

DIBT Forschungsvorhaben ZP-52-5-13.179-1246/07

"Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharz-verklebter tragender Holzbauteile"

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der zentralen Fragestellung zur Langzeitbeständigkeit und Sicherheit harnstoffharzverklebter tragender Holzbauteile auf unterschiedlichen Ebenen und mittels komplementärer Methoden nachgegangen. In den Untersuchungen wurden zunächst literaturgestützt grundlegende Aspekte von Harnstoff-Formaldehyd(UF-)Harzen, Härtern, Streck- und Füllmitteln sowie typische Eigenschaften der UF-Klebstofffamilie analysiert. Hierzu wurden rd. 200 einschlägige Publikationen und Institutsberichte ausgewertet und divergierende Schlussfolgerungen zum Leistungsspektrum von UF-Verklebungen aufgezeigt.

Im Weiteren wurden an unterschiedlichen UF-Fabrikaten eingehende mechanisch-technologische und mikroskopische Untersuchungen zur Klebfugenfestigkeit und –beständigkeit sowie zu Bruchflächen durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden fünf UF-Harz-Fabrikate ausgewählt, die sich bezüglich der Harz-Härter-Füllstoff- und Mischungsverhältnisse erheblich unterscheiden.

Bei vier Harzen erfolgte der Klebstoffauftrag ausschließlich im sogenannten Untermischverfahren, wobei alle Klebstoffkomponenten – Harz, Härter, Füllstoffe und Wasser - vor dem Auftrag auf die Holzfügeteile zu einer gebrauchsfertigen Klebstofflotte vermischt werden. Bei einer Harz- Härter-Füllstoffkombination erfolgte der Klebstoffauftrag auch nach dem früher – bis in die 70iger Jahre - häufigen sogenannten Härter-Vorstreichverfahren. Bei dieser heute als „getrennter Harz- Härter-Auftrag“ bezeichneten Auftragsmethode wird die wässrige Härterlösung auf eines der beiden Fügeteile (Brettlamellen) aufgetragen und die Harz-Füllstoff-Wassermischung auf das andere Fügeteil. Das Zusammenfügen und Verpressen der Fügeteile darf erst nach vollständigem Abtrocknen der Härterlösung erfolgen, wofür in der Regel ein Zeitrahmen von 24 h vorgegeben wurde. Hinsichtlich der Abgrenzung des heute bei Flächenverklebungen meistens eingesetzten getrennten Harz- Härter-Auftrags vom sogenannten Härter-Vorstreichverfahren gilt, dass heute im Falle von getrenntem Auftrag die Harz- und Härterlösungen in flüssigem Zustand in eng beieinander liegenden Raupen auf dasselbe Fügeteil gegossen werden und die Vermischung und chemische Reaktion sodann in Gegenwart von „vergleichsweise“ hohem Druck unter Gewährleistung einer dünnen Klebstoffuge von höchstens 0,3 mm erfolgt.

Zur vergleichenden Bewertung aller sechs untersuchten Klebstoff- bzw. Auftrags-Konfigurationen wurden insgesamt 600 Proben für Längszugscher-, Blockscher- und Delaminierungsprüfungen gemäß heute gültiger europäischer Klebstoff- bzw. Brettschichtholz-Prüfnormen hergestellt und geprüft.

Die Längszugscherprüfungen nach DIN EN 302-1 ergaben erwartungsgemäß, dass die Festigkeiten nach Kochwasserlagerung sowohl bei den nass- als auch bei den wiedergetrocknet geprüften Proben bei Fugendicken von 0,1 mm und 1,0 mm die normativen Anforderungen der DIN EN 301 an den Klebstofftyp I auch nicht annähernd erreichten. Die Versuche bestätigen den bekannten Sachverhalt, dass UF-Harze nicht kochfest sind, da durch die Heißwassereinwirkung eine irreversible Bindungsspaltung erfolgt, womit auch nach Wiedertrocknung keine wesentlichen Trockenfestigkeiten mehr vorliegen. Hierzu ist anzumerken, dass die Kochwasser-Vorbehandlung der Proben nur für den Nachweis des Klebstofftyps I erforderlich ist und hierbei zusammen mit der Delaminierungsprüfung bei

hoher (Rücktrochnungs-)Temperatur den zentralen Unterschied zu den Prüfungen respektive Anforderungen an den Klebstofftyp II darstellt, dem UF-Harz-Klebstoffe durchweg zugeordnet sind. Bei Kaltwasservorbehandlung erfüllten hingegen alle im Untermischverfahren hergestellten Proben bei dünnen (0,1 mm) und dicken (1,0 mm) Fugen die normativen Anforderungen deutlich.

Bei getrenntem Harz-Härterauftrag wurden im Falle der dicken Klebstofffugen die Anforderungen an die Nassfestigkeit nach Kaltwasserlagerung in extremem Umfang nicht erfüllt und die Kaltwasser-Wiedertrockenfestigkeits-Anforderung wurde ebenfalls deutlich verfehlt. Die genannten, bei der 1,0 mm Fuge stark ausgeprägten Unzulänglichkeiten der im Härter-Vorstreich-Verfahren hergestellten UF-Klebstofffugen bei Kaltwasservorbehandlung deuteten sich bezüglich der Nassfestigkeitsdefizite bereits bei den dünnen Fugen (0,1 mm) an, wobei die Anforderungen hier soeben noch erfüllt wurden. Die Kaltwasser-Wiedertrockenfestigkeiten der dünnen Fuge lagen sodann jedoch wieder auf demselben sehr hohen Niveau wie die Trockenfestigkeiten.

Die Blockscherprüfungen wurden in Anlehnung an DIN EN 392 mit jeweils paarweise hergestellten Prüfkörpern sowohl trocken, als auch nass nach vorheriger 4tägiger Kaltwasserlagerung durchgeführt. Alle Prüfkörper wiesen eine Fugendicke im Bereich von rd. 0,05 – 0,15 mm auf. Die Trockenscherfestigkeiten aller Klebstoffkonfigurationen lagen auf einem sehr hohen Niveau und erfüllten die heutigen normativen Anforderungen der DIN EN 386 bei den Einzel- und Mittelwerten durchweg deutlich. Bei der kombinierten Bewertung von Scherfestigkeiten und Faserbruchanteilen entsprachen die meisten Einzelprüfkörper aller Klebstoffkonfigurationen einschließlich der im Vorstreichverfahren hergestellten Proben den Normanforderungen deutlich. Im Wesentlichen wurden auch die Anforderungen an die Durchschnittswerte erfüllt.

Da für eine Bewertung der Ergebnisse von Nass- Blockscherfestigkeitsprüfungen keine Normanforderungen existieren, wurden in dem Forschungsvorhaben plausible Anforderungswerte aus den in DIN EN 301 implizit festgelegten Nass-Trocken-Zugscherfestigkeitsverhältnissen abgeleitet. Die erhaltenen Verhältnismerte von Nass- zu Trockenblockscherfestigkeiten aller Klebstoffkonfigurationen betragen auf dem Mittelwert- und 5 %-Quantilniveau gleichermaßen rd. 0,55 und entsprachen damit den festgelegten Anforderungen.

Betrachtet man die Ergebnisse der im Untermisch- und Vorstreichverfahren hergestellten Blockscherprüfkörper getrennt, so ist festzustellen, dass die Festigkeitswerte der Verklebungen mittels Vorstreichverfahren im Mittel und auf dem 5 %-Quantilniveau rd. 10 % unter den mittleren Vergleichswerten der im Untermischverfahren hergestellten Prüfkörper liegen. Dieser auf dem Niveau der Kurzzeitfestigkeiten vergleichsweise geringe Unterschied spiegelt sich jedoch bei den Faserbruchanteilen ausgeprägter wieder. So betrug das mittlere Verhältnis des Holzfaserbruchanteils der Nass- zu Trockenprüfungen bei den im Untermischverfahren hergestellten Klebstoffkonfigurationen rd. 1,2. Im Gegensatz dazu wurde bei den im Vorstreichverfahren hergestellten Verklebungen ein deutlich abweichendes Verhältnis von rd. 0,8 erhalten.

Die Delaminierungsversuche nach DIN EN 302-2 wurden sowohl mit dem Verfahren mit niedriger (Rücktrochnungs-)Temperatur zum Nachweis des Klebstofftyps II als auch mit dem Verfahren mit hoher (Rücktrochnungs-)Temperatur zum Nachweis des Klebstofftyps I durchgeführt. Bei dem Verfahren mit hoher Temperatur wurden zur Beurteilung des Nachhärteverhaltens bei Raumtemperatur zwei verschiedene Aushärtezeiten, zum einen sieben Tage gemäß Norm und zum anderen acht Wochen untersucht.

Alle untersuchten Klebstoffkonfigurationen erfüllten die Anforderungen der DIN EN 301 an den Klebstofftyp II, wobei jedoch bezüglich des Auftragsverfahrens deutliche quantitative Unterschiede festzustellen waren. So genügten alle fünf im Untermischverfahren hergestellten und verarbeiteten Klebstoffkonfigurationen den Anforderungen an den Gesamtprozentsatz der Delaminierung mit Mittel- und Maximalwerten von rd. 1 % bis 2 % sehr deutlich. Im Gegensatz dazu lagen die entsprechenden Ergebnisse der im Vorstreichverfahren hergestellten Proben rd. 5fach höher und erfüllten die Anforderungen soeben noch.

Die Anforderungen der DIN EN 301 an den Klebstofftyp I wurden, so nicht gänzlich erwartet, von drei im Untermischverfahren hergestellten und verarbeiteten Klebstoffkonfigurationen bei normgemäßer einwöchiger Aushärte- bzw. Nachlagerzeit durchweg deutlich und in einem Falle mit ausgezeichneten Werten (Maximal- und Mittelwert des Gesamtprozentsatzes der Delaminierung 0,6 % bzw. 0,4 %; Anforderungswert: 5 %) erfüllt. Mit einer auf acht Wochen verlängerten Aushärtezeit erfüllten auch die beiden anderen im Untermischverfahren hergestellten Klebstoffkonfigurationen, die nach einwöchiger Aushärtung noch zu hohe Delaminierungswerte aufwiesen, die Anforderung ausreichend gut. Im Gegensatz dazu lagen die Versuchsergebnisse der im Härter-Vorstreichverfahren hergestellten Klebstoffkonfigurationen sowohl bei normgemäßer als auch bei achtfach längerer Nachhärtezeit extrem bzw. sehr deutlich über dem Anforderungswert.

Als Fazit der umfangreichen Untersuchungen an Kleinproben bleibt festzuhalten, dass im Untermischverfahren hergestellte UF-Verklebungen im untersuchten Fugendickenbereich von 0,1 mm bis 1 mm hohe Kurzzeit-Trocken- und Kaltwasser- Festigkeitseigenschaften auswiesen. Bei zweimonatiger Nachlagerungshärtung erfüllten auch alle untermischt hergestellten Verklebungen die heutigen normativen Typ I – Verklebungsanforderungen betreffend Delaminierungsbeständigkeit. Im Gegensatz hierzu belegten die Prüfungen nach unterschiedlichen Verfahren und Vorbehandlungen, dass UF-Verklebungen, die mittels Härter-Vorstreichverfahren hergestellt wurden insbesondere bei dicken Klebefugen erheblich geringere Leistungseigenschaften aufweisen als im Untermischverfahren verklebte Proben.

Das umfassendste Arbeitspaket des Forschungsvorhabens beinhaltete eingehende Zustandsuntersuchungen von insgesamt 71 Bauwerken mit UF-verklebten Brettschichtholz(BSH)-Trägern sowie von vier Bauwerken mit Kämpfstegträgern bzw. I- oder kastenförmigen Trägern mit Stegen aus Kämpf- oder Wolff-Stegplatten. Die Untersuchungen an den Bauteilen der Bestandsbauten umfassten umfangreiche visuelle und haptische Inspektionen einschließlich Rissvermessungen sowie Bohrkernentnahmen und –prüfungen.

Für die Auswahl relevanter Bauwerke mit einer möglichst großen Spanne von Nutzungszeiten oberhalb von rd. zehn Jahren wurden aufwändige Recherchen bei Holzleimbaubetrieben, in Institutsgutachten, Veröffentlichungen und in den Leimgenehmigungsakten des Otto-Graf-Instituts vorgenommen. Ein wesentlicher weiterer Fundus relevanter Bauwerke bestand in früheren oder laufenden Untersuchungen und Gutachten der forschenden Stelle, die von Bauwerksinhabern oder Nutzern im Zusammenhang mit der Umsetzung der Gebäuderichtlinie (2006), Nutzungsänderungen oder aus akutem Anlass, z.B. bei Feststellung von Rissen, beauftragt wurden.

Basierend auf der erhobenen Datenmenge wurde sodann eine Access-basierte Gebäude-Bauteildatenbank mit rd. 1700 Gebäudeeinträgen erstellt. Für das jeweilige Gebäude sind hierbei neben den Angaben zum Gebäudestandort u. a. die Geometrie und die Abmessungen der Bauteile,

das UF-Klebstofffabrikat (sofern erudierbar), die Gebäudenutzung und die (Klima-)Nutzungsklasse angegeben. Aus der Gesamtmenge der Gebäudeeinträge wurden letztlich 75 Objekte, eingeteilt in fünf Gebäudegruppen – KF, B, C, D und E – ausgewählt und begutachtet. Alle Träger der Gebäudegruppen KF, B, C und D repräsentieren Brettschichtholzträger und hierbei weit überwiegend (93%) Vollwandträger. Die Querschnittsbreiten und -höhen der Träger variierten von rd. 10 cm bis 22 cm bzw. von rd. 40 cm bis 240 cm. Die Spannweiten lagen im Bereich von rd. 6 m bis 36 m. Die Klimata der Gebäudegruppen KF, B, C und D waren, abgesehen von einer Ausnahme (Salzlagerhalle), den Nutzungsklassen 1 und 2 zuzuordnen. Insgesamt wurden rd. 800 Bauteile handnah untersucht und aus 240 Trägern wurden 639 Bohrkerne für Klebefugen-Festigkeits- und Beständigkeitsprüfungen entnommen.

Der Gebäudegruppe KF, die sechs Bauwerke mit Bauwerksaltern von 44 bis 51 Jahren umfasste, kam eine zentrale Rolle bei den Bauwerksbegutachtungen und Probenahmen zu. Die hervorgehobene Bedeutung der Gebäudegruppe KF resultiert aus dem Umstand, dass aus Bauteilen dieser Gebäude bereits 1977 im Rahmen einer Untersuchung zur Güte von UF-verklebten Bauteilen von Kolb und Frech umfangreich Bohrkerne entnommen und geprüft worden sind. Aus der Gesamtmenge der vormalig untersuchten neun Gebäude konnten sechs Objekte als noch bestehend ermittelt und neuerliche Untersuchungszustimmungen seitens der Gebäudenutzer/-inhaber eingeholt werden. Bei drei der sechs Gebäude konnten die seinerzeitigen nicht dokumentierten Bohrkern-Entnahmestellen lokalisiert werden und erneut Bohrkernproben in unmittelbarer Nähe zu den früheren Proben entnommen werden. Die neu entnommenen Bohrkerne wurden vor den mechanischen Prüfungen mit denselben Klima- bzw. Wasservorbehandlungen wie vormalig beaufschlagt.

Die Gebäudegruppe B umfasste insgesamt 13 große Bauwerke mit Bauwerksaltern zwischen 7 und 41 Jahren. Wie bei der Gebäudegruppe KF wurden die entnommenen Bohrkerne nach dem gleichen Schema wie bei den früheren Untersuchungen von Kolb und Frech aufgetrennt und sodann nach denselben Trocken-, Nass- und Wechselklimavorbehandlungen geprüft.

Die Gebäudegruppe C umfasste 38 begutachtete und beprobte Gebäude. Die aus den Trägern entnommenen Bohrkerne wurden ausschließlich nach Trockenlagerung geprüft.

Die Gebäudegruppe D bestand aus 14 Bauwerken, davon zehn baugleiche Tennishallen, die in den Auflagerbereichen bis zu rd. 2,5 m Höhe handnah inspiziert wurden sowie vier Produktions- und Lagerhallen, bei denen eingehende Rissaufnahmen stattfanden.. Auf Wunsch der Bauwerksinhaber wurden bei der Gebäudegruppe D überwiegend keine Bohrkernproben entnommen.

Die Gebäudegruppe E beinhaltete vier Bauwerke mit Kämpf-Trägern bzw. Kastenträgern mit Kämpf- oder Wolff-Stegplatten mit Bauwerksaltern von 39 bis 48 Jahren, bei denen Proben aus den Gurt- und Stegbereichen entnommen wurden.

Die Befunde der visuellen und haptischen Bauwerksinspektionen einschließlich der Rissvermessungen und der Feuchtemessungen sind für jedes Bauwerk in Form einer Kurzbeschreibung dokumentiert. Die Bauwerksbeschreibungen geben den allgemeinen Zustand der Gebäude, deren Nutzung, die gemessenen Holzfeuchten und, sofern vorhanden, Schäden und hier insbesondere Rissbildungen in den Klebefugen und/oder im Holz sowie aktuelle oder vormalige Wasserschäden wieder.

Die Ergebnisse der Bauwerksbegutachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei den 71 begutachteten Bauwerken mit BSH-Vollwandträgern einschließlich weniger (5) Fachwerk-, I- und

Kastenträger lagen an rd. 55 % der Holzbauteile Schäden in Form von Holz- und/oder Klebfugenrissen vor. Diesbezüglich ist anzumerken, dass die extrem hohe Anzahl von Bauwerken mit Schäden eindeutig nicht repräsentativ für die Gesamtheit der UF-verklebten Bestandsbauten ist. Der hohe prozentuale Anteil geschädigter Bauwerke, d.h. deren Holztragwerke, resultiert aus dem Umstand, dass eine Vielzahl der Gebäude aus gegebenem Anlass - Schadensfeststellung bzw. Schadensvermutung - begutachtet wurden. Betrachtet man ausschließlich gravierende Schäden, bei denen als alleinige oder wesentliche Ursache die Degradation der UF-Klebfugen bzw. des Holz-Klebfugen-Interfaces festgemacht wurde, so reduziert sich die Schadensmenge auf insgesamt zehn Bauwerke.¹

Die visuellen, haptischen und mittels Rissvermessungen quantifizierten Klebfugen- bzw. Interface-Schäden lassen sich in zwei wesentliche Schadensgruppen einteilen. Eine der beiden Schadensgruppen steht in Verbindung mit sehr hohen Feuchteeinwirkungen und hieraus resultierenden ausgeprägten, teilweise gravierenden hydrolytischen Degradationen der Klebefugen. Als Ursachen für hohe Feuchteeinwirkungen wurden insbesondere Dachundichtigkeiten und Kondenswasserausfall infolge bauphysikalisch in früheren Jahren häufig falsch ausgebildeter Kaltdächer festgemacht. Als zweite wesentliche Schadensgruppe wurden Versprödungen der Klebefugen durch langanhaltende oder zyklisch wiederkehrende hohe Temperaturen im Bereich von rd. 40°C bis rd. 60°C identifiziert. Die Versprödungen führten zu vermehrter Schrumpfrissbildung in den Klebefugen, insbesondere bei dicken Fugen. Bei überlagerten hohen – auch zeitlich versetzten – Luftfeuchtigkeiten wird die Fugendegradation verstärkt. Auch im Falle des Temperatur-Schadensszenarios sind bauartabhängig überwiegend Kaltdächer ursächlich für Schäden.

Ungeachtet der benannten, in einigen Fällen grundlegend schadensursächlichen Klebfugen-Degradationen ist darauf hinzuweisen, dass bei den meisten Schäden Quersugspannungen infolge überlagerter Einwirkungen von Lasten und insbesondere Klima primär schadensursächlich waren. Der Sachverhalt, dass die Rissbildungen auch bei ausreichend festen und dauerhaften Verklebungen in den Holz-Klebefugeninterfaces auftreten, resultiert unabhängig von der jeweiligen (Polykondensations-) Klebstofffamilie aus den Steifigkeitsunstetigkeiten an diesen Grenzflächen.

Bei den vier begutachteten Bauwerken mit UF-verklebten I-förmigen Kämpf-Trägern bzw. mit Kastenträgern unter Verwendung von Kämpf- oder Wolff-Stegplatten waren in zwei Fällen Bauwerkszustände festzustellen, bei denen in Folge gravierender Rissbildungen Ertüchtigungen unmittelbar angeraten waren. Eine unmittelbare Gefährdung der Standsicherheit bestand jedoch in keinem Falle. Bei einem Bauwerk waren Querschnittsausbildungen festzustellen, die von den Zulassungsvorgaben wesentlich abwichen, woraus sich die Erfordernis einer ausführlichen Tragwerksuntersuchung ergab. Schäden infolge erheblicher Feuchteeinwirkungen lagen bei den untersuchten Kämpf- bzw. Wolff-Steg-Bauteilen nicht vor. Bei den festgestellten Schäden ist zwischen rein konstruktiv bedingten Schäden wie z.B. unzureichend bewehrten, sehr großen Steg-Durchbrüchen sowie den im Fokus des Interesses stehenden (Kleb-) Fugenschäden in den Stegplatten und in den mittels Nagelpressklebung hergestellten Gurt- bzw. Gurt-Stegverklebungen zu differenzieren. Die begutachteten Fugenschnitte in den Schmalkantenverklebungen der Stegplatten waren durchweg auf die äußeren Lagen der um rd. $\pm 15^\circ$ bzw. $\pm 90^\circ$ verschränkten Stegbrettlagen

¹ Unter Berücksichtigung einer noch nicht gänzlich abgeschlossenen Untersuchung sodann 11 Bauwerke.

beschränkt. Durchrisse waren in den Stegplatten, ausgenommen bei überbeanspruchten Durchbruchbereichen, nicht festzustellen. Die Scherfestigkeiten der breittseitigen Verklebungen der Stegbrettlagen waren durchweg als ausreichend hoch zu bewerten.

Die visuellen, mikroskopischen und mechanischen Untersuchungen an Bohrkernen, die aus unterschiedlich rissgeschädigten Trägern entnommen wurden, stellten im Hinblick auf die Bewertung der UF-verklebten Bauteile von Bestandsbauten eine zentrale Aufgabe im Forschungsprojekt dar. Eine besondere Bedeutung kommt den Bohrkernen der Gebäudegruppe KF zu, da hier die „neuen“ Versuchsergebnisse unmittelbar mit den Resultaten der „vormaligen“, von Kolb und Frech durchgeführten Untersuchung verglichen werden können. Eine Differenzierung der Ergebnisse der Gebäudegruppe KF nach Gebäudealtern ist nicht erforderlich, da alle Gebäude zum Zeitpunkt der Untersuchungen ein Bauwerksalter von mehr als 44 Jahren aufwiesen und damit der Gebäudealtersgruppe G_45 (siehe unten) zuzuordnen sind.

Die bei den „alten“ und „neuen“ Untersuchungen der KF-Gebäude erhaltenen mittleren Trocken- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten stimmten mit jeweiligen Werten von 7,1 N/mm² bzw. 6,4 N/mm² nahezu vollständig überein und lagen auf ausreichend hohen Festigkeitsniveaus. Betrachtet man die alterungsbedingten Unterschiede hingegen auf dem Niveau der 5%-Quantil- und Minimalwerte der einzelnen Gebäude, so lagen die Ergebnisse der „neuen“ Untersuchungen jedoch durchweg signifikant niedriger. Im Falle der Trockenscherscherfestigkeiten betrug die entsprechenden Festigkeitsabnahmen rd. 12 % bzw. 20 %, während bei den Wiedertrocken-Scherfestigkeiten die 5%-Quantil- und Minimalwerte um rd. 30 % niedriger lagen. Die gegenüber dem Mittelwertniveau höheren Festigkeitsabnahmen der 5%-Quantil- und Minimalwerte der Wiedertrockenfestigkeiten sind nach Auffassung des Autors im Wesentlichen einer verstärkten Mikrorissbildung im Holz-Klebstoff-Interface bei der Rücktrocknung, denn einer verstärkten alterungsbedingten Degradation der wiedergetrockneten Klebefugen geschuldet.

Bei den Nass-Scherfestigkeiten der KF-Gebäudegruppe war im Gegensatz zu den Trocken- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten auf allen Verteilungsniveaus eine deutliche Festigkeitsminderung von den „alten“ zu den „neuen“ Ergebnissen zu konstatieren. Im Mittel aller Bauwerke lagen die „neuen“ Mittel-, 5%-Quantil- und Minimalwerte der Nass-Scherfestigkeiten um rd. 23 %, 30 % bzw. 40 % niedriger. Bei zwei Bauwerken lagen die „neuen“ Minimal- und 5%-Quantilwerte auch hinsichtlich der Absolutwerte auf einem sehr niedrigen Niveau von rd. 1,0 bzw. 2,0 N/mm². Diesbezüglich gilt jedoch zumindest für eines der beiden Bauwerke, das über rd. 40 Jahre als Salzlagerhalle gedient hatte, dass die Querschnitts-Randbereiche sehr hohe Holzfeuchten über 30 % aufwiesen.

Die Bohrkernversuchsergebnisse der BSH-Vollwandträger der Gebäudegruppen B und C werden im Hinblick auf eine komprimierte Darstellung aller Versuchsergebnisse zusammen mit den Ergebnissen der Gebäudegruppe KF angegeben. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der rd. 34 abschließend ausgewerteten Gebäude der Gebäudegruppe C ausschließlich Einfluss auf die Bewertung der Trockenscherscherfestigkeiten haben. Die Scherfestigkeits- und Faserbruchergebnisse der zusammengefassten Gebäudegruppen KF, B und C werden sodann auch differenziert nach zwei Gebäudealtersgruppen angegeben und verglichen. Die beiden altersmäßig unterschiedenen Gebäude-Untergruppen G_20 und G_45 umfassen einerseits jüngere Gebäude mit Bauwerksaltern von 6 bis einschließlich 34 Jahren und andererseits ältere Gebäude mit Bauwerksaltern zwischen 35

und 68 Jahren. Die mittleren Gebäudealter der beiden Gebäudealtersgruppen betragen rd. 20 Jahre bzw. rd. 45 Jahre. Die Versuchsergebnisse zeigen eindeutig die folgenden Sachverhalte auf:

Ohne Differenzierung nach Bauwerksaltern war erwartungsgemäß eine signifikante Abnahme der Wiedertrocken- und der Nass-Scherfestigkeiten im Vergleich zu den Trockenscherfestigkeiten festzustellen. Die Verteilungen der kumulativen Häufigkeiten der Trocken- und Wiedertrockenscherfestigkeiten verlaufen hierbei weitgehend affin, während die Nass-Scherfestigkeitsverteilung infolge geringerer Ergebnisstreuungen wesentlich steiler verläuft. Im Mittel aller Bohrkern-Versuchsergebnisse lagen die Wiedertrocken- und Nass-Scherfestigkeiten um rd. 20 % bzw. 50 % unter den Trockenfestigkeiten. Das Niveau der Trocken-Scherfestigkeiten lag bezüglich der Anforderungen der DIN EN 386 mit Mittel- und 5%-Quantilwerten von $7,5 \text{ N/mm}^2$ bzw. $4,0 \text{ N/mm}^2$ ausreichend hoch. Das kombinierte Trockenscherfestigkeits- Faserbruchanteilkriterium wurde bezüglich der Einzelwerte von rd. 75 % aller rd. 770 Proben erfüllt. Bei den Gebäudemittelwerten wurden die Anforderungen zu zwei Drittel erfüllt.

Differenziert man die erhaltenen Versuchsergebnisse nach den Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45, so ergeben sich folgende Sachverhalte:

i) Die Trocken- und Nass-Scherfestigkeitsverteilungen veränderten sich von den „jüngeren“ zu den „älteren“ Bauwerken hin zu niedrigeren Werten. Es ist darauf hinzuweisen, dass dieser bei Einbezug aller untersuchten Gebäude erhaltene Sachverhalt von den vorstehend aufgeführten Ergebnissen der Gebäudegruppe KF abweicht. Im Mittel lagen die Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude rd. 9 % unter denjenigen der rd. 25 Jahre „jüngeren“ Gebäude. Die mittleren Trocken- und Nass-Scherfestigkeitniveaus der „älteren“ Gebäude lagen jedoch noch auf ausreichend hohem Niveau, gemessen an den Anforderungen der DIN EN 386 und der DIN EN 301. Betrachtet man die Mittelwerte der 5%-Quantilen der Festigkeitsverteilungen der einzelnen Gebäude, so liegen die Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude mit 14 % bzw. 24 % deutlich unter den Vergleichswerten der „jüngeren“ Gebäude. Der Vergleich der mittleren Minimalwerte der jeweiligen Gebäude-Festigkeitsverteilungen zeigt, dass die Nass-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude noch ausgeprägter, rd. 1/3 unterhalb der Werte der „jüngeren“ Gebäude liegen. Bei Betrachtung der Bohrkern Einzelwerte liegt der Unterschied der Minimalwerte beim Faktor drei.

ii) Bei den Wiedertrockenscherfestigkeiten war im Gegensatz zu den Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten auf dem Niveau der Mittelwerte unerwartet kein Festigkeitsabfall von den „jüngeren“ zu den „älteren“ Gebäuden hin feststellbar. Dies gilt bezüglich der Einzelwerte aller Bohrkern auch für das 5%-Quantil- und das Minimalwert-Niveau. Bei Zugrundelegung der Mittelwerte der 5%-Quantilen sowie der Minimalwerte der einzelnen Gebäude ergaben sich jedoch gut übereinstimmend mit den Nass-Scherfestigkeiten für die „älteren“ Gebäude Festigkeitsabnahmen von 20 % bzw. 34 %. Die im Vergleich zum Mittelwertsniveau auf dem 5%-Quantil- und Minimalwert-Niveau erhaltenen höheren Festigkeitsminderungen der Wiedertrocken- und Nass-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude sind anzunehmend zwei Gründen geschuldet: Im Falle der Wiedertrocken-Scherfestigkeit ist das „ältere“ Holz-Interface anfälliger für Trocknungsrisse in Verbindung mit vorhandenen alterungsbedingten Mikroschäden. Im Falle der Nass-Scherfestigkeit liegen erhöhte alterungsbedingte Festigkeitsminderungen einzelner

Klebstofffabrikate in Verbindung mit dickeren und insbesondere im Härter-Vorstreich-Verfahren hergestellten Klebstofffugen vor.

Die summarische Bewertung aller vorliegenden Untersuchungsergebnisse ergibt, dass fachgerecht mittels UF-Klebstoffen hergestellte und bestimmungsgemäß verwendete (Brettschichtholz-) Holzbauteile bzw. -Tragwerke kein wesentlich erhöhtes Standsicherheitsrisiko im Vergleich zu Bauteilen, die mit PRF- oder MUF-Klebstoffen hergestellt wurden, darstellen. Unter fachgerechter Herstellung sind insbesondere die Realisierung dünner Fugen kleiner 0,5 mm, korrekte Mischungsverhältnisse einschließlich der Streckmittelzugaben sowie die Einhaltung der Klebstofffabrikat-abhängig ausgeprägt temperaturabhängigen Wartezeiten zu verstehen. Die bestimmungsgemäße Verwendung entspricht insbesondere bei den frühen UF-Harzen den folgenden in der Literatur weitgehend übereinstimmend genannten Verwendungsbedingungen (Egner und Kolb, 1974): *„Die Harnstoffharzleime als typische Vertreter der Innenleime dürfen also auch bei Verbauung unter Dach dann nicht verwendet werden, wenn mit hohen Temperaturen oder hohen relativen Luftfeuchtigkeiten oder mit Beidem über längere Zeiträume zu rechnen ist. Insbesondere muss Wasserdampfkondensation vermieden werden. Als Anhaltspunkt kann man sagen, dass die Temperatur ständig nicht über 30 °C, kurzzeitig nicht über 60 °C liegen soll. Die relative Luftfeuchtigkeit soll nur kurzzeitig über 80 % liegen“*. Die alterungsbedingte Abnahme der Trockenfestigkeiten von UF-Klebefugen liegt unter den vorstehend genannten Voraussetzungen, wie im Forschungsvorhaben nachgewiesen, unabhängig vom jeweiligen Klebstofffabrikat eindeutig auf einem vertretbaren Niveau.

Als Bestätigung der notwendigen Berücksichtigung der bestimmungsgemäßen Einsatzbedingungen belegten die durchgeführten Untersuchungen eindeutig, dass auch im Falle weitgehend fachgerecht hergestellter UF-verklebter Holzbauteile zwei Klima-Nutzungsszenarios existieren, die zu gravierenden Schäden und letztlich zu Bauteilversagen führen können. Dies betrifft zum einen Einsatzbedingungen, bei denen entweder planmäßig oder, im Regelfall unbeabsichtigt, langanhaltend eine sehr hohe Feuchtebeanspruchung vorliegt. Hierbei tritt insbesondere bei den zuerst entwickelten, gestreckten und im Härter-Vorstreichverfahren verwendeten UF-Klebstoffen eine extreme bis vollständige hydrolytische Degradation auch bei ausschließlicher Kaltwassereinwirkung auf. Unter unplanmäßigen Feuchtebeanspruchungen sind sehr hohe Luftfeuchten und insbesondere Kondensatbildungen zu verstehen, die bei entsprechenden Bauwerksnutzungen häufig in früher üblichen Kaltdächern auftreten. Zum anderen sind Einsatzbedingungen mit sehr hohen und langanhaltend einwirkenden Temperaturen von rd. 40 °C bis 60 °C, die zu einer Klebstoffversprödung führen, in hohem Maße für eine langfristige Klebfugenintegrität abträglich. Der genannte Temperaturbereich tritt abgesehen von planmäßigen Bauteil-Einsatzbedingungen, wie z. B. bei Ziegeleihallen und Bäckereien insbesondere in Kaltdächern mit abgehängten, teilweise wärmegeprägten Sicht- und Schallabsorptionsunterdecken auf. In Kaltdächern treten somit häufig beide genannten Einwirkungsszenarios – hohe Feuchten und hohe Temperaturen – auf, die für UF-Verklebungen abträglich sind. Eine Beurteilung des baulichen Zustandes von Kaltdächern wird zudem häufig durch abgehängte, nicht begehbare Decken stark erschwert respektive verteuert. Dies bedingt, dass Gebäudebetreiber aus Kostengründen häufig nur partielle Bauwerksbegutachtungen beauftragen, die umfangsabhängig meist nur eine sehr eingeschränkte Aussagekraft besitzen.

Zur Verhinderung von weiteren katastrophalen Bauwerksversagen wie in Bad Reichenhall sind daher die Inhalte der Gebäuderichtlinie zur Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen (N. N. 2006) vor allem bei Vorliegen der genannten für UF-Klebfugen abträglichen Nutzungsrandbedingungen stringent umzusetzen. Bei allen anderen, wesentlich häufigeren Nutzungsbedingungen kann die langfristige Beständigkeit und Sicherheit harnstoffharzverklebter Holzbauteile ohne erhöhten Nachdruck wie für anderweitig verklebte Holzkonstruktionen im Rahmen der erforderlichen und etablierten Standsicherheitsbewertungen als gewährleistet angesehen werden.