von den fünf Prüfkörpern jedes Plattenaufbaues das arithmetische Mittel gebildet.

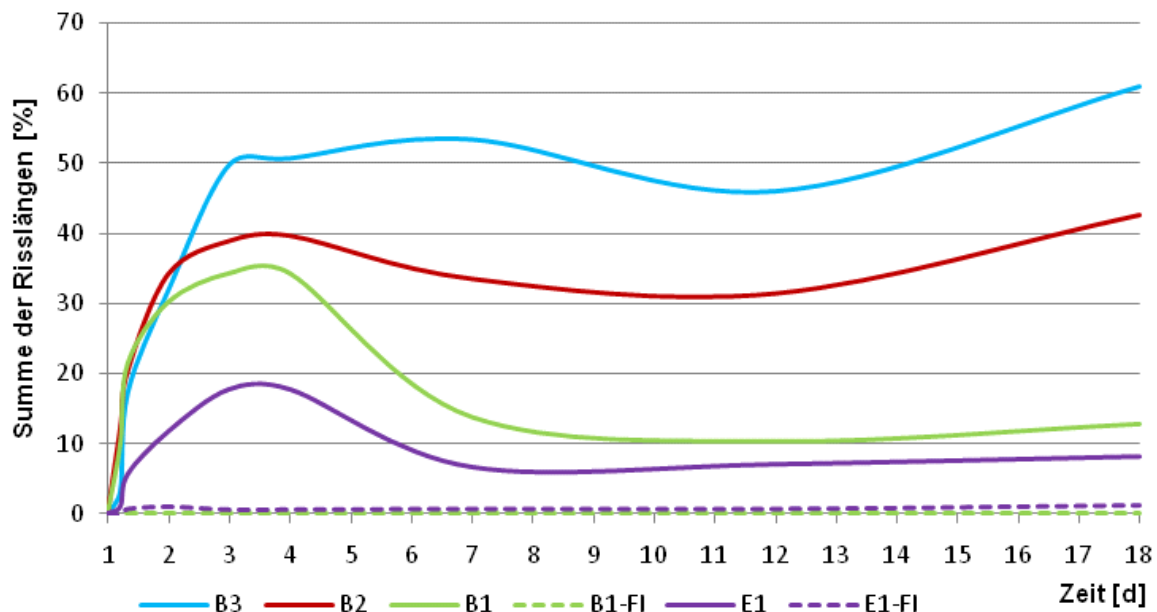


Bild 3.15: Risswachstum in den Klebstofffugen senkrecht zum Faserverlauf der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach der Überführung vom Feuchtklima 20/85 ins Trockenklima 20/35; mittlere Summe der Risslängen in Prozent, bezogen auf die Klebstofffugenlänge der Prüfkörper mit 0,1mm SikaBond®-T52FC- Klebstoffuge (gesondert betrachtet nach Klebfugen zwischen Laubholzdeckschicht/Mittelschicht und Nadelholzdeckschicht/Mittelschicht (-FI))

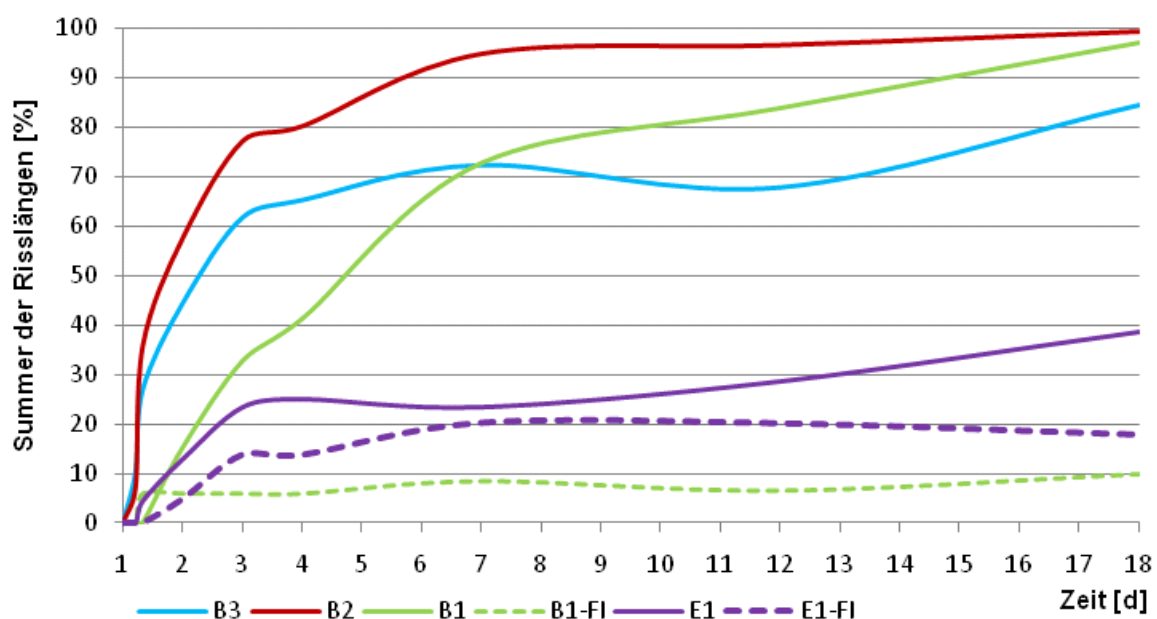


Bild 3.16: Risswachstum in den Klebstofffugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach der Überführung vom Feuchtklima 20/85 ins Trockenklima 20/35; mittlere Summe der Risslängen in Prozent, bezogen auf die Klebstofffugenlänge der Prüfkörper mit 0,1mm SikaBond®-T52FC- Klebstoffuge (gesondert betrachtet nach Klebfugen zwischen Laubholzdeckschicht/Mittelschicht und Nadelholzdeckschicht/Mittelschicht (-FI))

Es zeigte sich, dass bereits fünf Stunden nach der Überführung der Prüfkörper vom Feuchtklima 20/85 ins Trockenklima 20/35 erste Risse bzw. Delaminierungen entstanden. Spätestens nach acht Stunden wiesen alle Prüfkörper, bei denen nach Beendigung des Versuches Delaminierungen zu verzeichnen waren, erste Defekte in den Klebstoffugen auf. Während des folgenden Verlaufes der Rissentwicklungen wurden wesentliche Unterschiede zwischen den jeweiligen Plattenaufbauten deutlich. Generell war festzustellen, dass in den Fugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten die grösseren Delaminierungen entstanden sind.

Betrachtet man die Kurvenverläufe senkrecht zum Faserverlauf in Bild 3.15, so ist ersichtlich, dass in den Klebstoffugen entlang der Nadelholzholzdeckschichten (-FI) wesentlich weniger Risse entstanden (kleiner gleich 1,2%), als es bei denen entlang der Deckschichten aus Laubholz der Fall war. Dies kann auf die höheren Schwindmasse der Laubhölzer in axialer Richtung zurückgeführt werden. Zudem zeigte sich ein deutlicher Einfluss des verwendeten Laubholzes auf die weitere Rissentwicklung. Während der Verlauf des Plattenaufbaues Esche/Fichte/Fichte (E1) bereits nach mehreren Stunden abflachte, nahmen die Risslängen der Prüfkörper mit Buchenholzdeckschichten (B1...B3) bis zum zweiten Tag konstant zu. Ab dem zweiten Tag ist bei diesen zudem der Einfluss des Plattenaufbaues ersichtlich gewesen. Mit steigendem Buchenholzanteil, stieg auch die Summe der entstandenen Risse. Von Tag vier bis Tag zwölf schlossen sich die bereits entstandenen Risse wieder und haben sich gegen Ende des Versuches zum Teil wieder geöffnet. Dies ist durch den in den Prüfkörpern entstandenen Feuchtegradienten zu erklären. Durch das allmähliche Ausgleichen der Holzfeuchte über den gesamten Prüfkörperquerschnitt entstand innerhalb des Holzgefüges eine Spannungsumkehr, wodurch auch die Verwerfungen der einzelnen Schichten umgekehrt wurden. Während sich die Klebstoffugen der Plattenaufbauten Buche/Fichte/Fichte (B1) und E1 dabei nur geringfügig nochmals öffneten, entstanden bei den Aufbauten Buche/Fichte/Buche (B2) und Buche/Buche/Buche (B3) zusätzlich neue Risse bzw. Delaminierungen.

In Bild 3.16 ist zu Versuchsbeginn ein ähnlicher Trend zu erkennen wie in Bild 3.15. Auch die Klebstofffugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten delaminierten zwischen den Laubholzdeckschichten und den zugehörigen Mittelschichten am stärksten, wobei die Plattenaufbauten mit Buchenholz deutlich mehr Risse aufwiesen als jene mit Eschenholz. Zu erklären sind die Delaminierungen mit den deutlich voneinander abweichenden Schwindmassen der Hölzer in den jeweiligen Schnittrichtungen, wodurch in den Klebfugen der kreuzweise verklebten Prüfkörper Spannungen entstanden. In den Klebfugen entlang der Nadelholzdeckschichten sind diese geringer ausgefallen, da auch die radialen Schwindmasse der Fichte geringer sind als jene der Laubhölzer Buche und Esche. Bei den Laubhölzern besitzt die Buche ein grösseres Schwindmass als die Esche (vgl. Tab. 3.1). Die höchste Rissentwicklung in den Klebstofffugen war dabei stets bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte der Randzonen der Prüfkörper zu erwarten gewesen. Auf Grund der spezifischen Eigenschaften der eingesetzten Holzarten, ist die Ausgleichsfeuchte je nach Plattenaufbau früher oder später erreicht worden. Einflussfaktoren sind vor allem die Schichtdicken der einzelnen Holzarten. Aber auch die Dichte und die Porigkeit des Holzes, sowie die Grösse der Gefässe spielen eine Rolle bei der Feuchtigkeitsabgabe.

Der Plattenaufbau B2 besitzt die steilste Entwicklung der Rissbildung und weist auch nach Beendigung des Versuches die höchsten Werte auf. Die Prüfkörper des Plattenaufbaus B3 weisen zu Beginn einen steilen Risslängenzuwachs auf, welcher sich bis zum Tag sieben immer weiter abflacht. Von Tag sieben bis Tag zwölf waren die Risslängen zunächst wieder rückläufig und sind gegen Ende des Versuches wieder gleichmässig angestiegen. Der Plattenaufbau B1 besitzt einen kontinuierlichen Risslängenzuwachs bis zum siebten Tag, welcher sich bis zum Ende des Versuches weniger steil fortsetzt.

Es ist die Tendenz zu erkennen, dass die Risslängen der Klebstofffugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten bis zur Beendigung des Versuches anwuchsen. Die Ausgleichsfeuchte der Prüfkörper war zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht worden. Die in Anlehnung an die DIN EN 13183-1 (2002) maximal zulässige Gewichtsab-

nahme von 0,1%, wurde zum Zeitpunkt der letzten Messung um 0,02 bis 0,09 Prozentpunkte überschritten.

3.4.3 Eigenspannungen

In Bild 3.17 sind die Eigenspannungen der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau dargestellt, welche nach siebentägiger Lagerung der Prüfkörper im Klima 20/85 durch die Methode des Freischneidens ermittelt wurden. Auf Grund der Plattenaufbauten wurden die Deckschichten der Prüfkörper in Decklage und Unterlage unterteilt. Die Decklage entsprach bei den Plattenaufbauten B1...B3 der Holzart Buche und bei den Plattenaufbauten E1 Esche. Die Unterlagen der Plattenaufbauten B2 und B3 waren ebenfalls aus Buche, die Unterlagen der Plattenaufbauten B1 und E1 bestanden aus Fichte.

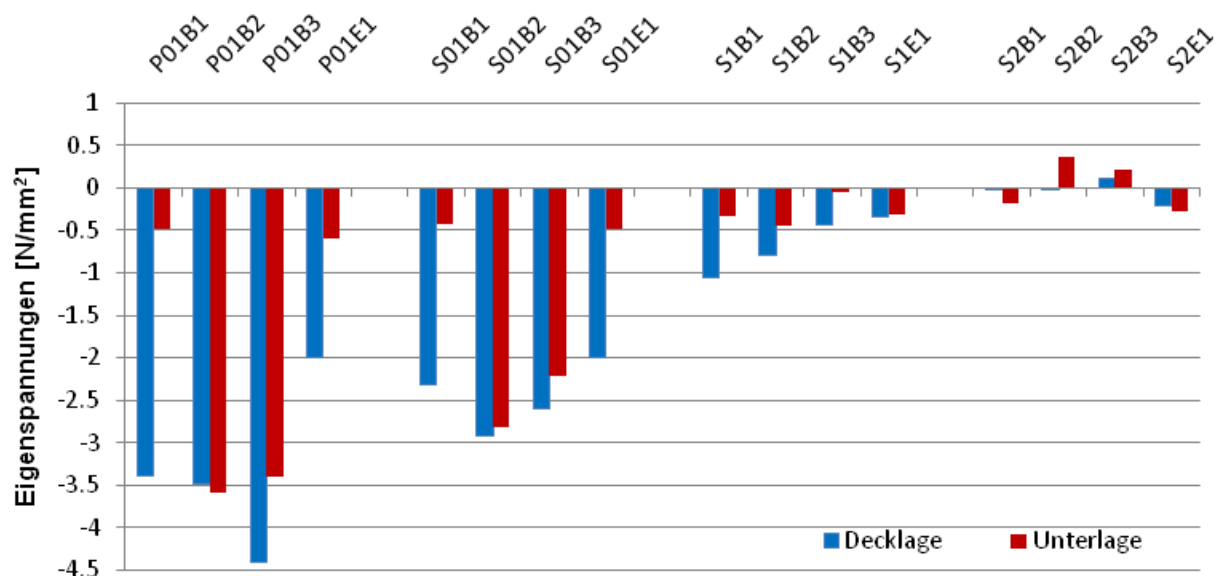


Bild 3.17: Vorhandene Eigenspannungen in den Decklagen und Unterlagen dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach siebentägiger Lagerung im Feuchtklima 20/85, Ausgangsklima: Trockenklima 20/35; Decklage: B1...B3 Buche, E1 Esche, Unterlage: B2...B3 Buche, B1 und E1 Fichte

Wie Bild 3.17 entnommen werden kann, entstanden in den Prüfkörpern in Folge der höheren Luftfeuchte und der damit verbundenen Quellung des Holzes Druckspan-

nungen. Ausnahme hierbei bildeten die Prüfkörper B2 und B3 mit 2 mm dicker Klebstofffuge. Druckspannungen entsprachen auf Grund des Plattenaufbaues den Erwartungen, da die Quellung der Deckschichten senkrecht zum Faserverlauf, auf Grund des Absperreffektes der Klebstofffugen, durch das geringere Quellmass der Mittellagen in longitudinaler Richtung behindert wurde. Sehr deutlich sind dabei der Einfluss des verwendeten Klebstoffes, sowie der Klebfugendicke zu erkennen. Die Prüfkörper des Klebstoffes PURWELD 1302, welcher ausgehärtet eine starre Klebstofffuge aufweist, erzielten erwartungsgemäss die grössten Spannungen. Des Weiteren ist ein deutlicher Unterschied der Spannungsentwicklungen zwischen den Holzarten ersichtlich. Buche, welche auf Grund ihres hohen Holzvolumenanteils das grösste Quellmass der verwendeten Holzarten aufweist, entwickelte die grössten Druckspannungen, gefolgt von Esche und Fichte. Bei den Prüfkörpern des Klebstoffes SikaBond®-T52FC ist tendenziell der gleiche Verlauf zu erkennen. Absolut gesehen liegen die entstandenen Spannungen der vergleichbaren Deckschichten dabei unter denen der Prüfkörper des Klebstoffes PURWELD 1302. Erklärt werden können die geringeren Spannungen mit dem geringeren E-Modul des SikaBond®-T52FC gegenüber PURWELD 1302. Durch den niedrigen E-Modul des Klebstoffes wurde den Deckschichten in ihren Quellbewegungen ein geringerer Widerstand entgegengebracht, wodurch geringere Spannungen im Holz aufgebaut wurden. Sehr deutlich kommt dieser Einfluss bei den Prüfkörpern mit 1 mm und mit 2 mm Klebstofffugen zur Geltung. Durch die dicken, elastischen Klebstofffugen konnten die Differenzen der Quellmasse der Deck- und der Mittelschichten kompensiert werden. Die vorhandenen Längenänderungen der Prüfkörper nach dem Auftrennen der Streifen waren dabei so gering, dass sie meist im Bereich der Messgenauigkeit der Prüfgeräte lagen, womit auch die zum Teil aufgetretenen Zugspannungen erklärt werden können.

Die mittlere Feuchtigkeitszunahme der Decklagen, sowie der Unterlagen betrug nach sieben Tagen 2,4%. Ein markantes Feuchteprofil innerhalb der Deckschichten über die Gesamtbreite der Prüfkörper hat sich auf Grund des geringen Feuchteanstieges nicht eingestellt. Resultierend aus dem gleichmässig verlaufenden Feuchteprofil, war

ebenfalls eine gleichmässige Spannungsverteilung über die Plattenbreite innerhalb der einzelnen Deckschichten zu erwarten. Diese Annahme konnte durch die Versuchsergebnisse bestätigt werden.

3.4.4 Optische Dehnungsmessung

Mit Hilfe der Software VIC 2D konnten die an den Prüfkörpern entstandenen Dehnungen bestimmt werden. Dabei wurde zwischen Dehnungen in horizontaler (x -) Richtung (e_{xx}) und vertikaler (y -) Richtung (e_{yy}) unterschieden.

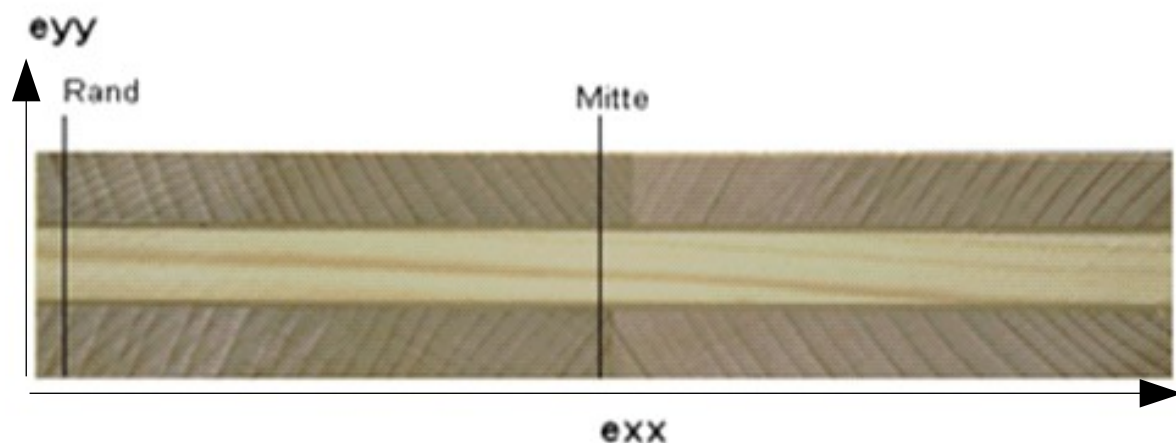


Bild 3.18: Ansicht einer geprüften Schmalfläche mit Definition der Dehnungsrichtungen und Angabe der zur Auswertung genutzten Bereiche

Wie in Bild 3.18 zu erkennen ist, wurden die Dehnungen an einer Prüfkörperschmalfläche bestimmt, welche in den Decklagen Hirnholz aufwies. Auf Grund der beschleunigten Feuchtigkeitsaufnahme über das Hirnholz der Deckschichten kann die ermittelte Dehnungsentwicklung nicht als repräsentativ für den gesamten Prüfkörperquerschnitt betrachtet werden. Im Prüfkörperinneren sind geringere Dehnungen zu erwarten, da die absoluten Quellwerte des Holzes an dieser Stelle auf Grund des geringeren Feuchtegehaltes weniger hoch ausgeprägt sind. Die mittlere Feuchtigkeitszunahme der Prüfkörper während der siebentägigen Untersuchung im Feuchtklima 20/85 betrug 2,9%. Bestimmt wurde der Feuchtigkeitsgehalt der Prüfkörper durch die Darrmethode nach Abschluss der Untersuchungen.

In Bild 3.19 ist der Verlauf der Dehnungsentwicklung der Prüfkörper während des Untersuchungszeitraumes am Beispiel eines Prüfkörpers mit 0,1 mm dicker PURWELD 1302 Klebstofffuge in y-Richtung dargestellt. Wie dieser Abbildung entnommen werden kann, stiegen die Dehnungen zu Beginn der Untersuchungen sehr steil an und änderten sich im weiteren Verlauf nur noch geringfügig. Die grössten Dehnungen waren während des ersten Tages zu verzeichnen.

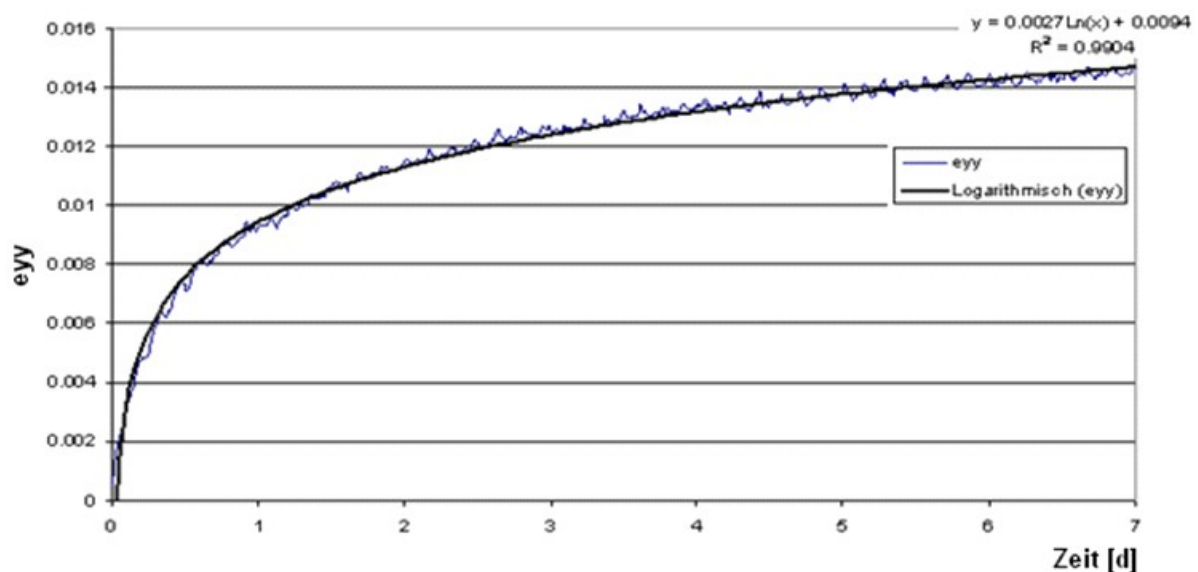


Bild 3.19: Verlauf der Dehnungsentwicklung in ϵ_{yy} -Richtung dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau über den Prüfzeitraum von sieben Tagen im Feuchtklima 20/85 nach Überführung vom Trockenklima 20/35 am Beispiel eines Prüfkörpers mit 0,1 mm dicker PURWELD 1302 Klebstofffuge.

In x-Richtung waren deutliche Unterschiede zwischen den Dehnungen des Randbereiches der Deckschichten und des Platteninneren der Deckschichten zu erkennen. Die grössten Dehnungen waren in den unmittelbaren Randbereichen festzustellen und nahmen mit steigender Entfernung zum Plattenrand rasch ab. In Bild 3.20 ist die mit VIC 2D visualisierte Dehnungsverteilung eines Prüfkörpers mit 0,1 mm PURWELD 1302 Klebstofffuge über den gesamten Prüfkörperquerschnitt nach dreitägiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 dargestellt.

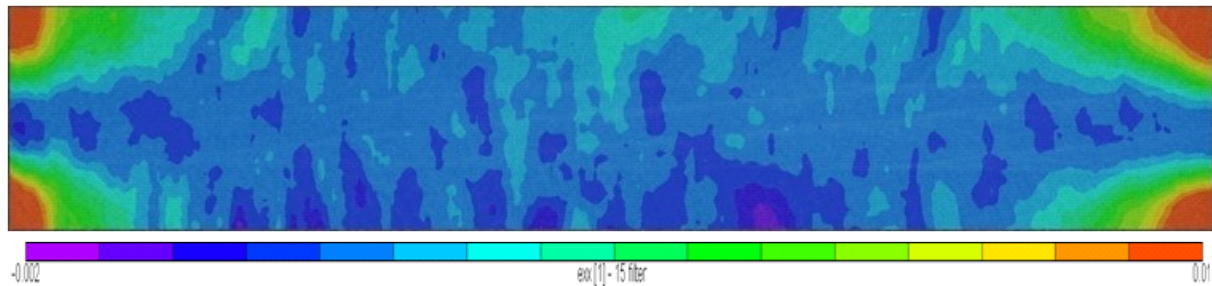


Bild 3.20: Berechnete Dehnungen in ϵ_{xx} -Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach dreitägiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Buche/Buche mit 0,1 mm PURWELD 1302 Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35

Die erfasste Dehnungsverteilung ist damit zu begründen, dass mit wachsender Entfernung vom Prüfkörper Rand die Behinderung der Quellsbewegungen der Deckschichten in x-Richtung durch die Mittelschicht zunahm. Betrachtet man die Verteilung der Dehnungen über den Probenquerschnitt, so kann der gegenseitig wirkende Einfluss der Deck- und Mittelschichten aufeinander erkannt werden. In nahen Bereichen der Klebstofffugen am Rand der Prüfkörper wurden die Dehnungen der Deckschichten auf Grund des geringeren Quellmasses der Mittelschichten behindert und die Dehnungen der Mittelschichten gleichzeitig durch das grössere Quellmass der Deckschichten erhöht.

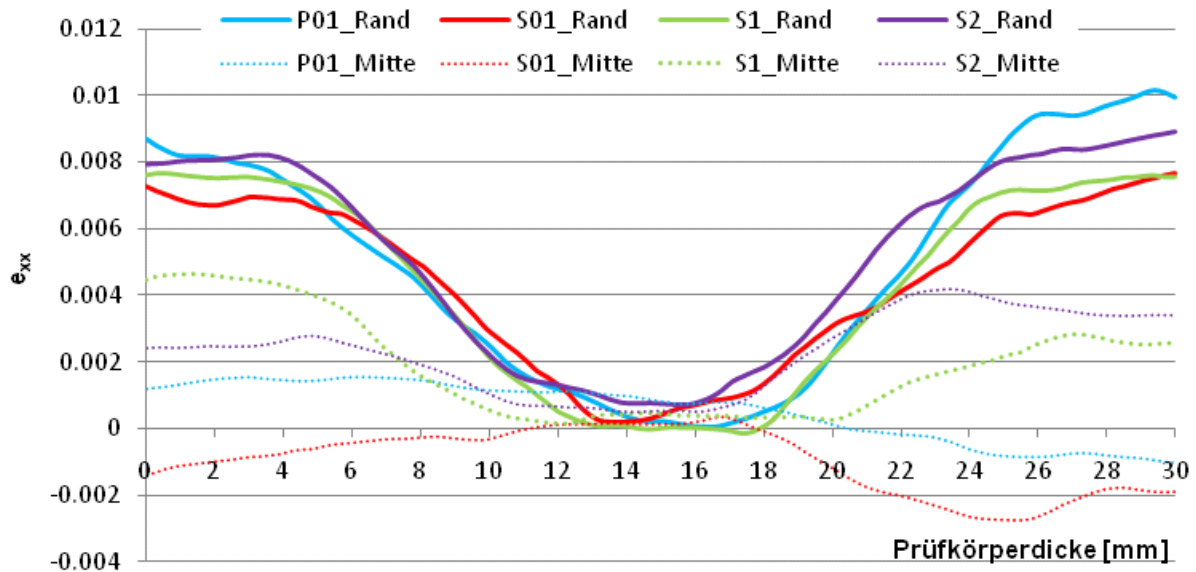


Bild 3.21: Verlauf der mittleren Dehnungen in exx-Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau drei Tage nach der Überführung vom Trockenklima 20/35 ins Feuchtklima 20/85; erfasst am Rand und in der Mitte der Prüfkörper (siehe Bild 3.18)

Die in Bild 3.21 dargestellten mittleren Dehnungsverläufe in x-Richtung der Prüfkörper verdeutlichen den Einfluss der Klebstofffugendicke auf die Quellwerte der Deckschichten. Dabei wird ersichtlich, dass die Klebstofffugendicke am Rand der Prüfkörper keine markante Auswirkung auf die Dehnungen der Plattenschichten ausübt. Im mittleren Messbereich der Prüfkörper hingegen können Einflüsse der Klebstofffugen auf die Dehnungsentwicklung der Plattenaufbauten erkannt werden. Während die Deckschichten der Prüfkörper mit dünner Klebstoffuge (0,1 mm) nur sehr geringfügige Dehnungen aufweisen, sind die Prüfkörper mit dicker Klebstoffuge (1 mm bzw. 2 mm) in ihren Quellsbewegungen weniger gehindert und konnten dadurch grössere Werte erreichen.

In y-Richtung der Prüfkörper können deutliche Unterschiede zwischen den Dehnungen der Prüfkörper mit dünnen und mit dicken Klebstofffugen erkannt werden. In Bild 3.22 ist die mittels VIC 2D visualisierte Dehnungsverteilung in y-Richtung der Prüfkörper mit 0,1 mm Klebstoffuge am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte eines Prüfkörpers mit SikaBond®-T52FC Klebstoffuge dargestellt. Im Vergleich

dazu, zeigt Bild 3.23 die Dehnungsverteilung über die Prüfkörper mit 2 mm Klebstofffuge, ebenfalls am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte.

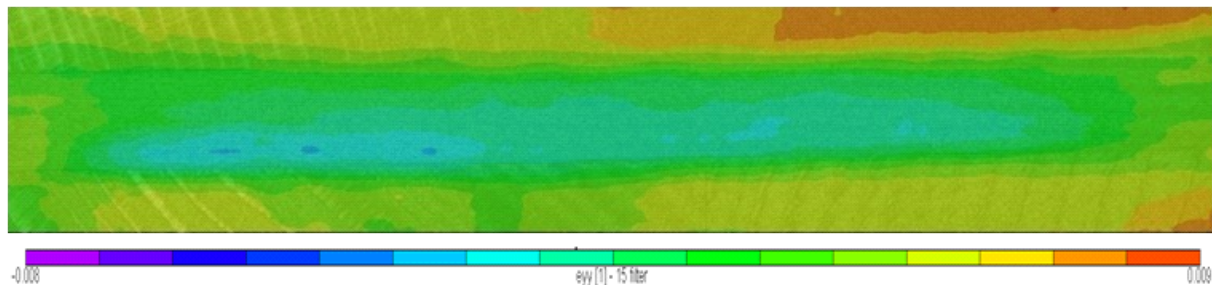


Bild 3.22: Berechnete Dehnungen in e_{yy} -Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach vierstündiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte mit 0,1 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35

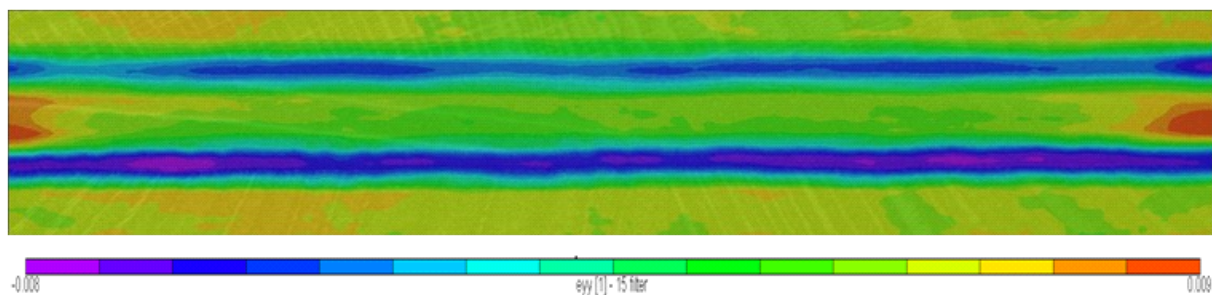


Bild 3.23: Berechnete Dehnungen in e_{yy} -Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach vierstündiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte mit 2 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35

Die negativen Dehnungen der dicken Klebstofffugen können mit deren Deformation auf Grund der Quellung und der gegebenenfalls auftretenden Verformung der Deckschichten in longitudinaler Richtung erklärt werden.

Während zwischen den Dehnungen der Deckschichten in e_{yy} -Richtung der Prüfkörper mit dünner und dicker Klebstofffuge nur sehr geringe Unterschiede festgestellt wer-

den können, bildet sich der Einfluss der Klebstofffugendicke bei der Dehnung der Mittelschichten deutlicher heraus. Im Falle der Prüfkörper mit dicker Klebstofffuge (Bild 3.23), ist, mit Ausnahme der direkten Randbereiche, eine gleichmässige Dehnungsverteilung über die Plattenbreite zu erkennen, während bei den Prüfkörpern mit dünner Klebstofffuge (Bild 3.22) eine Verringerung der Dehnungen vom Plattenrand zum Platteninneren zu verzeichnen ist. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die in den Deckschichten auftretenden Spannungen durch die Klebstofffuge auf die Mittelschichten übertragen wurden. Resultierend daraus unterlagen die Mittelschichten einer Querkontraktion, hervorgerufen durch die Dehnung der Decklagen in x-Richtung. Im Falle der dicken Klebstofffugen, konnte diese durch den elastischen Verbund kompensiert werden. Besonders deutlich wird dies in den Randbereichen der Prüfkörper, wo auf Grund der schnelleren Feuchtigkeitsaufnahme über das Hirnholz der Mittelschichten, die grössten Dehnungen zu verzeichnen sind. Die Mittelschichten der Prüfkörper mit dicken Klebstofffugen (vgl. Bild 3.23) konnten annähernd frei quellen. Die Prüfkörper mit dünnen Klebstofffugen (vgl. Bild 3.22) hingegen, wurden durch die horizontalen Dehnungen der Deckschichten, welche in den Randbereichen ebenfalls ihr Maximum besaßen (vgl. Bild 3.21), in ihren Dehnungen gehindert. Grund ist die bereits erwähnte Querkontraktion.

In Bild 3.24 sind die Werte der Falschfarbenbilder (Bild 3.22 und Bild 3.23) grafisch dargestellt.

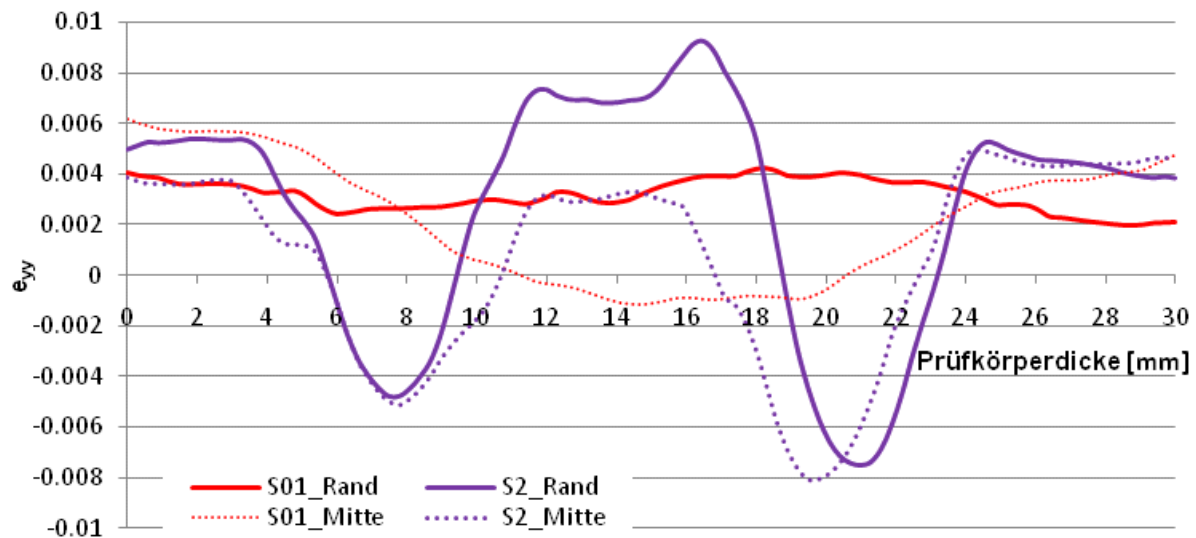


Bild 3.24: Berechnete Dehnungen in e_{yy} -Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach vierstündiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte mit 0,1 mm (S01) und 2 mm (S2) SikaBond®-T52FC Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35; erfasst am Rand und in der Mitte der Prüfkörper (siehe Abb. 4.5)

Sehr deutlich kann darin die geringere Dehnung der Mittelschicht der Prüfkörper mit dünner Klebstofffuge im Vergleich zu den zugehörigen Deckschichten im mittleren Messpunkt erkannt werden. Im Verlauf der Werte der Prüfkörper mit 2 mm Klebstofffuge, ist die markante Abzeichnung der Klebstofffugen zu erkennen.

3.4.5 Künstliche Bewitterung

Bereits nach sieben Tagen künstlicher Bewitterung waren an mehreren Prüfkörpern erste Haarrisse (siehe Bild 3.25a) im Holz der Deckschichten aufgetreten. Ein Zusammenhang mit den Klebfugendicken war dabei nicht festzustellen. Der Aufbau der Platten hinsichtlich der eingesetzten Hölzer hingegen, liess Zusammenhänge mit der Rissbildung deutlich werden. Besonders auffällig wurden nach sieben Tagen künstlicher Bewitterung die Plattenaufbauten aus der Holzkombination Buche und Fichte. Während die übrigen Plattenaufbauten nur vereinzelt Risse aufwiesen, besaßen diese Prüfkörper über die gesamte Prüffläche verteilt Haarrisse. Nach vierzehntägiger Prüfdauer wiesen lediglich vier der Prüfkörper mit 2 mm dicker Klebfuge in der bewit-

terten Decklage noch keine Risse auf. Dabei handelte es sich jeweils um einen Prüfkörper jedes Plattenaufbaus. Ebenfalls war die Grösse, wie auch die Anzahl der entstandenen Risse in den Decklagen der Prüfkörper mit dicken Klebstofffugen deutlich geringer, als bei jenen mit dünnen Klebstofffugen. Bei den dünnen Klebstofffugen konnten Unterschiede zwischen den verwendeten Klebstoffen ausgemacht werden. Die Prüfkörper, welche mit dem elastischen Klebstoff SikaBond®-T52FC hergestellt worden waren, wiesen viele, sehr feine Haarrisse (Bild 3.25a) auf. Bei den Prüfkörpern des Klebstoffes PURWELD 1302 waren wesentlich deutlichere Risse ausgebildet. An zwei Prüfkörpern entstanden über die gesamte Deckschicht verlaufende Risse, die dem Faserverlauf des Holzes folgten (Bild 3.25b). Die stärkere Rissentwicklung bei den Prüfkörpern, welche mit PURWELD 1302 verklebt worden waren, ist mit dem wesentlich höheren E-Modul des Klebstoffes gegenüber SikaBond®-T52FC zu erklären. Durch den hohen E-Modul wurden die Schwindbewegungen der Deckschichten stark behindert, weswegen grosse Spannungen entstanden, die schliesslich die Bruchspannungen des Holzes überstiegen und zu Rissen führten. In den Klebstofffugen des Klebstoffes SikaBond®-T52FC konnten die auftretenden Spannungen zu einem gewissen Anteil, auf Grund dessen hoher Elastizität, kompensiert werden, wodurch die Rissbildung in den Deckschichten positiv beeinflusst worden ist. Die geringste Rissentwicklung der Prüfkörper beider Klebstoffe wiesen die Plattenaufbauten mit Esche auf. An diesen waren nur sehr vereinzelt feine Haarrisse festzustellen, welche stets im Frühholz der Esche auftraten. Die geringe Rissbildung ist auf das geringere Schwindmass der Esche im Vergleich zur Buche zurückzuführen. Der Rissverlauf entlang des Frühholzes kann damit begründet werden, dass das ringporige Holzgefüge der Esche an dieser Stelle durch die grösseren Gefässe im Vergleich zum Spätholz eine geringere Festigkeit aufweist.



Bild 3.25: Während der künstlichen Bewitterung entstandene Risse in den Deckschichten am Beispiel von Buche a) feine Haarrisse, b) Ausschnitt eines grossen Risses

Die Rissentwicklung in den Decklagen aller Prüfkörperaufbauten war nach vierzehntägiger künstlicher Bewitterung bereits abgeschlossen. Durch die ausschliesslich visuelle Beurteilung der Prüfkörper, konnten nach diesem Zeitraum keine Veränderungen der bestehenden Risse oder gar neu entstandene Risse festgestellt werden.

Die Risse der Schmalflächen wurden digital, anhand der während des Versuchsdurchlaufes aufgenommenen Fotos vermessen. Die Entwicklung der Rissbildungen ist in Bild 3.26 dargestellt. Dabei wurden die Längen aller Risse aufsummiert und von den beiden Prüfkörpern jedes Plattenaufbaus das arithmetische Mittel gebildet. Auf Grund der geringen Klimaeinwirkungen in den Klebstoffugen zwischen der nichtbewitterten Deckschicht und der Mittelschicht, traten in diesen bei allen Prüfkörpern keine Risse/Delaminierungen auf, weswegen sie generell aus der Berechnung des arithmetischen Mittels ausgenommen wurden. In Bild 3.26 sind die Risslängen der Prüfkörper mit 0,1 mm Klebstoffuge beider Klebstoffe angeführt. Die Werte sind in Prozent, bezogen auf die Fugenlänge der Schmalflächen parallel zum Faserverlauf der bewitterten Deckschichten angegeben. Auf die Darstellung der Werte der dicken Klebstoffugen (1 mm und 2 mm) ist verzichtet worden, da bei diesen keine Risse bzw. Delaminierungen entstanden.

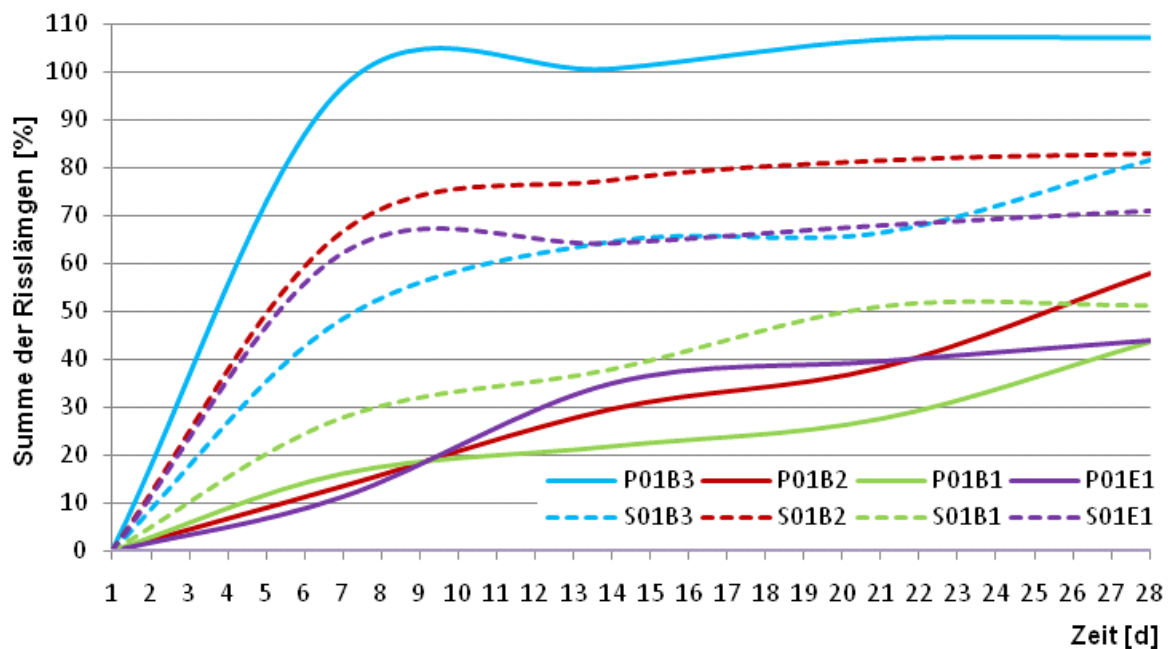


Bild 3.26: Risswachstum in den Klebstofffugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau unter Einfluss künstlicher Bewitterung; mittlere Summe der Risse in Prozent, bezogen auf die Klebstofffugenlänge der Prüfkörper mit 0,1 mm PURWELD 1302 Klebstofffuge und 0,1 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge zwischen künstlich bewitterter Deckschicht und Mittelschicht

Wie den Daten entnommen werden kann, sind bereits nach sieben Tagen künstlicher Bewitterung zum Teil erhebliche Rissbildungen in den Klebstofffugen parallel zu den bewitterten Deckschichten zu verzeichnen gewesen. Dabei kann zwischen den zur Verklebung genutzten Klebstoffen unterschieden werden. Die Risslängen der Prüfkörper des Klebstoffes PURWELD 1302 liegen mit Ausnahme des Plattenaufbaus Buche/Buche/Buche (B3) unter denen der Prüfkörper, welche mit SikaBond®-T52FC gefertigt wurden. Zudem sind bei den Klebstofffugen des elastischen Klebstoffes SikaBond®-T52FC Delaminierungen der Klebstofffugen aufgetreten (Bild 3.27 a) und bei den Fugen des Klebstoffes PURWELD 1302 sind die entstanden Risse zum Teil auf Holzbruch zurückzuführen (Bild 3.27 b). Auch dabei bildete der Plattenaufbau B3, welcher mit PURWELD 1302 verklebt worden war eine Ausnahme. Bei diesen Prüfkörpern sind ebenfalls ausschliesslich Delaminierungen der Klebstofffugen (vgl. Bild 3.27 a) aufgetreten. Eine Erklärung für das Versagen dieser Klebstofffugen kann u.a. darin gesucht werden, dass die durch die hohen Schwind-/ Quellwerte der Buche in-

nerhalb der Prüfkörper auftretenden Spannungen die Bruchfestigkeit des Klebstoffes überstiegen.

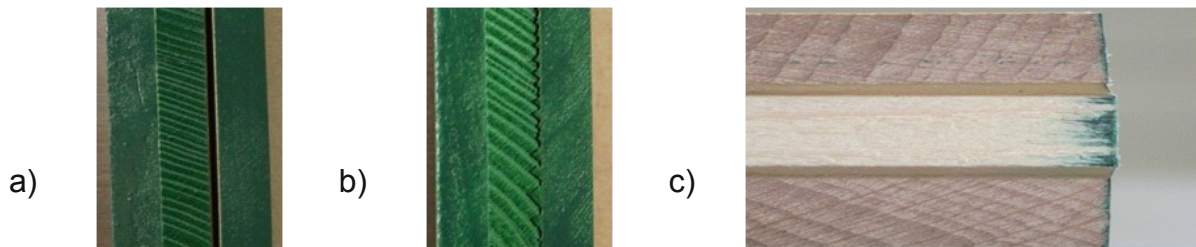


Bild 3.27: a) Delaminierung der Deckschicht; b) Rissbildung durch Holzbruch; c) Ausschnitt eines aufgetrennten Prüfkörpers mit dicker Klebstofffuge

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Klebstofffugen, welche Delaminierungen aufwiesen, zwischen dem 7. und dem 28. Tag der Versuchsdurchführung nur noch geringfügige Rissentwicklungen aufwiesen. Auf Grund der entstandenen Delaminierungen und des damit in den Randbereichen der Prüfkörper entfallenden, auf die Deckschichten wirkenden Absperreffektes der Klebstofffuge, konnten diese nahezu ungehindert quellen bzw. schwinden. Eine Ausnahme dabei bildete der Versuchsaufbau B1, bei dem bis zum Tag 21 ein kontinuierlicher Risslängenzuwachs verzeichnet werden konnte.

Die Risslängen der Prüfkörper, welche Holzbruch aufwiesen, sind zwischen dem 7. und dem 28. Tag weiterhin angewachsen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass durch die wechselnden hohen Quell- und Schwindbewegungen der Deckschichten, welche durch die Klebstofffuge auf die Mittelschicht übertragen wurden, hohe Spannungen in den Grenzschichten entstanden. Auf Grund der wechselnden Spannungsbeanspruchung (Druck und Zug) ist es durch die Überschreitung der Proportionalitätsgrenze schrittweise zu visko-elastischen bzw. plastischen Verformungen des Holzes gekommen, welche schliesslich zur Rissbildung entlang der Mittelschicht führten.

In Bild 3.27 c ist ein Ausschnitt eines aufgetrennten Prüfkörpers mit dicker Klebstofffuge abgebildet, in dem das Schwinden der Deckschichten veranschaulicht wird. Deutlich sind die, auf Grund ihrer höheren Schwindwerte im Vergleich zur Mittel-

schicht, zurückstehenden Deckschichten zu erkennen. Zudem kann in dieser Darstellung gesehen werden, dass die dicken Klebstofffugen des elastischen Klebstoffes Si-kaBond®-T52FC in der Lage sind die Schwindbewegungen der Deckschichten, sowie die daraus entstehenden Spannungen aufzunehmen, wodurch es zu keinerlei Delaminierungen kam.

Zum Teil unterlagen die Prüfkörper starken Deformationen. Diese traten grösstenteils in den bewitterten Deckschichten auf, nachdem die Klebstofffugen delaminiert waren (Bild 3.28 a). Des Weiteren sind Deformationen der gesamten Prüfkörper in Faser-richtung der Deckschichten aufgetreten, wie es in Bild 3.28 b dargestellt ist. Die Deformationen können dadurch erklärt werden, dass sich auf Grund des wechselnden Klimas ein Feuchteprofil über den Querschnitt der Prüfkörper bildete, wodurch Spannungen im Holz entstanden, die zu den Verwerfungen der Prüfkörper geführt haben.

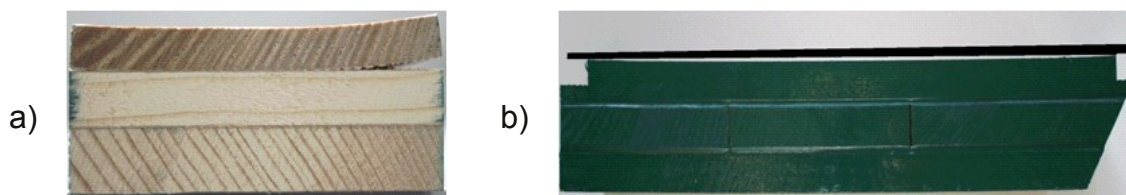


Bild 3.28: a) Deformation der bewitterten Deckschicht auf Grund von Delaminierungen; b) Deformation des Prüfkörpers längs zum Faserverlauf der Deckschichten

Die Betrachtung des Farbverlaufes der Deckschichten der Prüfkörper erfolgte optisch durch den Vergleich der während der künstlichen Bewitterung aufgenommenen Fotos. Anhand dieser war festzustellen, dass bis zum 7. Tag der wesentliche Teil der Verfärbungen stattgefunden hat. Zwischen Tag 7 und 28 ist nur noch eine geringe farbliche Veränderung der Oberflächen zu erkennen. Der Farbverlauf ist exemplarisch durch einen Prüfkörper mit Buche-Deckschicht in Bild 3.29 dargestellt. Wie in dieser Abbildung erkannt werden kann, ist das Holz im Zuge der künstlichen Bewitterung nicht vergraut. Dies ist auf den Einsatz des Kondensationsverfahrens zurückzuführen, das an Stelle des Sprühverfahrens zur Befeuchtung der Plattenaufbauten angewandt wurde (siehe *Künstliche Bewitterung*).



Bild 3.29: Entwicklung des Farbverlaufes einer Deckschicht aus Buche im Laufe der künstlichen Bewitterung unter Einsatz des Kondensationsverfahrens zur Befuchtung der Prüfkörper

3.5 Zusammenfassung

In diesem Teil der Arbeit wurde an verschiedenen Plattenaufbauten untersucht, ob die, durch den grösseren E-Modul und die höheren Quellmasse des Laubholzes im Vergleich zu Nadelhölzern, erhöhten feuchteinduzierten Spannungen durch Variation des Klebstoffes und der Fugendicke im bestimmten Masse kompensiert werden können. Dafür wurden dreischichtige Massivholzplatten durch Kombination der Holzarten Buche, Esche und Fichte gefertigt. Für die Verklebung wurden zwei 1K-PUR-Klebstoffe genutzt, welche sich in ihrer Viskosität und Festigkeit wesentlich unterschieden. Die Klebstofffugen wurden in den Dicken 0,1 mm, 1 mm und 2 mm ausgebildet.

Die auftretenden Spannungen innerhalb der Prüfkörper im Zuge erhöhter bzw. herabgesetzter relativer Luftfeuchte wurden durch fünf Versuchsabläufe untersucht.

Im Versuch der freien Quellung wurde untersucht, inwiefern der Plattenaufbau und die Ausbildung der Klebstofffugen einen Einfluss auf die Quellmasse der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten besitzen. Die untersuchten Prüfkörper wiesen zum Teil Plattenverzug auf, welcher, bedingt durch den Versuchsaufbau, die Erfassung der Daten stark negativ beeinflusste. Aussagen über das tatsächliche Quellmass der Deckschichten konnten auf Grund dessen nicht getroffen werden. Einflüsse der Klebstofffugendicken auf die Quellung der Deckschichten konnten dennoch erkannt werden. So war festzustellen, dass die Quellwerte der Deckschichten mit stei-

gender Klebstofffugendicke zunahmen. Bei den Prüfkörpern des Klebstoffes PURWELD 1302 war der grösste Plattenverzug festzustellen. Dies konnte auf die hohe Festigkeit des Klebstoffes und der daraus resultierenden Spannungsübertragung auf den gesamten Prüfkörperquerschnitt zurückgeführt werden. Unter den Prüfkörpern mit SikaBond®-T52FC Klebstofffugen wiesen die Prüfkörper mit 2 mm Klebstofffuge als einzige Plattenaufbauten dieses Versuches keinen Plattenverzug auf. Daraus konnte gefolgert werden, dass die dicke Fuge in der Lage war, die durch die höheren Quellmasse der Deckschichten auftretenden Spannungen aufzunehmen und Dehnungsunterschiede der einzelnen Schichten zu kompensieren.

Mit dem Versuch der Rissbildung ist untersucht worden, inwiefern die Klebstofffugen Spannungen, hervorgerufen durch das Schwinden des Holzes, aufnehmen und ob dabei ein Einfluss der Plattenaufbauten zu erkennen ist. Bereits fünf Stunden nach der Überführung der Prüfkörper vom Feuchtklima 20/85 ins Trockenklima 20/35 waren erste Delaminierungen der Klebstofffugen zu erkennen. Als besonders markant stellten sich dabei die Prüfkörper mit 0,1 mm dicker SikaBond®-T52FC Klebstofffuge heraus. Parallel zum Faserverlauf der Deckschichten hat bei diesen der Plattenaufbau Buche/Fichte/Buche die prozentual grössten Delaminierungen besessen. Die Prüfkörper mit PURWELD 1302 Klebstofffuge, wie auch die Prüfkörper mit 1 mm und 2 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge wiesen lediglich Delaminierungen auf, die sich auf maximal 12% der Klebfugenlänge beliefen. Entgegen den Erwartungen waren keinerlei Risse innerhalb der Deckschichten der Prüfkörper des Klebstoffes PURWELD 1302 entstanden.

Die entstehenden Eigenspannungen in den Plattenaufbauten auf Grund erhöhter Luftfeuchte und der damit verbundenen Quellung des Holzes, wurden durch die Methode des Freischneidens ermittelt. Zu Versuchsbeginn wurden in den Plattenaufbauten mit dünner Klebstofffuge Zugspannungen bis zu $0,8 \text{ N/mm}^2$ festgestellt. In den Prüfkörpern mit dicker Klebstofffuge lagen die ermittelten Eigenspannungen im Bereich der Messfehler der Prüfgeräte. Nach siebentägiger Lagerung der Prüfkörper im Feuchtklima 20/85 konnten die grössten Eigenspannungen bei den Prüfkörpern des

Klebstoffes PURWELD 1302 ermittelt werden. Im Vergleich zum Ausgangszustand ergab sich eine Spannungsumkehr. Die Druckspannungen dieser Prüfkörper erreichten je nach Plattenaufbau Werte von bis zu $4,4 \text{ N/mm}^2$. Die erreichten Druckspannungen der Prüfkörper mit 0,1 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge ergaben Maximalwerte von bis zu $2,8 \text{ N/mm}^2$. Bei den Prüfkörpern mit 1 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge ergaben sich geringe Druckspannungen von maximal 1 N/mm^2 . Bei den Prüfkörpern mit 2 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge waren die Längenänderungen nach dem Aufschneiden der Streifen so gering, dass sie innerhalb der Messfehler der Prüfgeräte lagen. Dies zeigte, dass die voneinander abweichenden Quellwerte der Deckschichten und Mittelschichten auf Grund der hohen Elastizität der Klebstofffugen von diesen kompensiert werden konnten. Die Deckschichten konnten somit annähernd frei quellen, wodurch die Spannungsentwicklung positiv beeinflusst worden ist.

Mittels der Video Image Correlation Software VIC 2D wurden durch Kreuzkorrelationen die Dehnungen an einer Schmalfläche der Prüfkörper untersucht. Dabei wurde eine Prüfkörperschmalfläche betrachtet, welche in den Deckschichten Hirnholz aufwies. Bei der Auswertung der gewonnenen Daten wurde ersichtlich, dass die grössten Dehnungen innerhalb des ersten Tages erfolgten. Die betrachteten Dehnungen in x-Richtung der Prüfkörper ergaben, dass sich die Dehnungen in den Randbereichen der unterschiedlichen Plattenaufbauten nur sehr geringfügig voneinander unterschieden, während mit wachsender Entfernung zum Rand (in Richtung der Klebfuge) Einflüsse der Klebstofffugen erkannt werden konnten. Die Deckschichten der dünnen Klebstofffugen unterlagen dabei grösseren Behinderungen durch das geringere Quellmass der Mittelschichten als jene der dicken Klebstofffugen, bei denen die Differenzen der Quellmasse zum Teil von den Klebstofffugen kompensiert werden konnten. In y-Richtung konnten über die gesamte Breite der Prüfkörper keine markanten Unterschiede zwischen den Dehnungen der Deckschichten der Prüfkörper mit dünner und dicker Klebstofffuge festgestellt werden. Bei Betrachtung der Mittelschichten wurde ersichtlich, dass mit steigender Klebstofffugendicke eine gleichmässiger

Dehnungsverteilung über die Plattenbreite erzielt werden konnte. Dies war darauf zurückzuführen, dass die Mittelschichten der dünnen Klebstofffugen einer Querkontraktion, hervorgerufen durch die Dehnungen der Deckschichten in x-Richtung und der durch die hohe Festigkeit des Klebstoffes bedingten Spannungsübertragung, unterlagen.

Mit der künstlichen Bewitterung wurde die natürliche Alterung der dreischichtigen Massivholzplatten simuliert. Bei Betrachtung der bewitterten Deckschichten sind besonders jene Plattenaufbauten aufgefallen, welche durch Kombination der Holzarten Buche und Fichte gefertigt wurden. Diese wiesen bereits nach sieben Tagen künstlicher Bewitterung zahlreiche Haarrisse auf. Allgemein konnte festgestellt werden, dass nach vierzehntägiger künstlicher Bewitterung die Rissbildung innerhalb der Deckschichten abgeschlossen war. Auf Grund der rein visuellen Auswertung, konnte nach diesem Zeitraum kein weiterer Risslängenzuwachs erkannt werden. Die Auswertungen der Klebstofffugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten haben ergeben, dass bei den Prüfkörpern mit dicker Klebstofffuge keinerlei Defekte im Klebverbund aufgetreten sind. Auch die Klebstofffugen entlang der nichtbewitterten Deckschichten wiesen keine Delaminierungen auf, was auf Grund der geringen Klimaänderungen an dieser Stelle den Erwartungen entsprach. Unter den Prüfkörpern mit 0,1 mm dicken Klebstofffugen entstanden bei den Prüfkörpern des Klebstoffes Sika-Bond®-T52FC ausschliesslich Delaminierungen, während die Prüfkörper des Klebstoffes PURWELD 1302 zudem Holzrisse entlang der Mittelschichten aufwiesen. Die Ausnahme bildete der Plattenaufbau Buche/Buche/Buche, welcher delaminierte. Eine Erklärung für das Versagen dieser Klebstofffugen ist u.a. damit begründet worden, dass die durch die hohen Schwind-/Quellwerte der Buche innerhalb der Prüfkörper auftretenden Spannungen die Bruchspannungen oder Bruchdehnungen des Klebstoffes übersteigen. Die mittlere prozentuale Länge der delaminierten Klebstofffugen, bezogen auf die maximal mögliche Klebstofffugenlänge, betrug 40%.

3.6 Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die zur Herstellung der Prüfkörper verwendeten Klebstoffe, sowie die Dicke der ausgebildeten Klebstofffugen das Verhalten dreischichtiger, kreuzweise verklebter Massivholzplatten beeinflussen und die möglichen Einsatzgebiete einschränken. Um die Einflüsse auf die spezifischen Eigenschaften der Plattenaufbauten noch genauer bestimmen zu können, sind Änderungen in den durchgeführten Versuchsabläufen zu empfehlen.

Die Messung der Längenänderung im Versuch der freien Quellung an in die Prüfkörper eingebrachten Schrauben hat sich als vorteilhaft erwiesen, um eventuell auftretende Randeffekte ausschliessen zu können. Jedoch sollte für weitere Untersuchungen ein Versuchsaufbau realisiert werden, bei welchem die erfassten Quellwerte nicht durch den Plattenverzug beeinflusst werden können. Dazu sollten entweder die Messungen direkt entlang der Deckschichten vorgenommen werden oder der Plattenverzug sollte zusätzlich erfasst werden, um diesen durch Berechnungen in die Daten mit einbeziehen zu können.

Die angewandte Versuchsdurchführung zur Untersuchung der Rissbildung von dreischichtigen Massivholzplatten hat sich als geeignet erwiesen. Bereits nach kurzer Zeit konnten erste Delaminierungen in den Klebstofffugen der Prüfkörper erfasst werden. In folgenden Untersuchungen sollte jedoch ein konstanteres Prüfklima eingehalten werden, damit Verfälschungen der Verläufe der Rissbildungen auf Grund schwankender Luftfeuchten ausgeschlossen werden können.

Die Untersuchungen der auftretenden Eigenspannungen haben aufschlussreiche Ergebnisse geliefert. So konnten bei den 2 mm Klebstofffugen nahezu keine Spannungen festgestellt werden, während die 0,1 mm Fugen des PURWELD 1302 Spitzenwerte bis zu $4,4 \text{ N/mm}^2$ erreichten. Um genauere Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Spannungsentwicklung in den dreischichtigen Massivholzplatten treffen zu können, sollten die Prüfkörper nicht nur zu einem definierten Zeitpunkt untersucht werden, sondern in sinnvoll gewählten Abständen. So empfiehlt es sich, zu Beginn

des Versuches mehr Messungen durchzuführen, da die grössten Spannungsentwicklungen zeitnah der Klimaänderung stattfinden.

Des Weiteren könnten zur Bestimmung der in den Klebstoffugen auftretenden Spannungen die dreischichtigen Massivholzplatten bereits vor der Überführung in ein anderes Klima in Streifen aufgetrennt werden. Dadurch können auf Grund des kleineren Prüfkörperquerschnittes in kürzerer Zeit grössere Quell-/Schwindbewegungen des Holzes auftreten, wodurch zugleich grössere Spannungen aufgebaut werden würden. Zudem könnten Längenänderungen der Deckschichten erzielt werden, deren Werte sich ausserhalb der Messfehler der Prüfgeräte befinden. Auch ist es auf diese Weise möglich, durch die beliebige Wahl der Streifen für die Messungen zu einem bestimmten Zeitpunkt, einen höheren statistischen Wahrheitsgehalt zu erzielen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der optischen Dehnungsmessung sind aussagekräftig und aufschlussreich, jedoch sind erheblich mehr Untersuchungen notwendig, um eine statistische Absicherung der Ergebnisse gewährleisten zu können.

Die visuelle wie digitale Auswertung der während der künstlichen Bewitterung aufgenommenen Fotos der Prüfkörper hat sich als einfach durchführbar erwiesen und kann generell auch bei weiteren Untersuchungen übernommen werden. Anhand der Bilder können auch später noch Rückschlüsse über die Entwicklung und Ausbildung der Risse/Delaminierungen getroffen werden, was einen eindeutigen Vorteil gegenüber der handschriftlichen Vermessung der Risse darstellt. Eine Verbesserung der Bildauswertungen kann dadurch erreicht werden, dass die Aufnahmen unter Zuhilfenahme von Stativen erfolgen, um qualitativ gleichwertige Bilder jedes Prüfkörpers zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu erhalten. Dadurch könnten zur Auswertung Bildbearbeitungsprogramme genutzt werden, welche es ermöglichen, durch Bezug auf ein Referenzbild, die entstandenen Risse noch genauer und detaillierter zu erfassen.

Durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konnten sowohl Erwartungen bestätigt, als auch neue Erkenntnisse gewonnen werden. Der Plattenverzug, welcher sich besonders deutlich bei den Prüfkörpern mit dünner Klebstoffu-

ge abzeichnete, beruht neben den Einflüssen der Klebstoffugen auch auf den grösseren Quellmassen der Laubholzdeckschichten im Vergleich zu denen der Nadelholzdeckschichten, sowie dem asymmetrischen Plattenaufbau bezüglich der Holzarten und Schichtdicken. Der bereits im Zuge dieser Arbeit angestrebte Ausgleich der auftretenden Spannungen innerhalb der Laub- und der Nadelholzdeckschichten durch unterschiedliche Schichtdicken ist in weiteren Untersuchungen zu optimieren. So sollte durch eine weitere Reduzierung der Dicke der Laubholzdeckschicht der Plattenverzug minimiert oder gar ausgeschlossen werden können.

Zur verbesserten Dimensionierung der einzelnen Schichten könnte dabei das an der ETH Zürich in Entwicklung stehende Berechnungsmodell Einsatz finden, mit welchem u.a. Dehnungen und Spannungen des Holzes simuliert werden können.

Ebenfalls von Interesse wären Untersuchungen zum Versagensverhalten der PUR-WELD 1302 Klebstoffugen des Plattenaufbaues Buche/Buche/Buche in den Versuchen der Rissbildung und der künstlichen Bewitterung.

Der künftige Einsatzbereich der in dieser Arbeit untersuchten Plattenaufbauten ist hauptsächlich im Bereich des dekorativen Holzbaues zu suchen, was sich durch die dicken, elastischen Klebstoffugen bedingt. Durch die sehr geringen Eigenspannungen innerhalb der Plattenaufbauten mit dicker Klebstoffuge und der darauffolgenden Formstabilität hinsichtlich des Plattenverzuges, bieten sich diese für grossflächige Anwendungen an. So könnten sie beispielsweise als Wandvertäfelungselemente genutzt oder als Deckenelemente eingesetzt werden. Dabei sind grössere Dehnungsfugen zu gewährleisten, da die einzelnen Schichten auf Grund des geringen E-Moduls des Klebstoffes SikaBond®-T52FC nicht abgesperrt werden und somit in ihrer Quellung nur sehr geringfügig beeinträchtigt sind. Für konstruktive Anwendungen können diese Plattenaufbauten auf Grund der geringen Steifigkeit der Klebstoffugen nicht eingesetzt werden, da auftretende Belastungen bzw. Spannungen durch die dicken Klebstoffugen nicht übertragen werden können und dies zum Versagen der dreischichtigen Massivholzplatten als tragendes Element führen würde.

Durch Kombination der untersuchten Klebstoffe PURWELD 1302 und SikaBond®-T52FC, könnte ein breiteres Anwendungsgebiet der Massivholzplatten erlangt werden. So wäre es denkbar, auf mit starren Klebstofffugen gefertigte Massivholzplatten oder auch Brettschichtholzträger Decklagen durch eine dicke, elastische Klebstofffuge aufzubringen. Zusätzlich ist es möglich, eine elastische Breitenverklebung der Deckschichten zu realisieren, wie sie beispielsweise bei Bootsdecks vorzufinden ist. Auf diese Weise gefertigte Plattenaufbauten, genügen auf Grund der hohen Festigkeit der starren Klebstofffugen statischen Anforderungen und bieten gleichzeitig die Möglichkeit einer dekorativen Oberflächengestaltung.

Die dünnen elastischen Klebstofffugen können für praktische Anwendungen nicht genutzt werden, da diese in den durchgeführten Untersuchungen stets versagten.

4 Laubholzverklebung für konstruktive Anwendungen

4.1 Einleitung

Holz-Klebstoff-Verbindungen im Holzbau werden in ihrem Lebenszyklus vielfältigen Beanspruchungen ausgesetzt, denen sie mit einem hohen Mass an Sicherheit widerstehen müssen. Einerseits sind dies dynamische Belastungen, die beispielsweise aus Verkehrslasten resultieren; andererseits sind dies statische Lasten, die z.B. durch die Eigenlast des Trägers entstehen. Weiterhin wirken klimatische Beanspruchungen auf den hygroskopischen Werkstoff Holz, wobei der Klebstoff die durch Quellen und Schwinden entstehenden Spannungen übertragen können muss. Als weitere Beanspruchung ist die Witterung zu nennen, welche durch Feuchte- und Strahlungsexposition eine Alterung, und damit eine Schwächung des Klebstoffes bewirkt.

Durch den Einsatz von Laubhölzern im konstruktiven Holzbau können neue Anwendungsgebiete erschlossen werden. Für die Verwendung im Aussenbereich könnten Laubhölzer mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit eingesetzt werden. Dadurch kann der für weniger dauerhafte Nadelhölzer erforderliche chemische Holzschutz eingespart werden. Ein Biozideintrag in die Umwelt findet nicht statt. Die besseren mechanischen Eigenschaften, die die meisten Laubhölzern gegenüber den Nadelhölzern aufweisen, ermöglichen zum einen grössere Spannweiten bei gleichbleibendem Querschnitt oder kleinere Querschnitte bei gleichbleibender Belastung. Ausser Acht lassen sollte man weiter nicht, die im Vergleich zum bisher eingesetztem Nadelholz, unterschiedliche Farbe und Textur der Laubhölzer. Dadurch ergeben sich neue Gestaltungsmöglichkeiten.

Hemmnis zum Einsatz von Laubholz im konstruktiven Bereich ist bisher die Verklebung (Bernasconi, 2004 ; Hübner, 2007). Um die Eignung von Verklebungen im konstruktiven Holzbau für den praktischen Einsatz zu gewährleisten, werden an diese von verschiedenen Normen Anforderungen gestellt. Dabei werden auch verschärfte Klimabedingungen betrachtet.

4.1.1 Brettschichtholz aus Laubholz

Brettschichtholz besteht aus einzelnen Brettern (Lamellen) die durch Verklebung den gewünschten Querschnitt erhalten. In Längsrichtung werden die Bretter durch Keilzinkung endlos verbunden und auf die erforderliche Länge gekappt (Niemz, 2007). Vorteil von Brettschichtholz gegenüber Massivholz sind die grossen realisierbaren Querschnitte und Längen, sowie die Verwendung von kleineren Stammdurchmessern für die Lamellen. Anforderungen an Brettschichtholz sind in der DIN EN 14080 (2009) geregelt. Je nach Einsatzbedingung (Nutzungsklasse) des Brettschichtholzes bestehen unterschiedliche Anforderungen an den Klebstofftyp (siehe Tab. 4.1). Bei Verwendung von 1K-PUR-Klebstoffen sind die Anforderungen für den Klebstofftyp in DIN EN 15425 (2008) gestellt.

Tab. 4.1: Nutzungsklassen und anwendbarer Klebstofftyp nach DIN EN 14080 (2009) und DIN EN 1995 (2008)

Nutzungsklasse	Kennzeichen		Holzfeuchte bei Nadelhölzern	Klebstofftyp
	T.	r. H.		
1	20 °C	65%	<12%	I; II
2	20 °C	85%	<20%	I; II
3	Klima, bei dem die Holzfeuchte höher als in Nutzungsklasse 2 liegt.			I

Nach DIN EN 14080 (2009) ist Pappel das einzige Laubholz, das für die Produktion von Brettschichtholz eingesetzt werden darf. Bei dieser Norm handelt es sich um eine harmonisierte europäische Produktnorm, die nationale konkurrierende Normen ersetzen soll. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es in Deutschland so, dass Brettschichtholz zwar nach der DIN EN 14080 hergestellt und gehandelt wird, allerdings nicht angewendet werden darf, da die zugehörigen Anwendungsregeln noch nicht veröffentlicht sind. In der Schweiz ist der Einsatz von Laubholz in Brettschichtholz möglich. Nach der Holzbaunorm SIA 265 (Architektenverein, 2003) soll Brettschichtholz nach Mög-

lichkeit aus Nadelholz bestehen, allerdings sind auch andere Lamellenaufbauten zulässig und damit indirekt der Einsatz von Laubholz erlaubt (Krackler et al., 2010).

Die Verwendung von Laubholz in Brettschichtholz ist jedoch selten. So beziffern Ohnesorge et al. (2009) die Verwendung von Laubholz auf 0,01% an der gesamten Brettschichtholzproduktion. Trotzdem existieren Bauwerke, in denen Brettschichtholz aus Laubholz, vorallem aus Buche für hochbelastete Bauteile, eingesetzt wurde. Bernasconi (2004) führt als Beispiele den Seeparksaal Arbon (Baujahr 1984) und die Strassenbrücke Eggwil (Baujahr 1985) an, deren Tragstruktur teilweise aus Buchenbrettschichtholz bestehen. Brettschichtholz aus Esche ist in der Werkhalle einer Schreinerei in Visp/ Schweiz verbaut. Weiter werden Kombinationen aus Nadel- und Laubholz von einigen Firmen angeboten (Hübner, 2007).

4.1.2 Wissensstand zur Laubholzverklebung im konstruktiven Holzbau

Aicher und Reinhardt (2007) untersuchten die Verklebung von rotkernigem und nicht-rotkernigem Buchenholz mit MUF-Harz und 1K-PUR-Klebstoff zu Brettschichtholz. Anhand von Versuchen zur Druckscherfestigkeit und Delaminierungsbeständigkeit wurde die Tauglichkeit beurteilt. Die ermittelten Druckscherfestigkeiten lagen dabei auf hohem Niveau über den Anforderungen, wobei tendenziell der 1K-PUR-Klebstoff die höchsten Werte erzielte. Bei der Prüfung der Beständigkeit gegen Delaminierung erfüllten nicht rotkernige Lamellen die Anforderungen an den Klebstofftyp II.

Eine ähnliche Untersuchung führte Schmidt et al. (2010b) durch. Auch hier wurde farbverkerntes und normales Buchenholz mit 1K-PUR-Klebstoff und MUF Harz verklebt. Zur Beurteilung der Verklebungsqualität wurden Delaminierungsversuche nach DIN EN 302 – 2 (2002) und Scherprüfungen nach DIN EN 392 (1995) durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Verlängerung der geschlossenen Wartezeit bei MUF mit einer Verminderung der Delaminierung einhergeht.

Pitzner et al. (2001) führte Druckscher-, Querkzug- und Delaminierungsversuche an verklebten Eichen-, Robinien-, Douglasien- und Lärchenholz bei unterschiedlichen

Holzfeuchten durch. Eingesetzte Klebstoffe waren verschiedene MUF und PRF Harze, sowie 1K-PUR-Klebstoffe und Epoxidharz. Die beiden Nadelhölzer zeigten durchwegs positive Ergebnisse. Die Ergebnisse der Prüfung von Eiche und Robinie zeigten, dass die Klebstoffauswahl von entscheidender Bedeutung ist, da grosse Unterschiede von Festigkeit und Holzbruch auch innerhalb einer Klebstoff-Produktgruppe festzustellen waren. Grundsätzlich ist die Verklebung von Laubhölzern jedoch möglich.

Aus der bisherigen Beschränkung bei der Auswahl von Hölzern für Brettschichtholz auf Nadelholz, ergeben sich zwei Probleme für die Verklebung von Laubhölzern im konstruktiven Bereich. Zum einen sind die vorhandenen Klebstoffe für die Verklebung von Nadelhölzern optimiert. Zum Anderen sind die Anforderungen an Brettschichtholz auf Nadelhölzer ausgelegt. Daraus entsteht die Forderung, die Anforderungen an Laubholz anzupassen (Schmidt et al., 2010b ; Aicher und Reinhardt, 2007).

Ein grosser Erfolg für den Einsatz von Brettschichtholz aus Buche, verklebt mit einem MUF Harz gelang Schmidt et al., (2010a). Die Verklebung erfüllt die Anforderungen an den Klebstofftyp I. Für das Produkt, hochfestes Brettschichtholz aus Buche, wurde die bauaufsichtliche Zulassung erteilt.

4.1.3 Zielstellung der Arbeit

Zur Optimierung der Verklebung von Laubholz sind verschiedene Versuche durchgeführt worden, bei denen die Scherfestigkeit und der Holzbruch als Bewertungskriterium der Güte der Verklebung ermittelt wurden. Untersucht wurden die Verklebungseigenschaften der Holzarten Eiche, Buche und Esche. Die Klebstoffhersteller Purbond AG, Geistlich Ligamenta AG und Sika AG stellten dafür 1K-PUR-Klebstoffe mit unterschiedlichen Steifigkeiten zur Verfügung. Aus den zuerst durchgeführten Versuchen nach DIN EN 302 – 1 (2004), bei denen eine grosse Anzahl verschiedener Produkte getestet wurde, wurden für die anschliessend durchgeführten Druckscherversuche bestimmte Produkte ausgewählt. Bei der Auswahl der 1K-PUR-Klebstoffe wurde besonders auf unterschiedliche E-Moduln geachtet. Im zweiten Schritt wurden kommer-

zielle 1K-PUR-Klebstoffe dem Druckscherversuch unterzogen. Die Prüfungen fanden sowohl mit normalklimatisierten Prüfkörpern als auch mit Prüfkörpern, die einer Kochwasserlagerung unterzogen wurden statt. Untersucht wurde dabei insbesondere, ob ein flexibler Klebstoff die durch die Quellung auftretenden Spannungen ausgleichen kann. Mit den Ergebnissen aus den Versuchen wurden von den beteiligten Klebstoffherstellern Klebstoffe modifiziert und ebenfalls den genannten Versuchen unterzogen.

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Holzarten und Klebstoffe

Für die Verklebung der Proben fanden die Laubhölzer Eiche (*Quercus spec.*), Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) Einsatz. Die Rohdichte der verwendeten Hölzer kann Tab. 4.2 entnommen werden. Die genannten Hölzer wurden mit den in Tab. 4.3 aufgeführten Klebstoffen verklebt. Um die 1K-PUR-Klebstoffe mit in der Holzindustrie ausserdem gebräuchlichen Klebstoffen vergleichen zu können, sind ein Resorcin-Phenol-Formaldehyd-Harz (PRF Harz) und ein Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF Harz) in die Versuchsreihe aufgenommen worden (Tab. 4.3).

Tab. 4.2: Rohdichte und Holzfeuchte der in den Zug- und Druckscherversuchen verwendeten Hölzern

Holzart	Rohdichte		Holzfeuchte	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Esche	680 kg/m ³	50 kg/m ³	14%	1%
Buche	670 kg/m ³	30 kg/m ³	13%	1%
Eiche	730 kg/m ³	50 kg/m ³	14%	2%

Tab. 4.3: Ausgewählte 1K – PUR Klebstoffe der am Projekt beteiligten Firmen und Vergleichsklebstoffe (Melamin-Harnstoff-Formaldehyd- und Resorcin-Phenol-Formaldehyd-Harz)

Klebstoffbezeichnung	Hersteller	Klebstoffart
Sikaflex®-228	Sika	1K-PUR
SikaBond®-T52FC		
Miraflex 9560	Geistlich	
Mirapur 9500 Speed		
PURBOND HB S309	Purbond	
PURWELD 1302		
PURBOND HB 181		Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz
Kauramin 683, Härter 688	Türmer Leim	
AERODUX®, Härter HRP 155	ASTORit	Resorcin/Phenol/Formaldehyd-Harz

Nach Auswerten der ersten Ergebnisse aus den Versuchen modifizierte die Firma Purbond AG (Sempach, Schweiz) Klebstoffe zur Optimierung der Verklebung. Die beiden modifizierten Produkte wurden ebenfalls den im folgenden beschriebenen Versuchen unterzogen.

4.2.2 Zugscherfestigkeit nach DIN EN 302 – 1 (2004)

Im Versuch nach DIN EN 302 – 1 (2004) wurde die Zugscherfestigkeit von Verklebungen ermittelt. Über die Zugscherfestigkeit lässt sich die Verklebungsgüte beurteilen. Für 1K-PUR-Klebstoffe stellt die DIN EN 15425 (2008) Anforderungen an die mindestens zu erreichende Zugscherfestigkeit. Diese beträgt 10 MPa.

Das Holz für die Prüfkörper war frei von Holzfehlern. Bei der Herstellung der Prüfkörper wurde darauf geachtet, dass die Jahrringe einen Winkel von mehr als 45° zur Klebstoffuge einnahmen und die Fasern parallel zur Belastungsrichtung der Prüfeinrichtungen lagen. Beim Zuschneiden der Lamellen für den Versuch nach DIN EN 302 – 1 (2004) verblieb eine Seite sägerauh, eine wurde gehobelt. Die beiden miteinander verklebten Lamellen stammten aus einem Brett. Das Brett wurde unmittelbar vor

dem Verkleben auf der sägerauhen Seite gehobelt und mittels Kreissäge quer zur Faser halbiert. Die Fügeflächen waren die beiden zuletzt gehobelten Flächen. Der Klebstoffauftrag betrug für alle Klebstoffe und Holzarten 200 g/m^2 . Der Pressdruck betrug $0,8 \text{ N/mm}^2$. Aus diesen verklebten Brettern wurden die einzelnen Proben, dargestellt in Bild 4.1, geschnitten. Abschliessend wurde mit der Kreissäge von beiden parallel zur Klebfuge liegenden Seiten zwei Nuten senkrecht zum Faserverlauf geschnitten, die die Klebstofffuge durchtrennen. Die beiden Nuten lagen 10 mm von einander entfernt. Die entstandene Fläche (Überlappungsfläche), die die beiden Prüfkörperseiten verbindet, ist die Scherfläche.

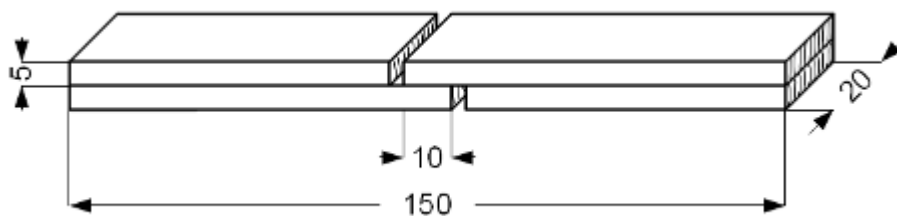


Bild 4.1: Probe mit Abmessungen für die Versuche nach DIN EN 302 – 1 (2004)

Die Prüfung wurde mit einer Zwick/Roell Universalprüfmaschine 10 kN durchgeführt. Die eingespannte Probe (Bild 4.2) wurde auf Zug bis zum Bruch belastet. Die Aufzeichnung der Längsdehnung erfolgte über einen Ansetz-Wegaufnehmer. Die Bruchfläche A errechnet sich aus der vor der Prüfung gemessenen Breite b . Die Länge der Verklebung a wurde nicht bei jeder Probe gemessen sondern für alle Proben einer Charge als gleich angenommen. Die Länge a wurde aber für jede hergestellte Charge Proben überprüft und deren Wert in der Berechnungssoftware angepasst.

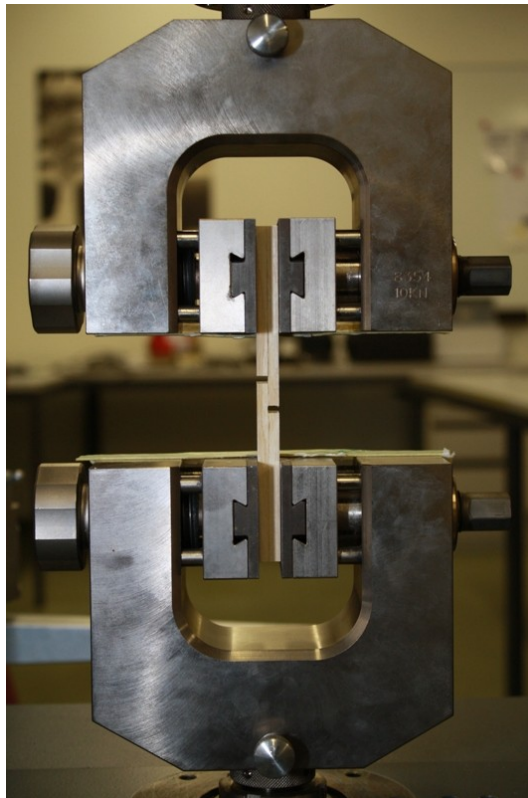


Bild 4.2: Eingespannte Probe im Zugscherversuch nach DIN EN 302 – 1

$$\text{Scherfestigkeit} = \frac{\text{Bruchkraft}}{A} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (11)$$

A = Bruchfläche

A = a (10 mm) * b (20 mm)

Die Zugscherfestigkeit errechnet sich nach Gleichung (11). Mit der während des Versuchs fortlaufend aufgezeichneten Kraft, der Dehnung und der ermittelten Scherfläche lässt sich ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm generieren.



Bild 4.3: Unterschiedlich geschätzter Holzbruchanteil an Prüfkörpern aus Eiche, verklebt mit einem PRF Harz: links 10%, Mitte 60% und rechts 100%

Weiter wurde für jede geprüfte Probe der Holzbruchanteil aufgenommen. Der Holzbruch wurde dafür in 10% Schritten geschätzt. Bild 4.3 zeigt anhand von drei geprüften Zugscherproben Beispiele für unterschiedliche Holzbruchanteile.

4.2.3 Druckscherversuch an normalkonditionierten Prüfkörpern

Nach dem Standard ASTM D 2559 – 04 wurde ein Druckscherversuch durchgeführt. Auch mit diesem Versuch wurde die Verklebungsgüte ermittelt. Anforderung sind nach diesem Standard ausser einer Mindestscherfestigkeit auch eine Anforderung an den Mindestholzbruchanteil. Der Holzbruch muss im Mittel mindestens bei 75% liegen. Die Mindestdruckscherfestigkeit von verklebten Prüfkörpern muss mindestens 90% der Scherfestigkeit des Vollholzes betragen.

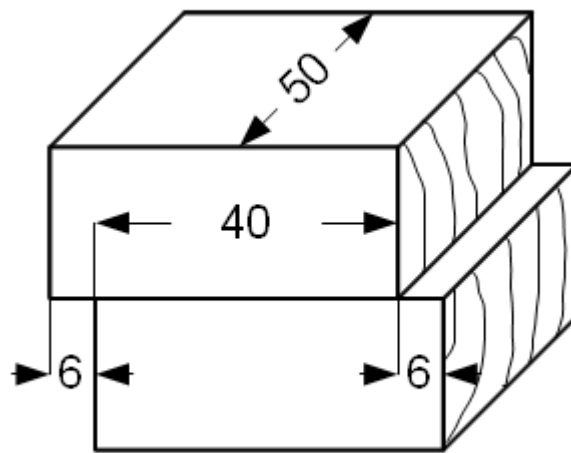


Bild 4.4: Probe mit Massen für die Versuche nach ASTM D 2559 - 04 (2004)

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte aus fehlerfreiem Holz. Aus Bohlen wurden Latten mit $60 \times 60 \text{ mm}^2$ geschnitten. Diese Latten wurden in longitudinaler Richtung aufgetrennt und beim Verkleben wieder so zusammengefügt, dass die Fügeflächen die Seiten waren, die beim Auftrennen getrennt wurden. Vor dem Verkleben wurden die beiden Lattenhälften abgerichtet und auf eine Dicke von 20 mm gehobelt. Der Klebstoffauftrag betrug für alle Klebstoffe und Holzarten 200 g/m^2 . Der Pressdruck betrug $0,8 \text{ N/mm}^2$. Die Winkel zwischen den Jahrringen und der Klebstofffuge lagen zwischen 90° und 45° . Nach Aushärtung der Klebstoffe wurden die Latten auf den Flächen, die senkrecht zur Klebstofffuge liegen abgerichtet und gehobelt. Quer zur Faser wurden aus den verklebten Latten Quader mit einer Länge von 52 mm in longitudinaler Richtung geschnitten. Der Falz an der Stirnseite der Prüfkörper wurde mittels Tischfräse gefräst. Ein Prüfkörper mit Abmessungen ist in Bild 4.4 schematisch dargestellt. Für die Forderung des Standards, dass die Druckscherfestigkeit der verklebten Prüfkörper 90% der Scherfestigkeit des jeweiligen Vollholzes nicht unterschreiten darf, sind auch aus Vollholz von Buche, Eiche und Esche Prüfkörper, wie in Bild 4.4 dargestellt, gefertigt worden. Die Vollholzproben wurden ebenfalls dem Druckscherversuch unterzogen und die Scherfestigkeit berechnet. Die Masse der

eingesetzten Proben weichen von den Vorgaben des Standards ASTM D 2559 – 04 ab. Sie sind so angepasst, dass eine Scherfläche von 2000 mm² entsteht.

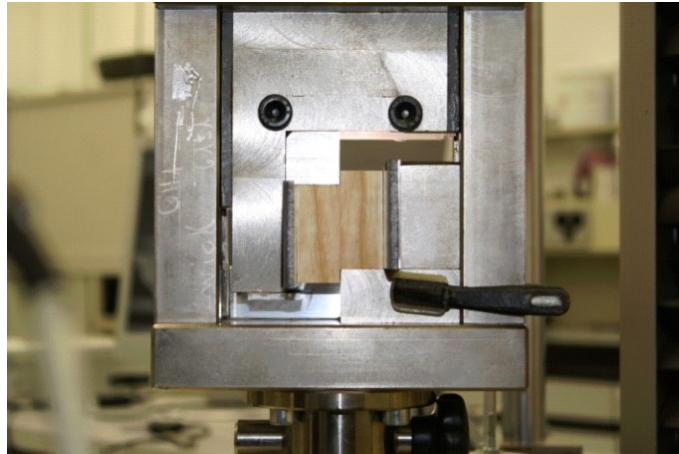


Bild 4.5: Druckscherversuch nach ASTM D 2559 - 04 (2004)

Der Versuchsaufbau wird in Bild 4.5 gezeigt. Zwischenraum zwischen Prüfkörperaufnahme und den Seiten des Prüfkörpers, die parallel zu den Klebstoffugen liegen, wurden durch Zulegen von Stahlplatten gefüllt. Die Stahlplatten verhinderten ein zu starkes Verkanten des Prüfkörpers während der Prüfung.

Die Prüfung wurde mit einer Universalprüfmaschine Zwick Z100 durchgeführt. Die Aufnahme der Kraft erfolgte über eine 100 kN Kraftmessdose, die Aufnahme der Dehnung über ein Videoextensiometer. Die Scherfläche wurde mittels Messschieber vor der Prüfung bestimmt und der Prüfsoftware übergeben. Die Scherfestigkeit errechnet sich nach Gleichung (11) auf Seite 94 wobei die Scherfläche 2000 mm² beträgt. Über die während des Versuchs laufend ermittelte Kraft und die Dehnung lässt sich ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erzeugen. Der Holzbruchanteil wurde wie bei den Versuchen nach DIN EN 302 – 1 (2004) in 10% Schritten für jede geprüfte Probe geschätzt.

4.2.4 Druckscherversuch nach Kochwasserlagerung

Um eine Beanspruchung unter erhöhter Feuchtebelastung zu simulieren, sind in der DIN EN 302 – 1 (2004) verschiedene Lagerarten vorgesehen, wie Tab. 4.4 zeigt. Für die Druckscherversuche nach ASTM D 2559 – 04 (2004) wurde neben der Lagerfolge A1 (Lagerung im Normalklima) die Lagerfolge A4 gewählt. Für die Lagerfolge A4 wurden die Prüfkörper für sechs Stunden in kochendem Wasser untergetaucht gelagert. Unmittelbar im Anschluss an den Kochvorgang wurden die Prüfkörper in ein Becken mit 20 °C warmen Wasser getaucht und dort für zwei Stunden belassen. Im Anschluss wurden sie in nassem Zustand dem Druckscherversuch unterzogen.

Tab. 4.4: Art und Dauer der Behandlung vor der Zugscherprüfung (DIN EN 302 – 1 (2004))

Bezeichnung	Behandlung
A1	Prüfung direkt nach der 7-Tage-Lagerung im Normalklima [20/65] ^a
A2	4 Tage untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Prüfkörper werden in feuchtem Zustand geprüft
A3	4 Tage untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Konditionierung im Normalklima [20/65] bis zur Ausgangsmasse ^b Prüfkörper werden in trockenem Zustand geprüft
A4	6 h in kochendem Wasser 2 h untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Prüfkörper werden in feuchtem Zustand geprüft
A5	6 h in kochendem Wasser 2 h untergetaucht in Wasser bei (20 ± 5) °C Konditionierung im Normalklima [20/65] ^a bis zur Ausgangsmasse ^b Prüfkörper werden in trockenem Zustand geprüft

^a Das Normalklima [20/65] ist definiert als Temperatur von (20 ± 2) °C und relative Luftfeuchte von (65 ± 5) %.

^b Die Grenزابweichung zur Ausgangsmasse beträgt + 2% und - 1%

Um zu ermitteln, ob die Prüfkörper nach ASTM D 2559 – 04 nach sechs Stunden Kochen bereits das maximale Quellmass erreicht haben, wurde an Prüfkörpern das maximale Quellmass bestimmt, indem sie der selben Behandlung unterzogen wurden.

Die Abmessungen der Prüfkörper betrugen 50 x 50 x 60 mm³ (radial, tangential, longitudinal) und waren somit etwas grösser, als die Prüfkörper nach ASTM D 2559 – 04. Die Abmessungen der Prüfkörper in tangentialer, radialer und longitudinaler Richtung wurden dazu während der ersten Stunde alle zehn Minuten, während der folgenden 5 Stunden stündlich und anschliessend nach 24 und 26,5 Stunden aufgenommen. Das maximale lineare Quellmass (α_{\max}) errechnet sich nach Gleichung (12) (DIN 52184 (1979)).

$$\alpha_{\max} = \frac{l_w - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (12)$$

l_w = Länge der jeweiligen holzanatomischen Hauptrichtung in nassem Zustand

l_0 = Länge der jeweiligen holzanatomischen Hauptrichtung in normalklimatisierten Zustand.

4.3 Versuchsergebnisse und Diskussion

4.3.1 Zugscherversuch nach DIN EN 302 – 1

Für die Zugscherversuche nach DIN EN 302 – 1 (2004) wurden die Zugscherfestigkeit aufgenommen und der Holzbruchanteil in 10% Schritten geschätzt. Zugscherproben wurden mit allen Klebstoffen hergestellt, die in Tab. 4.5 aufgeführt sind. Die ermittelten Zugscherfestigkeiten und der Mittelwert des Holzbruchanteils sind für alle Holzart-Klebstoff-Kombinationen in Bild 4.6 dargestellt. In Tab. 4.5 findet sich weiter die Zuordnung der Bezeichnung der Klebstoffe in den Diagrammen.

Tab. 4.5: Aufschlüsselung der Bezeichnung der eingesetzten Klebstoffe und deren E-Modul (Herstellerangaben (He) und Werte aus Kapitel „Ermittlung von Kennwerte der Klebstoffe)

Bezeichnung	Klebstoffname	Klebstofftyp	E-Modul [MPa]
A	Kauramin 683	MUF	2489
B	Prefere 4040	PRF	3988
C	PURBOND HB 181	1K-PUR-Klebstoff	1002
D	Mirapur 9500 Speed	1K PUR Bauklebstoff	15,31 (He)
F	Miraflex 9560	1K PUR Dichtstoff	1,2
G	PURBOND HB S309	1K-PUR-Klebstoff	1145
H	PURWELD 1302	1K-PUR-Klebstoff	911 (He)
I	SikaBond®-T52FC	1K PUR Dichtstoff	0,4
J	Sikaflex®-228	1K PUR Dichtstoff	1,6
K	VN 3095	1K-PUR-Klebstoff	301 (He)
L	AERODUX 185	PRF	N/A
M	VN 3098	1K-PUR-Klebstoff	1787 (He)
VH	Bezeichnung für Vollholzprüfkörper		

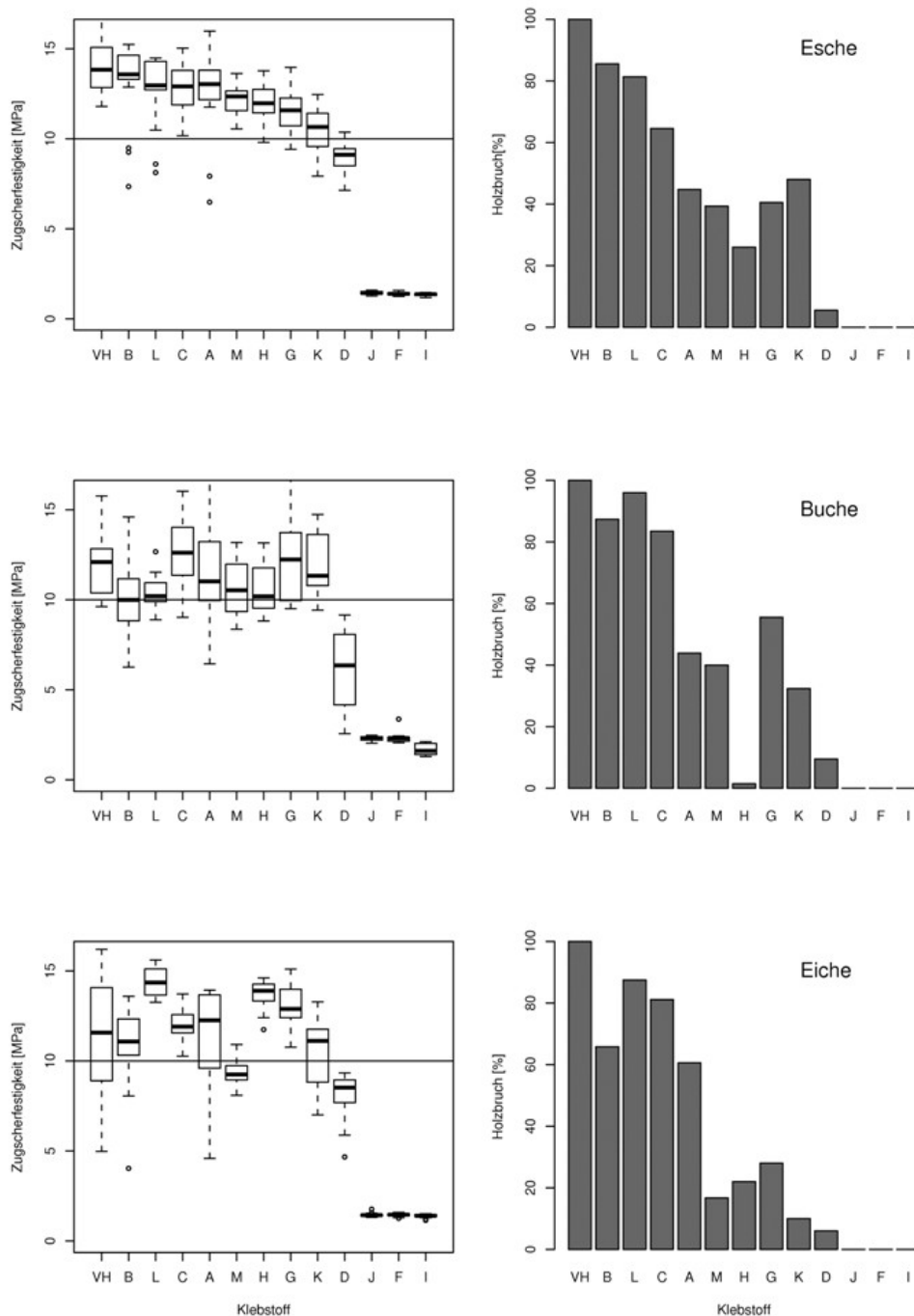


Bild 4.6: Ergebnisse der Zugscherversuche für die Holzarten Esche, Buche und Eiche. Die links stehenden Diagramme zeigen die Zugscherfestigkeit (horizontale Linie bei 10 MPa zeigt die Mindestanforderung nach DIN EN 15425 (2008)) für jeden verwendeten Klebstoff, die Säulendiagramme rechts die Mittelwerte für den Holzbruch bei dem jeweiligen Klebstoff.

Wie in den Diagrammen für die Zugscherfestigkeit in Bild 4.6 ersichtlich, waren die Zugscherfestigkeiten, die die einzelnen Klebstoff-Holz-Kombinationen ergaben, sehr unterschiedlich. Dabei lag der Median der Zugscherfestigkeit einzelner Klebstoff-Holz-Kombinationen bei Prüfkörpern Eiche und Buche über der ebenfalls ermittelten Zugscherfestigkeit des Vollholzes. Die meisten 1K-PUR-Klebstoffe (C, G, H, K, M), die für die Verklebung im Holzbau entwickelt wurden, erreichten Zugscherfestigkeiten von über 10 MPa. Damit haben diese 1K-PUR-Klebstoffe die Anforderungen an die Zugscherfestigkeit, die die Norm DIN EN 15425 (2008) für die Kombination Buche – 1K-PUR-Klebstoffe stellt, bei der Verklebung mit den Laubhölzern Eiche, Buche und Esche erreicht. Auch die zum Vergleich mit geprüften PRF Harze erfüllen diese Anforderung grösstenteils. Ausnahmen sind die Klebstoff-Holz-Kombinationen M-Eiche (1K-PUR-Klebstoff) und B-Buche (PRF Harz), die die erforderlichen 10 MPa Zugscherfestigkeit nicht erreichten.

Mit abnehmendem E-Modul konnte für die verwendeten 1K-PUR-Systeme zum einen eine niedrigere Zugscherfestigkeit als auch ein abnehmender Holzbruchanteil festgestellt werden. Bei den elastischen 1K-PUR-Dichtstoffen trat der Bruch in der Klebstofffuge auf. Die Zugscherfestigkeit lag bei den drei Produkten auf gleichem niedrigen Niveau. Der Bauklebstoff, dessen E-Modul zwischen den 1K-PUR-Dichtstoffen und den steifen 1K-PUR-Klebstoffen lag, lag auch bei den Zugscherfestigkeiten und Holzbruchanteil zwischen diesen beiden Klebstoffgruppen.

Der höchste Holzbruch konnte bei PRF Harzen festgestellt werden. Bei den 1K-PUR-Klebstoffen ergab der Klebstoff PURBOND HB 181 den höchsten Mittelwert des Holzbruchanteils. Der Mittelwert des Holzbruchs nahm in den meisten Fällen mit abnehmender Zugscherfestigkeit ab. Clauss et al. (2008) stellt fest, dass zwischen dem geschätzten prozentualen Holzbruch und der Zugscherfestigkeit kein deutlicher Zusammenhang besteht. Dies zeigten auch die Ergebnisse aus den Zugscherversuchen in dieser Arbeit. Bei geringem Holzbruchanteil muss nicht zwangsläufig auch der Wert der Zugscherfestigkeit niedrig sein.

4.3.2 Druckscherversuch an normalkonditionierten Prüfkörpern

Für die Druckscherversuche wurde die Anzahl der 1K-PUR-Klebstoffe eingeschränkt. Neben den steifen Klebstoffen PURWELD 1302 (H) und den beiden modifizierten Klebstoffen VN 3095 (K) und VN 3098 (M), wurde ein elastischer 1K-PUR-Dichtstoff (Sikaflex®-228, J) und ein Bauklebstoff (Mirapur 9500 Speed, D) zur Herstellung der Prüfkörper verwendet. Der E-Modul des Produkts Mirapur 9500 Speed liegt zwischen denen der steifen 1K-PUR-Klebstoffe und dem 1K-PUR-Dichtstoff. Zum Vergleich wurden Proben mit einem PRF Harz (L) verklebt und in die Untersuchungen einbezogen. Die Ergebnisse der Druckscherversuche sind in Bild 4.7 dargestellt.

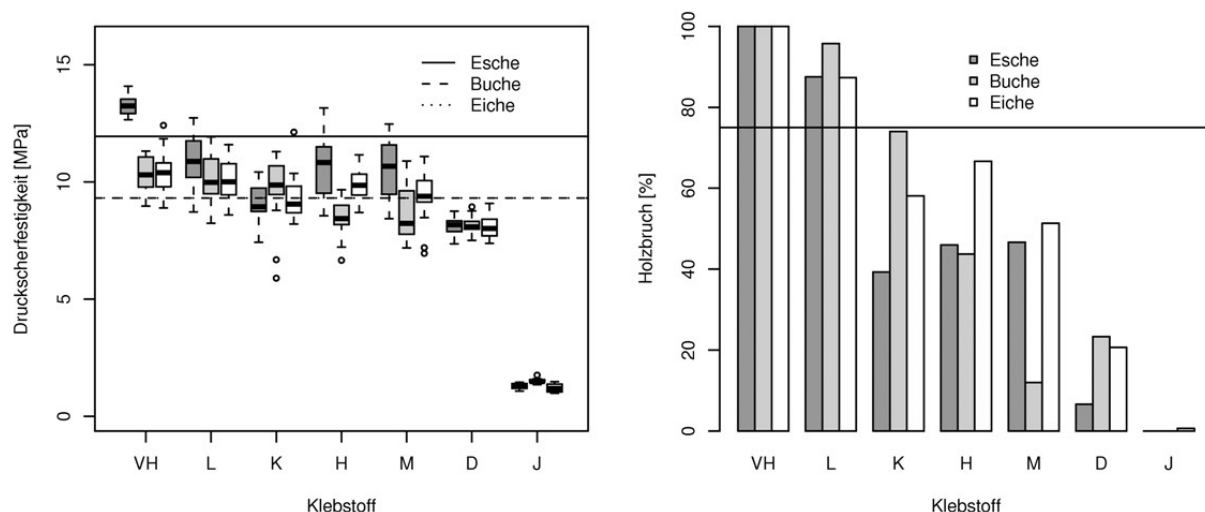


Bild 4.7: Ergebnisse der Druckscherversuche nach ASTM D 2559 – 04. Im linken Diagramm ist die erzielte Druckscherfestigkeit dargestellt, in dem rechts stehendem Säulendiagramm die Mittelwerte des Holzbruchs für die jeweilige Holz-Klebstoff-Kombination. Die horizontalen Linien stellen die Mindestanforderungen dar: links die 90% Werte der Druckscherfestigkeit des jeweiligen Vollholzes, rechts einen Mindestholzbruch von 75%.

Die Druckscherversuche nach ASTM D 2559 – 04 zeigten ein ähnliches Ergebnis wie der Zugscherversuch nach DIN EN 302 – 1. Die Druckscherfestigkeiten der steifen 1K-PUR-Klebstoffe liegen im Bereich des PRF Harzes, das bei fast allen Holz-Klebstoff-Kombinationen die höchsten Druckscherfestigkeiten erreichte. Der 1K-PUR-Bauklebstoff und der 1K-PUR-Dichtstoff wiesen die geringste Druckscherfestigkeit auf, wobei der Dichtstoff unter dem steiferem Bauklebstoff lag.

Der Standard ASTM D 2559 – 04 (2004) stellt an die Verklebung zwei Anforderungen. Zum einen ist dies ein Holzbruchanteil, der im Mittel mindestens 75% betragen muss, zum anderen ist eine Mindest-Druckscherfestigkeit gefordert. Die Druckscherfestigkeit der Holz-Klebstoff-Kombination muss dabei mindestens 90% der Druckscherfestigkeit der eingesetzten Holzart betragen.

Da die Druckscherfestigkeitsversuche von Esche sehr hohe Werte erzielte, konnte keine Kombination eines der eingesetzten Klebstoffe mit dieser Holzart diese Anforderung erfüllen. Das PRF Harz erzielte die erforderliche Druckscherfestigkeit für die Holzarten Eiche und Buche. Die Kombinationen der 1K-PUR-Klebstoffe K mit Buche und H mit Eiche überstiegen ebenfalls die Anforderung an die Druckscherfestigkeit. Den geforderten Holzbruch von 75% erreichten allerdings nur die Prüfkörper, die mit dem PRF Harz verklebt waren. Der niedrige Holzbruchanteil der 1K-PUR-Klebstoffe verhindert das Erreichen der Anforderungen.

Die von Pitzner et al. (2001) festgestellten Unterschiede der Druckscherfestigkeit von Verklebungen innerhalb einer Klebstoffart, zeigte sich auch bei diesen Versuchen.

4.3.3 Druckscherversuch nach Kochwasserlagerung

Vor der Durchführung der Druckscherprüfung nach der Kochwasserlagerung wurde überprüft, ob die Prüfkörper nach ASTM D 2559 – 04 innerhalb von sechs Stunden Kochwasserlagerung das maximale Quellmass erreichen. In Bild 4.8 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt.

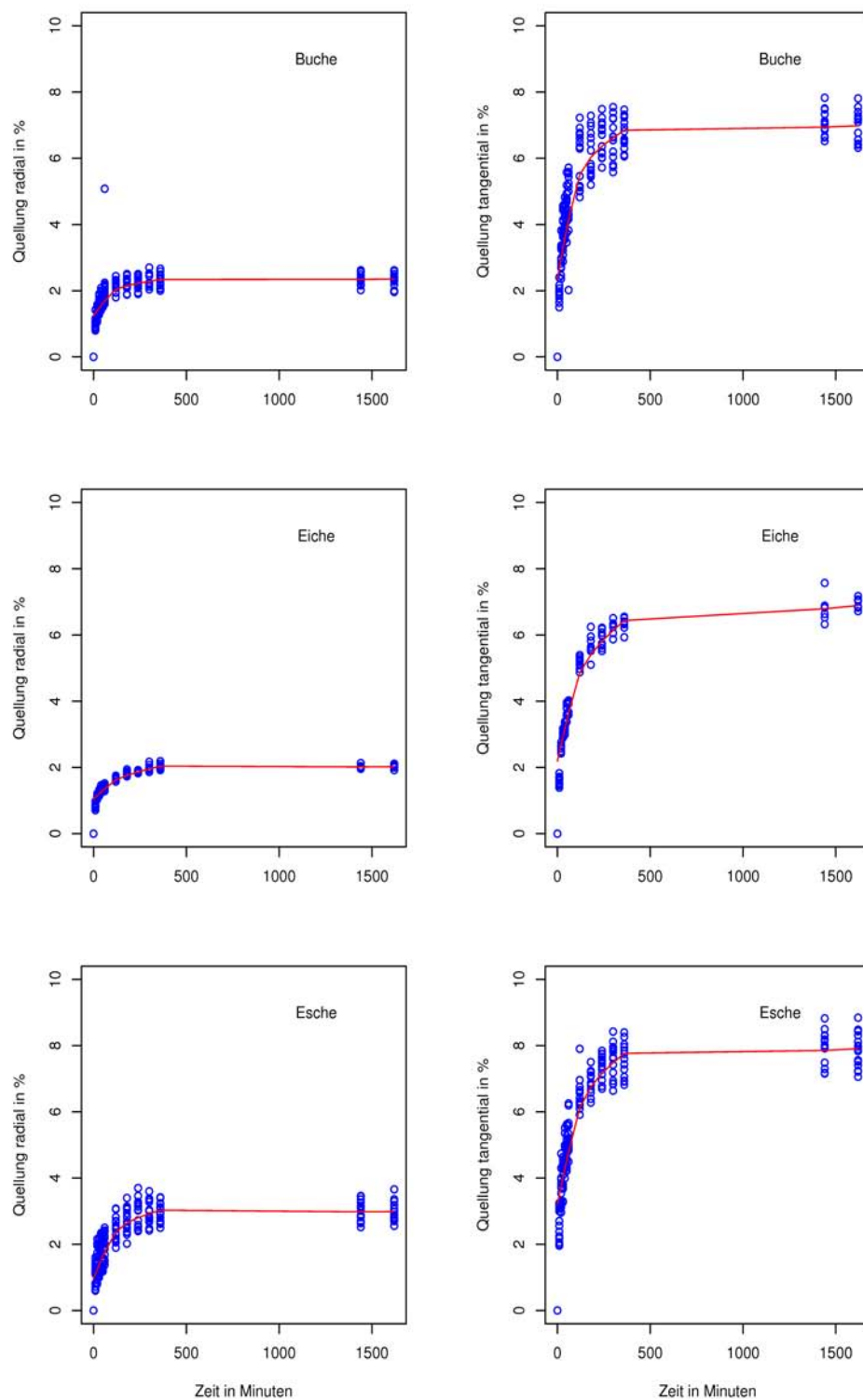


Bild 4.8: Prozentuale Zunahme der Abmessungen in den holzanatomischen Richtungen radial und tangential an Proben aus Buche, Eiche und Esche während einer Kochwasser-Lagerung

Wie Bild 4.8 zeigt, quillt lediglich Eiche in tangentialer Richtung nach sechs Stunden Lagerung in kochendem Wasser weiter. Da die Abmessungen der ASTM D 2559 – 04 (2004) Prüfkörper kleinere Abmessungen besitzen und die Prüfkörper zur Aufnahme der Masse nach den angegebenen Zeiten aus dem Wasser genommen wurden, ist nach sechs durchgehenden Stunden Lagerung in kochendem Wasser in tangentialer und radialer Richtung nicht mit einer weiteren Quellung zu rechnen. In Tab. 4.6 sind die gemessenen maximalen Quellmasse neben Werten aus der Literatur dargestellt. Die gemessenen Werte für Buche weisen dabei keine grossen Unterschiede zur den Literaturwerten auf. Die unterschiedlichen maximalen Quellmasse aus Messung und Literatur bei Esche liegen an den verwendeten Prüfkörpern und deren nicht exakt radial/tangential ausgerichteten Jahrringlage.

Tab. 4.6: Darstellung der gemessenen maximalen Quellmasse und Vergleich mit Werten aus Niemz (1993)

Holzart		Holzantonomische Richtung		
		radial	tangential	longitudinal
Buche	Messung	5,91	13,77	0,18
	Literatur	6,2	13,4	0,2-0,6
Eiche	Messung	6,31	7,23	0,24
	Literatur	4,6	10,9	0,3-0,6
Esche	Messung	5,56	9,59	0,26
	Literatur	N/A	N/A	N/A

Die Ergebnisse der Druckscherprüfung mit Prüfkörpern, die der Kochwasserlagerung unterzogen wurden, sind in Bild 4.9 dargestellt. Im linken Diagramm ist die erreichte Druckscherfestigkeit dargestellt, im links stehenden Säulendiagramm ist der Holzbruch dargestellt. Die 90% Werte der Druckscherfestigkeit von Vollholz sind auch in diese Grafiken eingezeichnet.

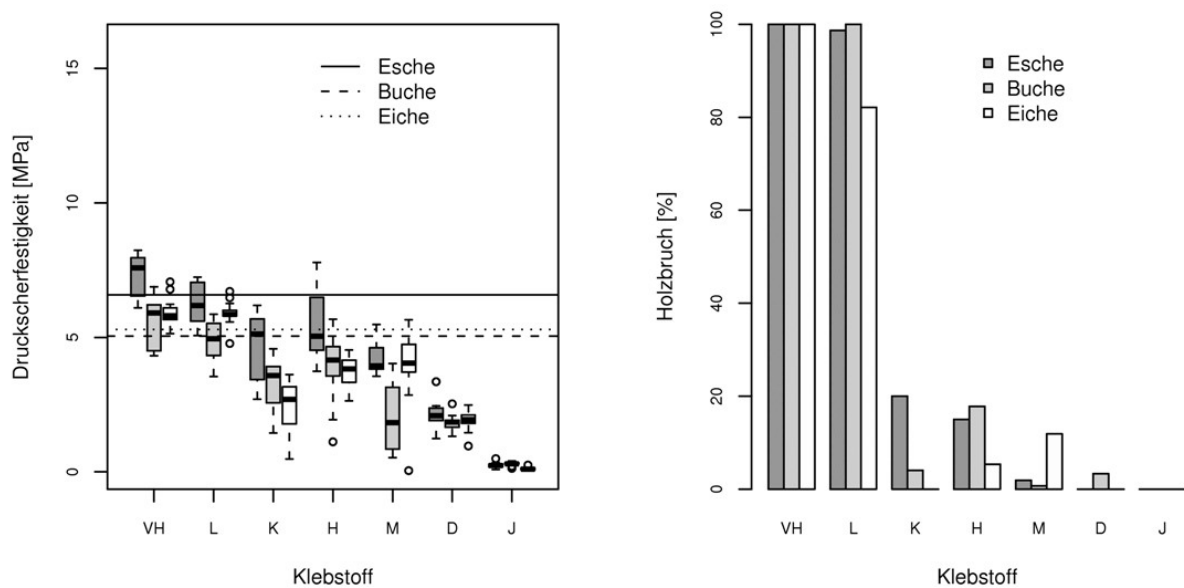


Bild 4.9: Ergebnisse der Druckscherversuche nach ASTM D 2559 – 04 (2004) nach der Kochwasserlagerung. Im linken Diagramm sind die erzielten Druckscherfestigkeiten dargestellt, in dem rechts stehendem Säulendiagramm die Mittelwerte des Holzbruchs für die jeweilige Holz-Klebstoff-Kombination. Die horizontalen Linien im rechten Diagramm stellen die 90% Werte der Druckscherfestigkeit des jeweiligen Vollholzes dar

Clauss et al. (2008) stellten bei einer Kochwasserlagerung von Zugscherproben nach DIN EN 302 – 1 für Vollholz eine um 40% verringerte Zugscherfestigkeit (im Vergleich zu normalklimatisierten Proben) fest. Die Werte der Druckscherversuche mit Vollholzproben zeigten ein ähnliches Verhalten. Die Kochwasserlagerung verminderte die Druckscherfestigkeiten bei allen verwendeten Hölzern um deutlich über 40%.

Der Holzbruch nahm bei allen 1K-PUR-Klebstoffen deutlich ab, wie Bild 4.9 zeigt. Prüfkörper die mit dem PRF Harz verklebt waren, zeigten nach der Kochwasserlagerung für Esche und Buche einen höheren Holzbruch, als die gleichen Prüfkörper, die im normalklimatisierten Zustand geprüft wurden. Durch den Einsatz eines elastischen Klebstoffs konnten die Spannungen nicht reduziert werden. Die Druckscherfestigkeit des 1K-PUR-Dichtstoffs (J) verringerte sich im Mittel um 80 bis 90%, die des 1K-PUR-Bauklebstoffs (D) um bis knapp 80%, im Vergleich zu den Werten der Druckscherfestigkeit normalklimatisierter Prüfkörper. Der Verlust an Druckscherfestigkeit bei den steifen 1K-PUR-Klebstoffen lag zwischen 49 und 63%. Den geringsten Ver-

lust zeigt wiederum das PRF Harz mit 42 bis 52%. Dadurch zeigt sich, dass eine Elastifizierung der Klebstofffuge nicht den gewünschten Effekt bringt, den Verlust an Scherfestigkeit in Folge der Kochwasserlagerung zu mindern.

Wie die Versuche zeigten, wird durch die Kochwasserlagerung die Druckscherfestigkeit von Vollholz gemindert. Bei Verklebungen tritt bei selber Behandlung ebenfalls eine Verringerung der Druckscherfestigkeit auf, übersteigt aber den Verlust an Druckscherfestigkeit von Vollholz. Für zukünftige Arbeiten wäre es interessant zu untersuchen, ob auch der Klebstoff an Festigkeit verliert. Behält der Klebstoff bei der Kochwasserlagerung seine Festigkeit könnte darauf geschlossen werden, ob die Verbindung von Klebstoff und Holz geschädigt wird.

4.4 Zusammenfassung

In der Arbeit wurden verschiedene Holz-Klebstoff-Kombinationen betrachtet. Als Hölzer wurden Buche, Eiche und Esche verwendet. Untersucht wurde insbesondere der Einfluss von 1K-PUR-Klebstoffen mit unterschiedlichen E-Moduln. Um die Tauglichkeit der Verklebungen zu überprüfen, wurden Zug- und Druckscherversuche durchgeführt. Die Prüfkörper wurden für beide Versuchsarten im Normalklima konditioniert. Für die Druckscherversuche wurden Prüfkörper von ausgewählten Holz-Klebstoff-Kombinationen einer Kochwasserlagerung unterzogen. Mit der Kochwasserlagerung wurde eine starke Beanspruchung der Klebstofffuge simuliert. Die Prüfkörper quollen dabei auf und Eigenspannungen wurden in der Klebstofffuge erzeugt. Mit elastischen 1K-PUR-Klebstoffen wurde untersucht, ob eine elastische Klebstofffuge in der Lage ist, die durch die Quellung entstehenden Spannungen auszugleichen.

Die Zugscherfestigkeit der Holz-Klebstoff-Kombinationen hing insbesondere vom E-Modul des eingesetzten Klebstoffs ab. Die verwendeten 1K-PUR-Klebstoffe, die bereits für die Verklebung von Brettschichtholz aus Nadelholz eingesetzt werden, erreichten durchweg hohe Zugscherfestigkeiten von meist über 10 MPa und erfüllten somit die Anforderungen nach DIN EN 15425 (2008). Mit abnehmendem E-Modul sank die Zugscherfestigkeit. Die elastischen 1K-PUR-Systeme, die für die Verwen-

dung als Dichtstoff oder Bauklebstoff eingesetzt werden, erreichten wesentlich niedrigere Zugscherfestigkeiten.

Die Ergebnisse der Druckscherversuche ähnelten den der Zugscherversuche. Die steifen 1K-PUR-Klebstoffe erzielten Druckscherfestigkeiten, die auf dem Niveau des zum Vergleich eingesetzten PRF Harzes lagen. Mit abnehmendem E-Modul zeigten sich auch hier geringere Druckscherfestigkeiten. Die Anforderungen des Standard konnten hingegen nur von den Kombinationen mit Buche und Eiche mit dem PRF Harz erzielt werden. Zum einen wird von dem Standard eine Mindest-Druckscherfestigkeit gefordert, die 90% der Scherfestigkeit des jeweiligen Vollholzes entspricht, zum anderen wird ein Mindest-Holzbruchanteil von 75% verlangt. Die Druckscherfestigkeit von Esche lag dabei so hoch, dass keine Klebverbindung den geforderten 90% Wert erreichte. Die 1K-PUR-Klebstoffe scheiterten an dem geforderten Holzbruch von 75%.

Durch die Kochwasserlagerung wurde die Druckscherfestigkeit stark herabgesetzt. Dies galt zum einen für alle geprüften Holz-Klebstoffverbindungen, wie auch für das Vollholz. Die eingesetzten 1K-PUR-Systeme, die einen niedrigen E-Modul besaßen, konnten die Erwartung, die entstehenden Spannungen infolge der Quellung aufzunehmen, nicht erfüllen. Der Verlust an Druckscherfestigkeit nach der Kochwasserlagerung war grösser als bei den steiferen Klebstoffen.

Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass steife 1K-PUR-Klebstoffe in der Lage sind, hohe Scherfestigkeiten bei der Verklebung von Laubhölzern zu erzielen. Durch die Kochwasserlagerung sank die Scherfestigkeit. Der Einsatz von elastischen 1K-PUR-Klebstoffen, die entstehende Spannungen ausgleichen sollten, brachten nicht den gewünschten Effekt. Die Scherfestigkeit sank bei Kochwasserlagerung stärker ab als bei den steiferen Klebstoffen. Weiter zeigten die Versuche, dass jede Klebstoffart-Holzart-Kombination für sich auf Brauchbarkeit geprüft werden muss.

Literaturverzeichnis

- Aicher S & Reinhardt HW (2007) Delaminierungseigenschaften und Scherfestigkeiten von verklebten rotkernigen Buchenholzlamellen. *European Journal of Wood and Wood Products* **65**, 125-136.
- ASTM D 2550 – 04 (2004) Adhesives for Structural Laminated Wood Products for Use Under Exterior (Wet Use) Exposure Conditions - ASTM International
- Bernasconi A (2004) Verleimung von Laubholz für den tragenden Einsatz. *Schweizer Zeitschrift für Forstwesen* **155**, 533-539.
- Brockhaus FA (1970) *Brockhaus Enzyklopädie*. Wiesbaden.
- Brockmann W, Geiß PL, Klingen J & Schröder KB (2005) *Klebtechnik - Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*. Weinheim: Wiley-VCH
- Cioldi F, Herold A & Ulmer U (2009) Waldressourcen nach Produktionsregionen. *Landesforstinventar Info* **10**, 1-6.
- Choi S-S (2000) Influence of Mixing Procedure on Properties of Carbon Black-Filled Natural Rubber Compounds. *Korea Polymer Journal* **8**, 192-198.
- Choi S-S (2001) Preblending Effect of Biblends on Properties of the Carbon Black-Filled Rubber Compounds. *Korea Polymer Journal* **9**, 37-44.
- Clad W (1964) Über das Wesen einer Verklebung und die Fugenelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen, Technische Hochschule.
- Clauß S, Kläuser O, Allenspach K, Niemz P, Bächle F & Dijkstra J (2008) Untersuchung zur Optimierung von 1K-PUR Klebstoffen für die Verklebung von Vollholz. In *Interne Berichte*. Zürich: ETH Zürich / Institut für Baustoffe / Holzphysik.

- DIN 52182 (1976) Prüfung von Holz - Bestimmung der Rohdichte. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 52184 (1979) Prüfung von Holz - Bestimmung der Quellung und Schwindung. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 53535 (1982) Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Grundlagen für dynamische Prüfverfahren. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 205 (2003) Klebstoffe - Holzklebstoffe für nicht tragende Anwendungen - Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebung im Zugversuch. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 302 – 1 (2004) Klebstoffe für tragende Bauteile - Prüfverfahren - Bestimmung der Längszugscherfestigkeit. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 302 - 2 (2004) Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 392 (1996) Brettschichtholz - Scherprüfung der Leimfugen. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 923 (2008) Klebstoffe - Benennung und Definition. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 927 – 6 (2006) Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich - Künstliche Bewitterung von Holzbeschichtungen mit fluoreszierenden UV-Lampen und Wasser. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 13183 - 1 (2002) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Bestimmung durch Darrverfahren. Deutsches Institut für Normung e. V.

- DIN EN 15425 (2008) Klebstoffe - Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 14080 (2009) Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN 68364 (2003) Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 527 - 1 (1996) Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Allgemeine Grundsätze. Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN EN ISO 527 - 3 (2003) Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Prüfbedingungen für Folien und Tafeln. Deutsches Institut für Normung e. V.
- Dunky M & Niemz P (2002) *Holzwerkstoffe und Leime - Technologie und Einflussfaktoren*. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio: Springer.
- Gereke T (2009) Moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels, ETH Zürich.
- Habenicht G (2009) *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Haß P (2007) Untersuchungen zum Spannungsverhalten von Massivholzplatten mit substituierter Mittellage, TU Dresden.
- Hübner U (2007) Laubhölzer im Bauwesen sind noch Exoten. *Holz-Zentralblatt* **133**, 980-981.
- Kägi A, Niemz P & Mandallaz D (2006) Einfluss der Holzfeuchte und ausgewählter technologischer Parameter auf die Verklebung mit 1K-PUR Klebstoffen unter

- extremen klimatischen Bedingungen. *European Journal of Wood and Wood Products* **64**, 261-268.
- Kollmann F (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer.
- Konnerth J, Gindl W & Müller U (2007) Elastic properties of adhesive polymers. I. Polymer films by means of electronic speckle pattern interferometry. *Journal of Applied Polymer Science* **103**, 3936-3939.
- Krackler V, Keunecke D & Niemz P (2010) Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz. In *Teilbereich der Gesamtstudie: Entscheidungsgrundlagen zur Förderung von Laubholzverarbeitung und -absatz im Rahmen des „Aktionplan Holz“ des Bundesamt für Umwelt (BAFU)*. Zürich: Institut für Baustoffe, ETH Zürich.
- Münch E (1937/38) Statik und Dynamik des Baumes. *Flora oder allgemeine botanische Zeitung* **132**, 357-424.
- Nakamae K, Nishino T, Asaoka S & Sudaryanto (1996) Microphase separation and surface properties of segmented polyurethane--Effect of hard segment content. *International Journal of Adhesion and Adhesives* **16**, 233-239.
- Niemz P & Allenspach K (2009) Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf das Versagensverhalten von ausgewählten Klebstoffen bei Zugscherbeanspruchung. *Bauphysik* **31**, 296-304.
- Niemz P (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW.
- Niemz P (2007) Werkstoffe aus Holz. In *Taschenbuch der Holztechnik*, pp. 127-259 [A Wagenführ and F Scholz, editors]. Leipzig: Scholz, Frieder.

- Nomura Y, Sato A, Sato S, Mori H & Endo T (2008) Synthesis of novel moisture-curable polyurethanes end-capped with alkoxysilane and use as solvent-free elastic adhesives. *Journal of Applied Polymer Science* **108**, 236-244.
- Ohnesorge D, Hennig M & Becker G (2009) Bedeutung von Laubholz bei der Brettschichtholzherstellung. *Holztechnologie* **6**, 47-49.
- Pitzner B, Bernasconi A & Frühwald A (2001) Verklebung einheimischer dauerhafter Holzarten zur Sicherung von Marktbereichen im Außenbereich, pp. 74. Hamburg: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.
- Schärer W, Walker D & Gautschi M (2006) Starkholz und Laubholz in der Schweiz: gestern, heute, morgen. *Schweizer Zeitschrift für Forstwesen* **12/06**, 556-560.
- SIA 265 (2003) Holzbau - Architektenverein SI-u
- Schmidt M, Frese M, Blaß HJ & Glos P (2010a) Bauaufsichtlich zugelassen - Hochfestes Brettschichtholz aus Buche. *Holz-Zentralblatt* **4**, 98-99.
- Schmidt M, Glos P & Wegener G (2010b) Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. *European Journal of Wood and Wood Products* **68**, 43-57.
- Schnider T (2007) Eignung mittlerer Stammabschnitte aus Schweizer Laubholz für neuartige Holzwerkstoffe, Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau.
- Swanson F (1977) The evaluation of internal cracking in polyurethane adhesives. *Polymer Engineering & Science* **17**, 122-125.
- Sykes MT & Prentice IC (1996) Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern Europe. *Climatic Change* **34**, 161-177.
- Trendelenburg R & Mayer-Wegelin H (1955) *Das Holz als Rohstoff*. München: C. Hanser

- Trübswetter T (2006) *Holztrocknung - Verfahren zur Trocknung von Schnittholz - Planung von Trocknungsanlagen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Wagenführ R (1996) *Holzatlas*, 4 ed. Leipzig: Fachbuchverlag.
- Weiss P (1966) The polymer concept in adhesives. *Journal of Polymer Science: Part C* **12**, 169-183.
- Welling J (1988) Die modellmäßige Erfassung von Trocknungsspannungen während der Kammertrocknung von Schnittholz. *European Journal of Wood and Wood Products* **46**, 295-300.
- Zeppenfeld G & Grunwald D (2005) *Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie*. Leinfelden-Echterdingen: Karl Weinbrenner & Söhne GmbH & Co. KG.

Verzeichnis der Bilder

Bild 1.1: Verteilung des Buchen- und Fichtenbestandes momentan und zukünftig anhand von Berechnungsmodellen (Quelle: modifiziert nach Sykes und Prentice (1996) , Seite 166).....	7
Bild 1.2: Feuchtegefälle über dem Holzquerschnitt bei der Trocknung; die Zahlenwerte bei den Kurven geben die Trocknungszeit in Minuten an (Quelle: Niemz (1993), Seite 63).....	9
Bild 1.3: Übersicht über Adhäsionstheorien (Quelle: modifiziert nach Brockmann et al. (2005), Seite 15).....	11
Bild 1.4: Abhängigkeit der Oberflächenbenetzbarkeit vom Benetzungswinkel (Quelle: Brockmann et al. (2005), Seite 113).....	12
Bild 1.5: Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Abbindemechanismus (Quelle: modifiziert nach Habenicht (2009), Seite 6).....	13
Bild 1.6: Reaktion eines 1K-PUR Klebstoffes unter Einwirkung von Wasser (H ₂ O) und Abspaltung von Kohlendioxid (CO ₂) (Quelle: Habenicht (2009), Seite 97). .	15
Bild 2.1: Rakel mit verstellbarer Auftragsdicke zum Ziehen von Klebstofffilmen mit Abmessungen in mm.....	19
Bild 2.2: Prüfkörper mit Abmessungen in mm für die Zugversuche an Klebstofffilmen.	19
Bild 2.3: Spannungs-Dehnungsdiagramme mit Mittelwertkurven für steife 1K-PUR-Klebstoffe und elastische 1K-PUR-Dichtstoffe, PRF und PVAc Klebstoffe. Mittelwertkurven rot, grauer Hintergrund stellt die Standardabweichungen an jedem einzelnen Punkt dar.....	23
Bild 2.4: Zugfestigkeiten und Zugmoduln der 1K-PUR-Klebstoffe Mirapur 9500 Speed (MP9500speed), PURBOND HB 110 (HB110), PURWELD 1302 (PW 1302), PURBOND HB S409 (HB S409) und PURBOND HB 181 (HB181). Punkte stellen Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar. Regressionsgerade grün.....	25

Bild 2.5: E-Moduln und 50% Moduln elastomerer 1K-PUR-Klebstoffe. Punkte stellen Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar. Regressionsgerade grün.....	27
Bild 2.6: Festigkeiten, Steifigkeiten und Poissonzahlen von Kauramin 683 (MUF) und Prefere 4040 (PRF) Klebstofffilmen. Punkte und Balken stellen die Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar.....	28
Bild 2.7: Festigkeiten, Steifigkeiten und Poissonzahlen von PVAc-Klebstoffen. Punkte und Balken stellen die Mittelwerte, Whisker die Standardabweichungen dar.	29
Bild 2.8: Zugschermodule und Zugscherfestigkeiten von 1K-PUR-Klebstoffen mit dünner (PURBOND HB S409, PURWELD 1302 und Mirapur 9500 Speed) und dicker Klebfuge (Sikaflex®-228 (Marine), SikaBond®-T52FC, Miraflex 9560 und Miraflex 9550), gemessen an Zugscherproben nach EN 205. Punkte stellen Mittelwerte, Whisker Standardabweichungen dar.....	31
Bild 2.9: Mittelwerte der Brucharbeit aus den statischen Zugscherversuchen mit den Klebstoffen Sikaflex®-228 (Marine), SikaBond®-T52, Miraflex 9560, Miraflex 9550, Mirapur 9500 Speed, PURWELD 1302 und PURBOND HB S409.....	32
Bild 2.10: Zugschermodule aus Zugscherproben und errechnete Schubmodule aus Zugversuchen für steife (a) und elastomere (b) PU Klebstoffe.....	33
Bild 2.11: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei zyklischen Zugscherversuchen. Bestimmung des Elastizitätsmoduls aus den Hystereseschleifen.....	34
Bild 2.12: Zugscherproben mit dicker (Miraflex 9550 und SikaBond®-T52FC) und dünner (PURWELD 1302) Klebstofffuge bei zyklischer Belastung. Darstellung der Entfestigung der Verklebung über die Anzahl der Lastzyklen und unterschiedlichen Lastniveaus (rot 50%, grün 20%, blau 10% der im Zugscherversuch ermittelten Zugscherfestigkeit).....	35
Bild 3.1: Herstellen der dicken Klebefugen durch Abziehen des Klebstoffes.....	44
Bild 3.2: Prüfkörper mit Angabe der Fugenanordnung.....	44
Bild 3.3: Versuchsaufbau der freien Quellung.....	47
Bild 3.4: Deutlich erkennbarer Randeinfluss bei dicke Klebfuge.....	47

Bild 3.5: Schematische Darstellung zum Aufschneiden der Prüfkörperplatten zu Streifen (Quelle: modifiziert nach Schnider (2007), Seite 52).....	50
Bild 3.6: Schematische Darstellung der aufgetrennten Plattenschichten (Quelle: modifiziert nach Schnider (2007), Seite 53).....	50
Bild 3.7: Ultraschallprüfgerät Ultrasonic Tester BPV.....	52
Bild 3.8: Spannungs-Dehnungsdiagramm von Holz (Quelle: Niemz (1993), Seite 147)	53
Bild 3.9: VIC 2D Kamera.....	54
Bild 3.10: Airbrush-Gerät.....	54
Bild 3.11: Speckle-Muster eines Prüfkörpers.....	54
Bild 3.12: Aufbau des Prüfstandes zur Aufnahme der Prüfkörper mittels VIC 2D (links die beiden Kameras, rechts oben sechs der Prüfkörper).....	55
Bild 3.13: QUV Schnellbewitterungsgerät der Firma Q-LAB (rechts Modellbeispiel, links Schnittdarstellung der Prüfeinheit mit Detailbezeichnungen) (Quelle: www.q-lab.eu).....	56
Bild 3.14: Prüfkörper des Versuches Rissbildung zur Veranschaulichung der Klebstofffugenzuordnung.....	61
Bild 3.15: Risswachstum in den Klebstofffugen senkrecht zum Faserverlauf der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach der Überführung vom Feuchtklima 20/85 ins Trockenklima 20/35; mittlere Summe der Risslängen in Prozent, bezogen auf die Klebstofffugenlänge der Prüfkörper mit 0,1mm SikaBond®-T52FC- Klebstofffuge (gesondert betrachtet nach Klebfugen zwischen Laubholzdeckschicht/Mittelschicht und Nadelholzdeckschicht/Mittelschicht (-FI)).....	62
Bild 3.16: Risswachstum in den Klebstofffugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach der Überführung vom Feuchtklima 20/85 ins Trockenklima 20/35; mittlere Summe der Risslängen in Prozent, bezogen auf die Klebstofffugenlänge der Prüfkörper mit 0,1mm SikaBond®-T52FC- Klebstofffuge (gesondert	

betrachtet nach Klebfugen zwischen Laubholzdeckschicht/Mittelschicht und Nadelholzdeckschicht/Mittelschicht (-FI)).....	62
Bild 3.17: Vorhandene Eigenspannungen in den Decklagen und Unterlagen dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach siebentägiger Lagerung im Feuchtklima 20/85, Ausgangsklima: Trockenklima 20/35; Decklage: B1...B3 Buche, E1 Esche, Unterlage: B2...B3 Buche, B1 und E1 Fichte.....	65
Bild 3.18: Ansicht einer geprüften Schmalfläche mit Definition der Dehnungsrichtungen und Angabe der zur Auswertung genutzten Bereiche.....	67
Bild 3.19: Verlauf der Dehnungsentwicklung in eyy-Richtung dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau über den Prüfzeitraum von sieben Tagen im Feuchtklima 20/85 nach Überführung vom Trockenklima 20/35 am Beispiel eines Prüfkörpers mit 0,1 mm dicker PURWELD 1302 Klebstofffuge.	68
Bild 3.20: Berechnete Dehnungen in exx-Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach dreitägiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Buche/Buche mit 0,1 mm PURWELD 1302 Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35.....	69
Bild 3.21: Verlauf der mittleren Dehnungen in exx-Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau drei Tage nach der Überführung vom Trockenklima 20/35 ins Feuchtklima 20/85; erfasst am Rand und in der Mitte der Prüfkörper (siehe Bild 3.18).....	70
Bild 3.22: Berechnete Dehnungen in eyy-Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach vierstündiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte mit 0,1 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35.....	71
Bild 3.23: Berechnete Dehnungen in eyy-Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach vierstündiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte mit 2 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35.....	71

Bild 3.24: Berechnete Dehnungen in eyy-Richtung an dreischichtigen Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau nach vierstündiger Lagerung im Feuchtklima 20/85 am Beispiel des Plattenaufbaus Buche/Fichte/Fichte mit 0,1 mm (S01) und 2 mm (S2) SikaBond®-T52FC Klebstofffuge; Ausgangsklima: Trockenklima 20/35; erfasst am Rand und in der Mitte der Prüfkörper (siehe Abb. 4.5).....	73
Bild 3.25: Während der künstlichen Bewitterung entstandene Risse in den Deckschichten am Beispiel von Buche a) feine Haarrisse, b) Ausschnitt eines grossen Risses.....	75
Bild 3.26: Risswachstum in den Klebstofffugen parallel zum Faserverlauf der Deckschichten dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau unter Einfluss künstlicher Bewitterung; mittlere Summe der Risse in Prozent, bezogen auf die Klebstofffugenlänge der Prüfkörper mit 0,1 mm PURWELD 1302 Klebstofffuge und 0,1 mm SikaBond®-T52FC Klebstofffuge zwischen künstlich bewitterter Deckschicht und Mittelschicht.....	76
Bild 3.27: a) Delaminierung der Deckschicht; b) Rissbildung durch Holzbruch; c) Ausschnitt eines aufgetrennten Prüfkörpers mit dicker Klebstofffuge.....	77
Bild 3.28: a) Deformation der bewitterten Deckschicht auf Grund von Delaminierungen; b) Deformation des Prüfkörpers längs zum Faserverlauf der Deckschichten.....	78
Bild 3.29: Entwicklung des Farbverlaufes einer Deckschicht aus Buche im Laufe der künstlichen Bewitterung unter Einsatz des Kondensationsverfahrens zur Befeuchtung der Prüfkörper.....	79
Bild 4.1: Probe mit Abmessungen für die Versuche nach DIN EN 302 – 1 (2004).....	93
Bild 4.2: Eingespannte Probe im Zugscherversuch nach DIN EN 302 – 1	94
Bild 4.3: Unterschiedlich geschätzter Holzbruchanteil an Prüfkörpern aus Eiche, verklebt mit einem PRF Harz: links 10%, Mitte 60% und rechts 100%.....	95
Bild 4.4: Probe mit Massen für die Versuche nach ASTM D 2559 - 04 (2004).....	96
Bild 4.5: Druckscherversuch nach ASTM D 2559 - 04 (2004).....	97

- Bild 4.6: Ergebnisse der Zugscherversuche für die Holzarten Esche, Buche und Eiche. Die links stehenden Diagramme zeigen die Zugscherfestigkeit (horizontale Linie bei 10 MPa zeigt die Mindestanforderung nach DIN EN 15425 (2008)) für jeden verwendeten Klebstoff, die Säulendiagramme rechts die Mittelwerte für den Holzbruch bei dem jeweiligen Klebstoff..... 101
- Bild 4.7: Ergebnisse der Druckscherversuche nach ASTM D 2559 – 04. Im linken Diagramm ist die erzielte Druckscherfestigkeit dargestellt, in dem rechts stehendem Säulendiagramm die Mittelwerte des Holzbruchs für die jeweilige Holz-Klebstoff-Kombination. Die horizontalen Linien stellen die Mindestanforderungen dar: links die 90% Werte der Druckscherfestigkeit des jeweiligen Vollholzes, rechts einen Mindestholzbruch von 75%..... 103
- Bild 4.8: Prozentuale Zunahme der Abmessungen in den holzanatomischen Richtungen radial und tangential an Proben aus Buche, Eiche und Esche während einer Kochwasser-Lagerung..... 105
- Bild 4.9: Ergebnisse der Druckscherversuche nach ASTM D 2559 – 04 (2004) nach der Kochwasserlagerung. Im linken Diagramm sind die erzielten Druckscherfestigkeiten dargestellt, in dem rechts stehendem Säulendiagramm die Mittelwerte des Holzbruchs für die jeweilige Holz-Klebstoff-Kombination. Die horizontalen Linien im rechten Diagramm stellen die 90% Werte der Druckscherfestigkeit des jeweiligen Vollholzes dar..... 107

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1.1: Übersicht zur vorliegenden Arbeit. Aufgeführt sind die einzelnen Kapitel mit den darin beschriebenen Versuchen.....	16
Tab. 2.1: Verwendete Klebstoffe mit Hersteller, typischer Verwendung und Versuchen, denen sie unterzogen wurden.....	18
Tab. 2.2: Prüfungsgeschwindigkeiten für die untersuchten Klebstoffe im Zugversuch.....	21
Tab. 2.3: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Stichprobenumfang (n) für Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit und Poissonzahl von steifen 1K-PUR-Klebstoffen.....	24
Tab. 2.4: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (sd) und Stichprobenumfang (n) Elastizitätsmodul, 50% Modul und Poissonzahl für elastomere 1K-PUR-Klebstoffe.....	27
Tab. 2.5: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Stichprobenumfang (n) der ermittelten Werte für Formaldehydharze.....	28
Tab. 2.6: Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Stichprobenumfang (n) der ermittelten Werte für PVAc-Klebstoffe.....	29
Tab. 2.7: Ergebnisse der statischen Zugscherversuche als Mittelwerte (\bar{x}), Standardabweichungen (s) und Probenumfang (n).....	30
Tab. 3.1: Eigenschaften der verwendeten Holzarten nach Wagenführ (1996) und Niemz (1993).....	40
Tab. 3.2: Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe.....	41
Tab. 3.3: Abkürzungen der eingesetzten Klimata.....	42
Tab. 3.4: Pressparameter zur Herstellung der Breitflächenverklebungen.....	43
Tab. 3.5: Verwendete Bezeichnungen der Plattenaufbauten zur Kennzeichnung der Prüfkörper.....	45
Tab. 3.6: Verwendete Bezeichnungen der Versuche zur Kennzeichnung der Prüfkörper.....	45
Tab. 3.7: Parameter der angewandten künstlichen Bewitterung.....	56

Tab. 3.8: Im Versuch der freien Quellung erreichte Kennwerte dreischichtiger Massivholzplatten mit variablem Schichtaufbau.....	58
Tab. 4.1: Nutzungsklassen und anwendbarer Klebstofftyp nach DIN EN 14080 (2009) und DIN EN 1995 (2008).....	88
Tab. 4.2: Rohdichte und Holzfeuchte der in den Zug- und Druckscherversuchen verwendeten Hölzern.....	91
Tab. 4.3: Ausgewählte 1K – PUR Klebstoffe der am Projekt beteiligten Firmen und Vergleichsklebstoffe (Melamin-Harnstoff-Formaldehyd- und Resorcin-Phenol-Formaldehyd-Harz).....	92
Tab. 4.4: Art und Dauer der Behandlung vor der Zugscherprüfung (DIN EN 302 – 1 (2004)).....	98
Tab. 4.5: Aufschlüsselung der Bezeichnung der eingesetzten Klebstoffe und deren E-Modul (Herstellerangaben (He) und Werte aus Kapitel „Ermittlung von Kennwerte der Klebstoffe).....	100
Tab. 4.6: Darstellung der gemessenen maximalen Quellmasse und Vergleich mit Werten aus Niemz (1993).....	106