

Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharz-verklebter tragender Holzbauteile

T 3298

T 3298

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8993-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

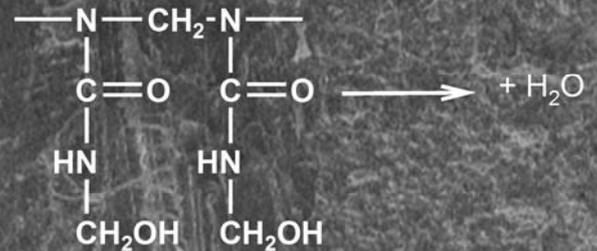
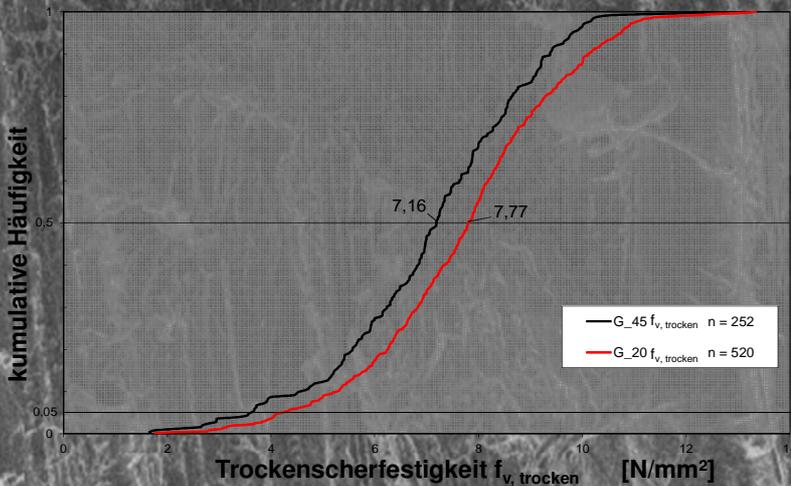
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

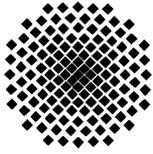


Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharzverklebter tragender Holzbauteile

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

Simon Aicher

2012



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

Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharz-verklebter tragender Holzbauteile

Teil 1 - Text

Simon Aicher

Forschende Stelle
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Otto-Graf-Institut
Abteilung Holzkonstruktionen

2012

Vorwort

Das Forschungsvorhaben „Langzeitbeständigkeit und Sicherheit Harnstoffharz-verklebter tragender Holzbauteile“ wurde im Jahr 2007 im Nachgang zu dem im Januar 2006 erfolgten katastrophalen Bauwerksversagen der Eissporthalle in Bad Reichenhall initiiert. Für den Einsturz der Dachkonstruktion waren mehrere zusammenwirkende Ursachen maßgebend. Eine der wesentlichsten Schadensursachen betraf die Harnstoff-Formaldehyd(UF-)Harz verklebten Keilzinkenvollstöße der Untergurte der kastenförmigen Hauptträger der Dachkonstruktion. Bedingt durch langjährig andauernde Kondensatbildung an der Unterkante der Hauptträger, in Folge bauphysikalisch zum damaligen Zeitpunkt nicht durchgängig bekannter konvektiver Sachverhalte, erfolgte eine hydrolytische Degradation der UF-Klebefugen im Biegezugbereich der Keilzinkenvollstöße verbunden mit einem weitgehenden Verlust der Tragfähigkeit der Verbindungen.

Als Konsequenz dieses bislang folgenschwersten Bauwerksversagens in der Bundesrepublik Deutschland wurden in unmittelbarer Folge zwei baurechtliche Maßnahmen vollzogen. So wurde zum einen bereits im Jahr 2006 seitens der Bauministerkonferenz die Gebäuderichtlinie¹ verabschiedet, die werkstoffübergreifend wesentliche Richtlinien für Inhalte und Zeitintervalle von Gebäudeinspektionen festschreibt. Andererseits wurde die Verwendung von Klebstoffen des Typs II nach EN 301, denen insbesondere UF-Harze zuzuordnen sind, für Verklebungen tragender Holzbauteile ausgeschlossen. Diese Regelung wurde erstmalig 2006 über die Musterliste der technischen Baubestimmungen eingeführt und in der Folge in DIN 1052:2008 verankert.

Die genannten Beschlüsse repräsentieren wirkungsvolle politisch-konsequente Erstmaßnahmen zur Abwendung weiterer folgenschwerer Bauwerksversagen. Die offenen Fragestellungen betreffend die Langzeitbeständigkeit und Sicherheit zehntausender Bestandsbauten von UF-Harz verklebten Dachtragwerken werden hierdurch offensichtlich nicht beantwortet. Dies betrifft insbesondere die Wissensunsicherheit dahingehend, welche Konstellationen unterschiedlich zusammengesetzter und verarbeiteter UF-Klebstofffabrikate und welche Szenarien von Einwirkungen speziell hinsichtlich klimatischer Randbedingungen als kritisch anzusehen sind. Eine möglichst profunde Kenntnis dieser Sachverhalte stellt letztlich die Voraussetzung für fachgerechte Inspektionen sowie für realistische Bewertungen tatsächlicher Gefährdungspotentiale in der Masse von Bestandsbauten dar.

Mit der in den Jahren 2008 bis 2011 durchgeführten, umfassenden Untersuchungen im Rahmen des hier berichteten Forschungsvorhabens wurde versucht, die angesprochenen Fragestellungen auf unterschiedlichen materialwissenschaftlichen und bauwerks-technologischen Ebenen zu beantworten.

Die Finanzierung des Forschungsvorhabens erfolgte durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt), durch die Industrie, vertreten durch die Firmen BASF AG, Casco Adhesives, Dynea und Purbond sowie durch den Branchenverband der Deutschen Brettschichtholzindustrie, die Studiengemeinschaft Holzleimbau.

¹ Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten, Fassung September 2006, Hrsgb. Bayerisches Staatsministerium des Innern

Für die Bereitstellung der finanziellen Mittel sei allen genannten Institutionen und Firmen gedankt. Zu erwähnen ist, dass für die Realisierung des Vorhabens auch erhebliche Eigenleistungen der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (Otto-Graf-Institut) erbracht wurden.

Allen Firmen, die Informationen zu relevanten Bauwerken recherchiert und zur Verfügung gestellt haben, sowie allen Personen, die außerhalb gegebener standsicherheitsrelevanter Anlässe Zustimmungen zu Inspektionen von Bauwerken und zu Probennahmen gegeben haben, sei herzlichst gedankt.

Die umfangreichen Material- und Bauwerksuntersuchungen waren nur durch die engagierte Mitarbeit wissenschaftlicher Hilfskräfte und Diplomanden der Universität Stuttgart sowie mehrerer Mitarbeiter des Otto-Graf-Instituts möglich. Namentlich zu erwähnen sind hierbei insbesondere Frau I. Savchenko, Herr A. Schuldeschov, Herr B.Sc. M. Bissinger, Herr Dipl.-Ing. A. Maier sowie die Herren A. Bäder, Dipl.-Ing. S. Weber, Dipl.-Ing. G. Stapf und Dipl.-Ing. C. Rothkopf. Besonders hervorzuheben ist die kontinuierliche und sehr konstruktive Mitarbeit von Herrn Dipl.-Ing. J. Hezel, der federführend viele Objektbegutachtungen, Prüfungen und Versuchsauswertungen vorgenommen hat. Für die umfangreichen, sorgfältig ausgeführten Schreibarbeiten sei Frau A. Heinicke sehr gedankt.

Dezember 2012

Simon Aicher

1	<i>Ausgangslage und Zielsetzung</i>	8
2	<i>Vorgehensweise und Inhalte des Forschungsvorhabens</i>	12
3	<i>Grundlegendes zu Harnstoff-Formaldehyd-Harzen</i>	15
3.1	Ausgangsprodukte: Harnstoff- und Formaldehyd	15
3.2	Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukte bzw. - Klebstoffe	16
3.3	Reaktionsschema	17
3.4	Härter	18
3.4.1	Allgemeines	18
3.4.2	Härterzugabe im Untermisch- und Vorstreichverfahren	19
3.5	Zuschlagstoffe	20
3.5.1	Allgemeines	20
3.5.2	Füllstoffe	22
3.5.3	Streckmittel	23
4	<i>Entwicklungsgeschichte der Kaurit-Harnstoffharz-Leime</i>	26
5	<i>Eigenschafts- und Anwendungsprofile ausgewählter Harnstoffharz-Klebstoffe</i>	28
5.1	Kaurit-Leim WHK 220 Pulver	28
5.2	Kaurit-Leim W 234 Pulver	32
5.3	Kaurit-Leim 234 Pulver	32
6	<i>Literaturrecherche und -auswertung</i>	35
6.1	Allgemeines	35
6.2	Veröffentlichung von Egner und Jagfeld (1962) – „Untersuchungen an Harnstoffharz- leimen mit Streck- und Füllmitteln für die Leimung von tragenden Holzbauteilen“	36
6.2.1	Allgemeines	36
6.2.2	Untersuchte Leime, Streckmittel, Leimansätze, Streckmittelzusätze und Auftragsverfahren	37
6.2.2.1	UF-Leime mit organischen Streckmitteln	37
6.2.2.2	UF-Referenzleim mit Kunstharzpulver-Füllmittel	38
6.2.2.3	PRF-Referenzleim	39
6.2.3	Prüfkörper, Fugendicken, Versuche, Klimabehandlungen	39
6.2.4	Versuchsergebnisse	39

6.2.4.1	Aushärtedauer bzw. Abbindegeschwindigkeiten	39
6.2.4.2	Einfluss des Streckmittelgehalts auf die Längszugfestigkeiten	40
6.2.4.2.1	EB-Mehl, Fichtenholzverklebungen	40
6.2.4.2.2	Kokussusschalenmehl, Fichten- und Buchenholzverklebungen	43
6.2.4.3	Einfluss des Streckmittelgehalts auf das Alterungsverhalten unterschiedlich dicker Klebefugen	43
6.2.4.3.1	Fichtenholzverklebungen	43
6.2.4.3.2	Buchenholzverklebungen	48
6.2.5	Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse	49
6.3	Veröffentlichung von Egnér, Jagfeld und Kolb (1969) – „Alterungsuntersuchungen an gestreckten Harnstoffharzleimen für die Herstellung tragender Holzbauteile“	52
6.3.1	Allgemeines	52
6.3.2	Untersuchte Klebstoffe, Streckmittel, Prüfkörper und Fugendicken	53
6.3.3	Versuchsergebnisse	55
6.3.3.1	Zusammenhang zwischen Alterungszeit und Längszugscherfestigkeit	56
6.3.3.1.1	Buchenholzverklebungen	56
6.3.3.1.2	Fichtenholzverklebungen	59
6.3.3.1.3	Einfluss des Streckmehlalters	59
6.3.4	Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse	59
6.4	Veröffentlichung von Kolb und Frech (1977) – „Langfristiges Verhalten von Brettschichtholz verleimt mit Harnstoffharzleim“	60
6.4.1	Allgemeines	60
6.4.2	Prüfkörper, untersuchte Klima/Wasser-Vorbehandlungen	61
6.4.3	Versuchsergebnisse	62
6.4.4	Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse	63
6.5	Veröffentlichung von Clad (1978) – „Harnstoff verleimte Träger nach 35 Jahren“	64
6.5.1	Allgemeines	64
6.5.2	Versuchsmaterial, Klebstoff, Prüfkörper und –prüfverfahren, Klima- und Wasservor- behandlungen	66
6.5.3	Versuchsergebnisse	67
6.5.4	Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse	68
6.6	Veröffentlichung von River, Ebewele und Myers (1994) – „Failure mechanisms in wood joints bonded with urea-formaldehyde adhesives“	70
6.6.1	Allgemeines, untersuchte UF-Klebstoffe	70
6.6.2	Untersuchte Prüfkörpertypen und Klima/Wasser-Vorbehandlungen	71

6.6.3	Mechanische Versuchsergebnisse	71
6.6.4	Ergebnisse der ESM - Untersuchungen an Klebfugen(Bruch)-flächen	73
6.6.4.1	Klebfugenzustand nach der Aushärtung	73
6.6.4.2	Einfluss von Alterungsbehandlungen auf die Rissbildungen in Klebstoffschichten	76
6.6.4.3	Bruchverhalten und -flächen nicht gealterter Proben	77
6.6.4.3.1	Bruchflächen bei Spaltzugprüfungen	77
6.6.4.3.2	Bruchflächen bei Scherprüfungen	78
6.6.4.4	Bruchverhalten und -flächen gealterter Proben	79
6.6.5	Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse	79
6.7	Veröffentlichung von Raknes (1997) – „Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing“	81
6.7.1	Allgemeines	81
6.7.2	Untersuchte UF-Klebstoffe, Prüfkörper und Fugendicken	82
6.7.3	Alterungsbedingungen	84
6.7.3.1	Beschleunigte Alterung	84
6.7.3.2	Natürliche Alterung	85
6.7.4	Versuchsergebnisse	85
6.7.4.1	Versuche mit beschleunigter Alterung	85
6.7.4.2	Versuche mit natürlicher Alterung	86
6.7.4.2.1	Alterungsbedingung NA-1: ungeschütztes Außenklima	86
6.7.4.2.2	Alterungsbedingung NA-2: geschütztes Außenklima	87
6.7.4.2.3	Alterungsbedingungen R-20/65, NA-3 und NA-4: unterschiedliche Innenraumklimata	87
6.7.5	Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse	94
7	Untersuchungen zur Klebfugenfestigkeit- und beständigkeit ausgewählter UF-Klebstoffe – Prüfungen nach europäischen Normen	95
7.1	Verwendete Klebstoffe und Auftragsverfahren	95
7.2	Versuchsprogramm	98
8	Längszugscherprüfungen nach EN 302-1	100
8.1	Prüfkörperherstellung und Versuchsdurchführung	100
8.2	Versuchsergebnisse	102
8.2.1	Allgemeines	102
8.2.2	Diskussion der Versuchsergebnisse	107
8.2.2.1	Fugendicke 0,1 mm	107
8.2.2.2	Fugendicke 1 mm	108

8.2.3	Schlussfolgerungen	109
9	<i>Mikroskopische Untersuchungen an Klebfugen der Längszugscherprüfkörper</i>	111
10	<i>Blockscherversuche in Anlehnung an EN 392</i>	119
10.1	Prüfkörperherstellung	119
10.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	123
10.3	Anforderungen an die Versuchsergebnisse	124
10.4	Zusammenstellung der Versuchsergebnisse	126
10.5	Diskussion der Versuchsergebnisse	132
10.5.1	Trockene Prüfkörper (Lagerung I)	132
11	<i>Delaminierungsversuche nach EN 302-2</i>	135
11.1	Prüfkörperherstellung und Versuchsdurchführung	135
11.2	Zusammenstellung der Versuchsergebnisse	135
11.3	Diskussion der Versuchsergebnisse	135
11.3.1	Verfahren mit niedriger Temperatur (Klebstofftyp II)	135
11.3.2	Verfahren mit hoher Temperatur (Klebstofftyp I)	139
11.3.2.1	Aushärtung gemäß EN 302-2	139
11.3.2.2	Achtwöchige Aushärtung im Klima 20°C/65 % rel. LF	139
11.4	Schlussfolgerungen	140
12	<i>Recherchen zu relevanten Harnstoffharz-verklebten Bauwerken, Datenbank</i>	142
12.1	Auswertung der Leimgenehmigungsakten	142
12.2	Recherchen bei Holzleimbaubetrieben, in Institutsgutachten und Veröffentlichungen	142
12.3	Erstellung einer Gebäude-/Bauteildatenbank	142
13	<i>Auswahl der begutachteten Bauwerke</i>	146
13.1	Allgemeines	146
13.2	Gebäudegruppe KF (BSH-Vollwandträger)	147
13.3	Gebäudegruppe B (BSH-Vollwandträger)	150
13.4	Gebäudegruppe C (BSH-Vollwandträger)	150

13.5	Gebäudegruppe D (BSH-Vollwandträger)	152
13.6	Gebäudegruppe E (Kämpf-Träger bzw. Kastenträger mit Kämpf- oder Wolff-Stegplatten)	152
14	<i>Begutachtungen und Untersuchungen der ausgewählten Harnstoffharzverklebten Holzbauwerke</i>	154
14.1	Allgemeines, Untersuchungsinhalte	154
14.2	Bewertungskriterien für Rissbildungen	154
14.3	Zusammenstellung der Begutachtungsergebnisse der Einzelbauwerke	156
14.4	Zusammenfassende Bewertung der visuellen Begutachtungen und Rissaufnahmen	156
14.4.1	Bauwerke mit BSH-Vollwandträgern	156
14.4.2	Bauwerke mit Kämpf-Trägern bzw. mit Kastenträgern mit Kämpf- bzw. Wolff-Stegplatten	163
15	<i>Untersuchungen an Bohrkernen aus den begutachteten Bestandsbauten</i>	167
15.1	Probenherstellung und -prüfungen	167
15.2	Vorbehandlung der Bohrkernabschnitte mittels Klima- und Wasserlagerungen	167
15.3	Anforderungen an die Scherfestigkeitsergebnisse nach unterschiedlichen Vorbehandlungen	168
16	<i>Ergebnisse von Klebfugendickenbestimmungen an Bohrkernen</i>	169
17	<i>Chemische Untersuchungen an Bohrkernproben zur Bestimmung der Klebstofffabrikate</i>	172
18	<i>Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkern der Gebäudegruppe KF</i>	175
18.1	Ergebnis-Zusammenstellungen	175
18.2	Diskussion der „alten“ und „neuen“ Trockenscherfestigkeiten	181
18.3	Diskussion der „alten“ und „neuen“ Nass-Scherfestigkeiten	182
18.4	Verhältnswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten	184
18.5	Diskussion der „alten“ und „neuen“ Wiedertrocken-Scherfestigkeiten	185
18.6	Verhältnswerte von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeiten	186
18.7	Scherfestigkeits-Faserbruchanteil-Zusammenhänge der „neuen“ Untersuchungen	188

19	<i>Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkerne der Gebäudegruppe B</i>	192
19.1	Ergebnis-Zusammenstellungen	192
19.2	Diskussion der Versuchsergebnisse	193
20	<i>Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkerne der Gebäudegruppe C</i>	203
20.1	Ergebnis-Zusammenstellungen	203
20.2	Diskussion der Versuchsergebnisse	204
21	<i>Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkerne aus Bestandsbauten mit Kämpf-Trägern bzw. Kastenträgern mit Kämpf- oder Wolff-Stegplatten</i>	211
21.1	Gebäude Nr. 1576 mit Kämpf-Trägern	211
21.2	Gebäude Nr. 1679 mit Kastenträgern mit Kämpf-Stegplatten	212
21.3	Gebäude Nr. 1682 mit Kastenträgern mit Wolff-Stegplatten	213
21.4	Gebäude Nr. 1683 mit Kämpf-Trägern	215
22	<i>Zusammenfassung und Diskussion der Bohrkern-Versuchsergebnisse der Gebäudegruppen KF, B und C</i>	217
23	<i>Vergleich der Bohrkern-Scherfestigkeitsergebnisse der Gebäudegruppen KF, B und C der Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45 mit neu hergestellten nicht gealterten Blockscherproben</i>	238
24	<i>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</i>	241
25	<i>Literatur</i>	254
25.1	Veröffentlichungen	254
25.2	Normen	260
25.3	Patentschriften, Zulassungen	261
25.4	Technische Merkblätter – Industrie-Veröffentlichungen	263
25.5	Interne unveröffentlichte Prüfungsberichte	264

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Geklebte Holzkonstruktionen, insbesondere unter Verwendung von Brettschichtholz (BSH) werden seit ca. 100 Jahren weltweit in stark zunehmendem Maße eingesetzt. Die Bandbreite der geklebten Holz(BSH-)Konstruktionen umfasst keilgezinkte Vollhölzer, Duo- und BSH-Balken für Decken, Dächer und Wände in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie in Büro- und Wirtschaftsgebäuden (gerade, gekrümmte und satteldachförmige BSH-Vollwandträger mit Querschnittshöhen und –längen bis zu 3 m bzw. 55 m) sowie weitgespannte Schalen- und Fachwerkkonstruktionen aus Brettschichtholz mit Spannweiten bis zu rd. 200 m. Blockverklebte BSH-Bauteile, die durch flächige Verklebung mehrerer BSH-Träger zu monolithischen Vollquerschnitten mit Abmessungen bis zu rd. 1 m x 3 m gefertigt werden, gelangen als Hauptträger bei sehr großen Hallen-Bauwerken sowie bei Straßenbrücken zum Einsatz und damit zunehmend in Anwendungsbereichen, die bislang primär Stahl(verbund)- und Massivbauweisen vorbehalten waren. Von Beginn der 50iger bis Mitte der 70iger Jahre wurden bei weitgespannten, hochbeanspruchten Dachkonstruktionen insbesondere auch die nach den Erfindern G. Kämpf und J. Wolff benannten Kämpf-Träger (Kämpf, 1946) und Wolff-Stegträger (N. N. 1958) eingesetzt.

Die weit überwiegende Anzahl von Kämpf- und Wolff-Stegträgern sowie von BSH-Bauwerken, die bis in die frühen 1980iger Jahre in Deutschland primär unter Einsatz von Harnstoffharz (UF-)Verklebungen hergestellt wurden, erfüllt ihre Funktion bis heute unbeanstandet und mit sehr geringem Wartungsaufwand. Dies gilt insbesondere auch für eine große Anzahl von mängelfrei benutzten Harnstoffharz-verklebten Bauwerken mit Bauwerkaltern bis zu rd. 70 Jahren, wodurch die langfristige Beständigkeit und Zuverlässigkeit UF- geklebter Konstruktionen eindrucksvoll bestätigt wird. Viele der alten BSH-Bauwerke haben zudem wechselvolle Bauwerksgeschichten mit mehrfachen Nutzungsänderungen und abträglichen Klima- und Feuchtebedingungen durchlebt.

Das katastrophale Versagen der im wesentlichen Harnstoffharz-verklebten Kämpf-Träger der Eissporthalle in Bad Reichenhall und einige weitere erhebliche Bauwerksschäden ohne Todesfolgen mit Harnstoffharz-verklebten Holzbauteilen haben das bis Ende des Jahres 2005 vorherrschende Vertrauen in die genannten Verklebungen grundlegend in Frage gestellt. Mangelhaft recherchierte sowie teilweise tendenziöse Pressemitteilungen und Einwendungen fachfremder Gutachter trugen hierbei erheblich zur Verunsicherung der Öffentlichkeit und der politischen / baurechtlichen Gremien bei. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass das Versagen der Harnstoffharz-verklebten Träger in Bad Reichenhall auf

einer Verkettung mehrerer gravierender Einflussfaktoren beruhte (vgl. u. a. Voormann und Pfeifer, 2007; Winter und Kreuzinger, 1980). Hierbei bestand eine der wesentlichen Versagensursachen darin, dass die Leistungsgrenzen des verwendeten UF-Klebstoffs bezüglich Feuchtebeständigkeit und Eignung für größere Fugendicken insbesondere im Bereich der Universal-Keilzinkenverbindungen der Gurte sowie der Gurt-Stegplattenverklebungen deutlich überschritten wurden.

Die erheblichen Verklebungsdefizite der in Bad Reichenhall vorgefundenen, nicht sach- und verwendungsgerecht ausgeführten Harnstoffharzverklebungen erfordern Klärungen und neue Erkenntnisse in mehrfacher Hinsicht. Hierbei ist insbesondere festzustellen, in wieweit die in einigen seriösen wissenschaftlichen Publikationen vorgebrachten, teilweise experimentell basierten erheblichen Vorbehalte gegenüber der langzeitigen Nass- und Trockenscherfestigkeit von Harnstoffharzverklebungen (u. a. Raknes, 1997) zu bestätigen respektive zu relativieren sind. Weitere kritische Literaturstellen sprechen Aushärte- und Alterungsschädigungen an, die auf schrumpfspannungsbedingten Fugenrissen und hiervon ausgehenden bruchmechanisch zu betrachtenden Rissfortschritten im Holz-Klebfugen-Interface beruhen (u. a. River et. al., 1994).

Die genannten Vorbehalte führten unter anderem dazu, dass Harnstoffharz-Verklebungen in den skandinavischen Ländern nie für tragende Holzbauteile zugelassen wurden.

Ungeachtet der vorstehenden kritischen Bewertungen von UF-Verklebungen lässt sich aus der Schadensanalyse von Blaß und Freese (2010) mit Ausnahme von Eissporthallen zunächst kein nachweislich erhöhtes Schadensrisiko für UF-verklebte Hallentragwerke im Vergleich zu Holz-Bauteilen die mit Klebstoffen anderer Klebstofffamilien hergestellt wurden, ableiten.

Den technischen Fragestellungen, der öffentlichen Diskussion und der baurechtlichen Vorsorgepflicht wurde zwischenzeitlich mit drei Maßnahmen Rechnung getragen:

- i) Bekannte Kämpf-Träger vergleichbar großer Abmessungen wie in Bad Reichenhall, die nie baurechtlich zugelassen waren, wurden einer Begutachtung unterworfen.
- ii) In allen Bundesländern wurden alle Eissporthallen mit Holzdächern einer baurechtlich verpflichtenden Überprüfung unterworfen, da in Eissporthallen nachweislich generell

für Harnstoffharz-Verklebungen sehr ungünstige und häufig unzulässige Klimabedingungen vorherrschen¹.

- iii) Klebstoffe des Typs I nach DIN EN 301 und damit im Wesentlichen Harnstoffharze, wurden in Deutschland zuerst (im Jahr 2006) über die Musterliste der Technischen Baubestimmungen und sodann über die Neufassung der deutschen Holzbaunorm DIN 1052:2008-12 von der Verwendung für tragende Holzbauteile ausgeschlossen. Dieser sehr weitgehende Schritt, dem sich die meisten europäischen Länder nicht anschlossen, ist in erster Linie vor dem Hintergrund eines unmittelbaren Handlungsbedarfs nach dem Unglück von Bad Reichenhall zu sehen. Eine technisch wissenschaftliche Rechtfertigung für die pauschale Abqualifizierung von Harnstoffharz-Verklebungen für tragende Zwecke generell, auch unter Berücksichtigung von Nutzungsänderungen, wurde hiermit jedoch nicht gegeben. Die genannte baurechtliche Vorgehensweise wirft somit unmittelbar die Frage auf, wie die Sicherheit von Bestandsbauten mit Harnstoffharz-verklebten (BSH-)Bauteilen zu bewerten ist.

Das katastrophale Bauwerksversagen in Bad Reichenhall sowie weitere teilweise erhebliche Bauwerksschäden einerseits, und literaturbekannte, teilweise extrem negative Einschätzungen der Langzeittragfähigkeit von Harnstoffharz-verklebten Holzbauteilen/-Konstruktionen andererseits, bedingen somit die Dringlichkeit einer wissenschaftlichen Klärung der angesprochenen Sachverhalte. Anderenfalls sind Unbedenklichkeits-Verlautbarungen für die Harnstoffharz-verklebten Holzkonstruktionen des Bestandes nicht zu leisten.

Im Sinne der genannten Ausgangslage bestand das Ziel des seitens des Deutschen Instituts für Bautechnik und der Industrie finanzierten Forschungsvorhabens darin, wissenschaftlich belastbare Erkenntnisse über die langfristige Zuverlässigkeit/Sicherheit von tragenden Holzbauteilen und -konstruktionen, die unter Verwendung von Harnstoff-Formaldehydharzen hergestellt wurden², zu erhalten. Die Erkenntnisse des Vorhabens sollen die Grundlage für eine realistische Bewertung der Klebfugensicherheit und –beständigkeit UF-verklebter Holzbauteile liefern um damit eine fundiertere Abschätzung des eventuell vorhandenen Gefährdungspotentials des heutigen Bauwerksbestandes (mehrere Zehntausende von Gebäuden bzw.

¹ Infolge Wärmestrahlung von den Decken bzw. Dachträgern über Eisflächen kann abhängig von Temperatur und Luftfeuchte erheblicher Tauwasserausfall an den Decken- bzw. Trägeroberflächen erfolgen (Fritzen, 2006; Feldmeier, 2006).

² In einigen europäischen und außereuropäischen Ländern werden heute noch in größerem Umfang Brettschichtholzbauteile unter Verwendung von UF-Klebstoffen hergestellt, u. a. in Italien und Südafrika.

Gebäudedächern) harnstoffharzverklebter Holzkonstruktionen zu ermöglichen. Es sollen insbesondere die möglichen/wahrscheinlichen Langzeitriskiken für Bauteile und Gebäude evaluiert werden, bei denen Kombinationen ungünstiger oder für UF-Klebstoffe nicht zulässiger klimatischer Randbedingungen mit anzunehmend nicht verwendungsgerechten Bauteil- und Produktionsrandbedingungen bei Klebstofffabrikaten mit geringeren Verarbeitungstoleranzen vorliegen.

In Anbetracht einer erheblichen Anzahl ungeklärter Aspekte zu Harnstoffharz-Verklebungen besteht mit Blick auf die langfristige Standsicherheit von Gebäuden und die gebotene Abwendung weiterer Unglücksfälle wie in Bad Reichenhall der zwingende Bedarf an vertieften Erkenntnissen zu dem eventuell vorliegenden, jedoch bislang wissenschaftlich weder stringent belegten noch widerlegten Gefährdungspotential von harnstoffharzverklebten Holzkonstruktionen. In diesem Zusammenhang besteht speziell die dringende Erfordernis, den in einigen seriösen ausländischen wissenschaftlichen Publikationen vorgebrachten erheblichen Vorbehalten zum Langzeitverhalten — stetiger Abfall der Nassfestigkeit, nicht auszuschließender Abfall der Trockenfestigkeit, verstärkte Alterung infolge Schrumpfrissbildungen — von Harnstoffharzverklebungen, vertieft und quantifizierend nachzugehen.

2 Vorgehensweise und Inhalte des Forschungsvorhabens

Das Vorgehen im Rahmen des Forschungsvorhabens war mit Blick auf das zentrale Projektziel einer realistischen Abschätzung des Gefährdungspotentials UF-verklebter Holzbauteile bzw. -konstruktionen derart konzipiert, dass die Bearbeitung der Thematik auf unterschiedlichen Untersuchungsebenen mit verschiedenen Untersuchungsmethoden erfolgte und die Ergebnisse der Teilbereiche sodann komplementär bewertet wurden. Unter dem Begriff Untersuchungsebenen werden hierbei u. a. die profunde Literaturrecherche, die Untersuchungen an Kleinproben mit allen heute relevanten Klebstoffprüfungen sowie umfangreiche Untersuchungen an Bestandsbauten und hieraus entnommenen Proben verstanden. Die Methoden umfassen mikroskopische, chemisch-analytische, mechanisch-technologische Probenuntersuchungen (Zug-, Druckscher-, Delaminierungsprüfungen nach unterschiedlichen Klima-/Wasservorbehandlungen) sowie visuelle und haptische Bauteilprüfungen.

Bei den zentralen Arbeitsteilbereichen, den Untersuchungen an neu hergestellten Verklebungs-Kleinprüfkörpern sowie an Proben aus Bestandsbauten wurde darauf geachtet, den Umfang der Untersuchungen betreffend Probenkonfigurationen und –anzahl so hoch wie im Rahmen der Projektrandbedingungen möglich zu setzen, um für die Schlussfolgerungen eine möglichst repräsentative Faktenlage zu schaffen. In diesem Sinne bleibt festzuhalten, dass die Anzahl der untersuchten Proben und Bauteile den Rahmen üblicher Einzeluntersuchungen einerseits deutlich übersteigt. Andererseits ist jedoch die Grundgesamtheit der möglichen Klebstoff-Verklebungskonfigurationen, die unter dem Oberbegriff UF-verklebte Bauteile subsummiert werden können, so groß, dass der Untersuchungsumfang zwar als sehr groß zu bezeichnen ist, jedoch nicht alle Konfigurationen einschließt.

Die Projektbearbeitung umfasste im Einzelnen die folgenden, in den Punkten 1 bis 7 komprimiert zusammengestellten Arbeitsschritte.

1. Darstellung grundlegender Aspekte von Harnstoff-Formaldehyd (UF-)Klebstoffen und Verklebungen. Hierbei werden u.a. die Ausgangsprodukte, Reaktionsschemata und Anwendungsprofile ausgewählter UF-Harze betrachtet.
2. Im Rahmen einer sehr umfangreichen Literaturrecherche im öffentlich zugänglichen Schrifttum und in unveröffentlichten Institutsberichten werden insbesondere sechs zentrale Schriften eingehend analysiert und hinsichtlich ihrer teilweise deutlich gegensätzlichen Schlussfolgerungen zur Leistungsfähigkeit und -beständigkeit von UF-Verklebungen bewertet.

3. Untersuchungen an labormäßig hergestellten UF-Harz-verklebten Probekörpern: Die Prüferien wurden mit sechs ausgewählten, deutlich unterschiedlichen UF-Klebstoffkonfigurationen (Klebstoffe und Klebstoffauftragsverfahren) hergestellt. Die Prüfungen umfassten Längszugscherprüfungen nach EN 302-1, Blockscherprüfungen nach EN 392 und Delaminierungsprüfungen nach EN 302-2 nach unterschiedlichen Vorbehandlungen betreffend Klima- und Wasserlagerungen bzw. Druck-Vakuum-Trocknungsbehandlungen und Aushärtezeiten. Zum einen sollte unter weitgehender Ausschaltung holzbedingter Einflüsse die prinzipielle Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Klebstoffe in labormäßig ideal hergestellten Verklebungen nach heute gültigen europäischen Normen bestimmt werden. Im Vordergrund des Interesses standen hierbei die Auswirkungen von Feuchtebehandlungen in Verbindung mit unterschiedlichen Fugendicken. Zum anderen sollten die Versuchsergebnisse Referenzwerte für Probekörper (Bohrkerne), die aus Bauteilen von Bestandsbauten mit unterschiedlichen Lebensaltern entnommen wurden, liefern. An den Klebfugen-Bruchflächen der Längszugscherprüfkörper wurden auch licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Fugenstruktur und zu Rissoberflächen durchgeführt.

4. Mit Blick auf die Untersuchungen/Probennahmen an Bestandsbauten wurde eine umfassende, tief gegliederte Gebäude- bzw. Bauteildatenbank mit rd. 1700 Einträgen erstellt. Die Gebäudeerfassung erfolgte durch Auswertungen der bei der Forschungsstelle vorliegenden Leimgenehmigungsakten sowie mittels umfänglicher Recherchen bei Holzleimbaubetrieben, in Institutsgutachten und Veröffentlichungen. Aus der Gesamtheit der recherchierten Gebäude wurden 75 Bauwerke für die Vorort-Untersuchungen³ ausgewählt. Ein wesentliches Kriterium für die Gebäudeauswahl war u.a. insbesondere das Gebäudealter. Die Gebäude sollten im Hinblick auf die Bestätigung und Quantifizierung alterungsbedingter Klebfugendegradationen überwiegend hohe Bauwerksalter von rd. 30 – 50 Jahren aufweisen. Zu Vergleichszwecken wurden auch Gebäude mit mittleren bzw. jüngeren Bauwerksaltern von rd. 10 – 20 Jahren bzw. von 3 – 10 Jahren ausgewählt. Die ausgewählten Gebäude wurden nach speziellen Kriterien wie Bauteiltyp (BSH-Vollwandträger oder Kämpf- bzw. Wolfstegträger) nach gegebenenfalls vorliegenden früheren Untersuchungen, nach Probennahmen und den verwendeten Prüfverfahren/Probenvorbehandlungen in un-

³ Die für die Vorort-Untersuchungen ausgewählten Gebäude beinhalten in größerem Umfang auch Gebäude, die seitens der MPA Universität Stuttgart aus gegebenem Anlass (Stand sicherheitsbewertung, Schadensgutachten) einer Inspektion zu unterziehen waren.

terschiedliche Gebäudegruppen unterteilt, die sodann mittels statistischer Auswertungen miteinander verglichen wurden.

5. Die visuellen und haptischen Begutachtungen der ausgewählten Gebäude u. a. mit Rissvermessungen, Feuchtebestimmungen, Probenahmen und anschließender Prüfung der Proben repräsentieren den umfangreichsten Teilbereich der durchgeführten Untersuchungen. Die Ergebnisse der Vorort-Bestandsaufnahmen sind komprimiert für jedes Gebäude in einem Gebäudedatenblatt einschließlich relevanter Zeichnungen mit Angabe der Bohrkernentnahmestellen und Bildern dokumentiert. Die ermittelten Bauwerkszustände werden eingehend summarisch diskutiert.
6. Mit Blick auf quantitative Aussagen zur Qualität der Klebstoffugen und Schlussfolgerungen bezüglich der in der Literatur teilweise postulierten, jedoch nicht quantifizierten Abnahme der Festigkeiten und der Beständigkeit mit zunehmender Alterung wurden sehr umfängliche Bohrkernprüfungen durchgeführt. Zwecks einer eindeutigen Bewertung der Einflüsse von Wassereinwirkung respektive einer Wiedertrocknung wurden die Bohrkern aus 16 Bauwerken in Drillingsproben aufgetrennt, die sodann nach unterschiedlichen Klima/Wasservorbehandlungen geprüft wurden. Durch die gewählte Vorgehensweise wurde der Einfluss der Holzqualität weitgehend reduziert. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte insbesondere mit Blick auf die unterschiedlichen Gebäudealter bzw. –altersgruppen. Im Rahmen der Untersuchungen an den Bohrkernen wurden auch Bestimmungen der Klebfugendicken sowie chemische Untersuchungen zur Ermittlung der verwendeten Klebstofffabrikate durchgeführt.
7. Die Gesamtheit der an rd. 1500 Probekörpern und rd. 800 begutachteten Bauteilen erhaltenen Versuchsergebnissen werden abschließend komplementär diskutiert und zu übergreifenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen zusammengeführt.

3 Grundlegendes zu Harnstoff-Formaldehyd-Harzen

Harnstoff-Formaldehydharze, im Weiteren meist als UF-Harze bezeichnet, gehören zur Klebstofffamilie der Aminoplaste innerhalb der übergeordneten Gruppe der Polykondensationsklebstoffe und entstehen durch Kondensation von Harnstoff (lat. Urea) $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ und Formaldehyd HCHO . Die großtechnische Herstellung eines UF-Harzes erfolgte erstmalig 1931 (vgl. Abschnitt 4).

3.1 Ausgangsprodukte: Harnstoff- und Formaldehyd

Harnstoff, $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ bzw. $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, ist das letzte Stoffwechselprodukt (Endprodukt) beim Abbau von Eiweiß das natürlich im Harn von Säugetieren und Menschen vorkommt. Harnstoff ist bezüglich der chemischen Struktur das (Di-)Amid der Kohlensäure. Gleichbedeutende Bezeichnungen für Harnstoff sind somit u.a. Kohlensäurediamid und Carb(di)amid. Der Mensch scheidet mit dem Tagesurin etwa 20 – 30 Gramm aus. Die Substanz wurde erstmalig von Boerhave im Jahr 1729 und sodann von Rouelle im Jahr 1773 entdeckt. Harnstoff bildet farb- und geruchlose tetragonale Kristalle aus, die in Wasser leicht löslich sind. Die von Wöhler (1828) erfundene Synthese des organischen Moleküls Harnstoff durch Reaktion der beiden anorganischen Ausgangsstoffe Kaliumcyanat und Ammoniumsulfat stellte eine der zentralen Entdeckungen der organischen Chemie dar. (Anmerkung: Bis dahin herrschte die Ansicht vor, dass zur Schaffung von organischen Stoffen, wie sie von Pflanzen, Tieren oder Menschen erzeugt werden, grundsätzlich nur Lebewesen mit der diesen innewohnenden „vis vitalis = Lebenskraft“ befähigt sind.) Als einer der wesentlichsten Schritte für eine industrielle Herstellung von Harnstoffharzen, respektive deren beider zentraler Ausgangsprodukte - Harnstoff- und Formaldehyd - ist die seitens der I. G. Farben erstmalig 1913 großtechnisch realisierte Synthese von Ammoniak nach dem Haber-Bosch-Verfahren zu betrachten. (Anmerkung: Die Herstellung von Ammoniumsulfat (Synthesebaustein für Harnstoff) erfolgt durch Einleitung von Ammoniak, einem stechend riechenden, giftigen, zu Tränen reizenden Gas in 80%ige Schwefelsäure). Die erste Harnstoff-Fabrik, die der Herstellung von Düngemitteln diente, wurde seitens der IG Farben im Jahr 1922 errichtet. Harnstoff ist in Folge seines sehr hohen Stickstoffgehalts von rd. 50% seit langem das weltweit bedeutendste Stickstoffdüngemittel.

Formaldehyd, HCHO , ist ein stechend riechendes Gas, das erstmalig 1867 eindeutig identifiziert wurde. Die I. G. Farben begann im Jahr 1905 mit der kontinuierlichen industriellen Produktion von Formaldehyd. Der technologische Durchbruch zur Produktion von Formaldehyd

in großtechnischem Maßstab gelang jedoch erst 1925 mit der Methanol-Synthese. Formaldehyd wurde zunächst primär für Desinfektionsprodukte (u. a. Seifen) und für die Textileinfärbung eingesetzt.

3.2 Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukte bzw. - Klebstoffe

Bereits Ende des 19ten Jahrhunderts wurde erkannt, dass sich mit der Synthese von Harnstoff und Formaldehyd harzartige, klebende Produkte generieren lassen. Im Jahr 1911 ließ sich die „Betriebsgemeinschaft Oberrhein“ der I. G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft das Warenzeichen Kaurit für erste Entwicklungsstufen von Harnstoff-Formaldehydharzen eintragen. Der wesentlichste wissenschaftliche Durchbruch ist sodann H. John zuzusprechen, der in der 1919 angemeldeten deutschösterreichischen Patentschrift Nr. 78251 (N. N. 1918) ein „Verfahren zur Herstellung von Kondensationsprodukten aus Formaldehyd und Harnstoff bzw. Thio-Harnstoff oder anderen Harnstoffderivaten“ beschreibt. Zentraler Punkt des Patentanspruches ist „dass man die Komponenten⁴ in der Hitze und bei Abwesenheit von Kondensationsmitteln aufeinander wirken lässt. Gemäß den Beispielen 1 und 4 der genannten Patentschrift erhält man leimartige Lösungen, die je nach ihren Eigenschaften als Leim dienen sollen.

Die grundlegende Erfindung für die technische Herstellung von Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffen gelang sodann K. Vierling, M. Schmihing und H. Klingenberg in den Jahren 1928/1929. Der IG-Farben-Industrie wurde hierfür das deutsche Reichspatent 550 647 (N. N. 1929) „Verfahren zum Verleimen von Holz, insbesondere von Sperr- und Furnierholz“ erteilt. In der Patentschrift wird ausgeführt (Seite 1, Zeile 28 ff):

„Es wurde nun gefunden, dass man das Verleimen von Holz in der Holzverarbeitenden Industrie, insbesondere bei der Herstellung von Sperrholz, Furnierhölzern und dergleichen in vorzüglicher Weise ausführen kann, wenn man hierbei wässrige Lösungen der Kondensationsprodukte aus Harnstoff, Thioharnstoff oder deren Derivaten und Aldehyden oder deren Polymeren in Gegenwart von Säuren, sauren Salzen oder säureabspaltenden Stoffen verwendet. Man erzielt hierbei eine sehr rasche und außerordentliche feste Vereinigung der einzelnen Holzlagen unter der Presse.

Im Allgemeinen genügt ein Zusatz von 0,4 bis 2 % Säure, berechnet auf das Gewicht des Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsproduktes. Wird zu viel Säure

⁴ Formaldehyd und Harnstoff

zugesezt, so wird der Leim zu viskos, lässt sich schlecht aufstreichen und bindet zu rasch ab. Die Säuren, sauren Salze oder säureabspaltenden Mittel werden dem Leim kurz vor dem Gebrauch zugesezt. Als geeignete Säuren seien beispielsweise genannt: Salzsäure, Schwefelsäure, Phosphorsäure, Essigsäure, Oxalsäure, Michsäure, ferner saure Salze, wie primäres Natriumsulfat ...“.

3.3 Reaktionsschema

In wässrigen, schwach sauren Lösungen bilden sich aus 1 Mol. Harnstoff und rd. 1 – 2 Mol. Formaldehyd zunächst (Mono-) Methylol –und Dimethylolverbindungen. Bild 3.1 zeigt das Reaktionsschema.

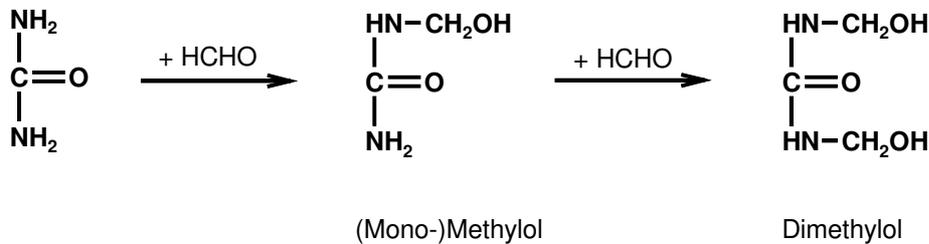


Bild 3.1 Bildungsschema von Mono-Methylol und Dimethylol aus Harnstoff und Formaldehyd

Im weiteren reagieren sodann Methylol- und Dimethylol-Verbindungen in einer Polykondensationsreaktion miteinander und/oder mit Harnstoff, wodurch komplexe Gemische von Kondensationsprodukten entstehen, die Ätherbrücken, R-O-R, oder Methylenbrücken, CH₂-O-CH₂, enthalten. Bei der in schwach saurem Medium ablaufenden Polykondensationsreaktion werden Wassermoleküle abgespalten (Kondensationsreaktion: Vereinigung zweier Moleküle unter Abspaltung eines kleineren).

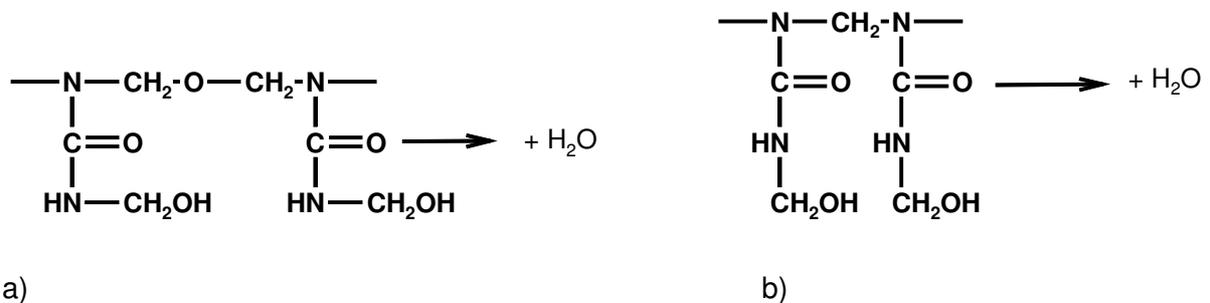


Bild 3.2 Polykondensationsreaktionen von Methylol-Verbindungen
 a) Etherbrückenbildung b) Methylenbrückenbildung

Bei der Herstellung von Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffen wird die skizzierte Kondensationsreaktion vorzeitig durch Neutralisierung der Säure abgebrochen. Im Anschluss erfolgt sodann gegebenenfalls eine Sprühtrocknung zu Pulverleim. Bei der späteren Verklebungsanwendung wird der abgebrochene Polykondensationsvorgang durch reaktionsfördernde Mittel wie Wärme und/oder Härter zu Ende geführt.

3.4 Härter

3.4.1 Allgemeines

Der Wiederanstoß bzw. die Weiterführung der Polykondensationsreaktion, die bei der Leimherstellung unterbrochen wurde, mit messbarer Geschwindigkeit zu einem ausgehärteten Klebstoffpolymer ist wie in der genannten Patentschrift von Vierling et. al. (1929) ausgeführt, ist nur in Gegenwart von Säuren möglich. Die Reaktionsfortführung erfolgt umso schneller, je niedriger der pH-Wert und je höher die Temperatur ist. Die jeweilige Säure, nachfolgend Härter genannt, neutralisiert die zum vormaligen Reaktionsabbruch verwendeten basischen Bestandteile und initiiert durch Freisetzung von H^+ - Ionen die Polykondensationsreaktion. Der Abbindeprozess läuft im sauren Bereich ab. Dies bedeutet auch, dass durch Vorhandensein nichtflüchtiger Alkalien (z. B. Soda) oder säurebindender Stoffe (z. B. Casein, Seife) in Abhängigkeit von der vorhandenen Basenmenge die zur Härtung notwendige Säuremenge neutralisiert werden kann, wodurch der Abbindeprozess nachhaltig gestört wird und Fehlverbindungen auftreten.

Nach Vierling et al. kommen als geeignete Härter beispielsweise die anorganischen Säuren wie Salzsäure, Schwefelsäure (HCL), Phosphorsäure oder Ammoniumchlorid (NH_4Cl) oder organische Säuren wie Essigsäure und Milchsäure in Frage. Als Kalthärter bei der Herstellung von geklebten Vollholzbauteilen bei Raumtemperatur (Hetzer-, Kämpfsteg-, Brett-schichtholzträger) werden nahezu ausschließlich die organischen Säuren - Ameisen- und Zitronensäure - verwendet.

Ergänzend ist auszuführen, dass melaminhaltige Härter einerseits eine Fortführung der Kondensationsreaktion in sehr schwach sauren Lösungen ermöglichen. Andererseits treten bei der Kondensation mit freiem Formaldehyd reaktionsfähige Melamin-Formaldehyd-Kondensate auf, die in Verbindung mit den überwiegend vorliegenden Harnstoff-Formaldehyd-Kondensaten zu Mischkondensaten mit deutlich erhöhter Kochfestigkeit führen. Der skizzierte Wirkungsmechanismus der melaminhaltigen Härter führte letztlich zur

Entwicklung/Einführung der kochfesten Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffe, die heute in Europa bei Flächenverklebungen mit rd. 80 – 90 % Marktanteil dominieren.

Bei der Massivholzverklebung, die üblicherweise bei Raumtemperatur von rd. 20°C stattfindet sowie bei Verklebungen mit leicht bzw. mäßig erhöhten Temperaturen bis ca. 60°C werden sogenannte Kalthärter verwendet. Die Härter werden durchweg pulverförmig geliefert und im Allgemeinen im Wasser zu sogenannten Härterlösungen gelöst. In selteneren Fällen wird das Härterpulver direkt der Stammlösung (Harzpulver und Wasser) bzw. dem flüssig gelieferten Leim zugesetzt (vgl. auch die Tabellen 5.1, 5.2, 5.3 und 7.2). Durch die Einstellung des pH-Wertes und die Härtermengen kann die Reaktivität / Schnelligkeit des Abbindeprozesses in einem weiten Bereich gesteuert werden.

Für die UF-Harze der Kaurit-Klebstofffamilie (siehe Abschnitt 4) wurden/werden fünf unterschiedliche Härtertypen – Schnellhärter Pulver, (Kalt-)Härter gelb Pulver, (Kalt-)Härter rot Pulver, (Kalt-)Härter braun Pulver – eingesetzt. Die beiden Produkte „Härter gelb Pulver“ und „Härter rot Pulver“ sind bis auf Farbe chemisch identisch. Der Einsatz von „Härter rot Pulver“ wurde speziell für die Härterverwendung im sogenannten Härter-Vorstreichverfahren (siehe nachfolgend) empfohlen und realisiert, da der Aufstrich infolge der roten Farbe besser sichtbar ist. Die Härterfabrikate „gelb bzw. rot Pulver“ sind schneller wirksam, d. h. führen zu kürzeren Gebrauchsdauern (Topfzeiten) und Abbindezeiten wie „Härter braun Pulver“. Ab ca. Mitte der 60iger Jahre wurde für Kaurit-Klebstoffe, die für tragende Verwendungen „zugelassen“ wurden, ausschließlich die „(Kalt-)Härter 30 Pulver“ und „70 Pulver“ zugelassen. Hierbei ist „Härter 30 Pulver“ respektive die „Härter 30-Lösung“ wesentlich reaktiver (temperaturabhängig 1,5 – 4fach geringere Topfzeiten, rd. 30 % geringere Presszeiten) als die „Härter 70 Lösung“. In den meisten technischen Merkblättern zur Kaurit-Klebstofffamilie wird „Härter 30 Pulver (Lösung)“ für Verwendungen nach dem sogenannten Härter-Vorstreichverfahren empfohlen während das „langsamer“ wirkende „Härter 70 Pulver“ nur im Untermischverfahren verarbeitet werden darf.

3.4.2 Härterzugabe im Untermisch- und Vorstreichverfahren

Die Zugabe des Härters zur Harzlösung (Harzpulver und Wasser), häufig auch als sog. Stammlösung bezeichnet, bzw. zu der mit Streckmitteln ergänzten Stammlösung (vgl. Abschn. 3.5.3) oder bei anfänglich flüssig vorliegenden Harzlösungen erfolgte bei den UF-Harz-Klebstoffen zum größeren Teil im Untermischverfahren. Hierbei wird die mit Wasser ange-machte Härterlösung mit anwendungsspezifisch bestimmtem Mengenanteil mit der Harzlö-

sung zur gebrauchsfertigen Leimflotte vermischt. In geringerem, jedoch nicht unbeträchtlichem Umfang wurde insbesondere bei den frühen Kaurit-UF-Harzen ein spezielles getrenntes Harz-Härter-Auftragsverfahren, das sog. Härter-Vorstreichverfahren, eingesetzt, das sich wesentlich von dem heute bei Flächenverklebungen weit überwiegend verwendeten getrennten Auftragsverfahren unterscheidet.

Bei den heutigen getrennten Flächenverklebungs-Auftragsverfahren von MUF-Klebstoffen werden die flüssigen Harz- bzw. Härterlösungen in dicht nebeneinander oder übereinander liegenden Klebstoffschnüren unmittelbar vor dem Zusammenlegen der Lamellen aufgegossen. Die innige Vermischung und Reaktion der noch fließfähigen Komponenten erfolgt sodann bei dem Verpressvorgang mit Pressdrücken von rd. $0,7 - 0,9 \text{ N/mm}^2$, wobei zur Sicherstellung der erforderlichen Reaktions-/Vermischungsbedingungen des Weiteren in der ausgehärteten Fuge eine Klebfugendicke von höchstens 0,3 mm nachweislich gewährleistet sein muss.

Im Gegensatz zum skizzierten heutigen getrennten Harz- Härter-Auftragsverfahren wurde bei dem Härter-Vorstreich-Verfahren, häufig auch als Härter-Vorstrich-Verfahren bezeichnet, die Härterlösung separat auf eine der beiden Füge teil(Lamellen)-Oberflächen aufgetragen und die Harz- bzw. Stammlösung auf die andere Füge teiloberfläche. Das Zusammenlegen und Verpressen der beiden bzw. mehrerer Lamellen durfte sodann nicht im noch flüssigen Zustand beider Klebstoffkomponenten erfolgen sondern musste zeitlich versetzt vorgenommen werden. Zunächst wurde die Härterlösung aufgetragen und erst nach vollständigem Abtrocknen der Härterlösung erfolgte der Auftrag der Harzlösung auf die andere(n) Lamelle(n) und sodann das Zusammenlegen und Verpressen der Lamellen. Für das vollständige Abtrocknen der Härterlösung war in den Technischen Merkblättern i.d.R. eine Zeitrahmen von 24 h vorgegeben. Wie vorstehend erwähnt, wurde das Härter-Vorstreich-Verfahren speziell zur Erzielung kurzer Presszeiten in Verbindung mit sehr reaktiven Härtern (z. B. Härter 30 Pulver) mit geringen Topf- und Wartezeiten verwendet.

3.5 Zuschlagstoffe

3.5.1 Allgemeines

Reine UF-Harze weisen ein extrem ausgeprägtes Schrumpfverhalten und eine hiermit verbundene schrumpfbedingte Rissbildung der Klebstoffmatrix auf, die mit zunehmender Klebfugendicke deutlich zunimmt. Das extrem ausgeprägte Schrumpfen reiner UF-Harze beträgt

etwa 30 Volumenprozent (Klemm, 1938; Egner, 1938) und ist infolge weitestgehend fehlender „Erstarrungselastizität“⁵ mit einem vollständigen Zerbrechen dickerer Klebeschichten verbunden. Dies bedingt, dass reine UR-Harze für langfristig beständige dickere Klebfugen > 0,1 mm zunehmend und ab einer Dicke von ca. 0,5 mm völlig ungeeignet sind.

Dieser von Beginn der UF-Harz-Verwendung qualitativ bekannte Sachverhalt wurde zufolge des veröffentlichten Schrifttums quantitativ vergleichsweise spät, u.a. in den Untersuchungen von Egner und Jagfeld (1962) für den Kaurit Leim W Pulver für Fugendicken von 0,6 bis 0,7 mm und 1,0 bis 1,1 mm konsistent nachgewiesen (vgl. auch Abschnitt 6.2).

Eingehendere Untersuchungen dahingehend, ab welcher Klebfugendicke im Bereich von 0,1 mm – 0,6 mm ungestreckte UF-Harze deutlich unzureichende Trocken- und insbesondere Nassscherfestigkeiten aufweisen, sind in der Literatur nicht bekannt. Basierend auf unveröffentlichten Untersuchungen bei der forschenden Stelle ist jedoch davon auszugehen, dass die aus den Schrumpf-Eigenspannungen resultierende gravierende Schädigung der Klebstoffschicht (würfelartiges Bruchmuster) bei den meisten ungestreckten/ungefüllten UF-Harzen bereits bei ca. 0,3 mm Fugendicke deutlich ausgeprägt ist.

Anmerkung: Die Definitionen von dünnen und dicken Klebfugen sind in den heutigen Normen DIN EN 301 und DIN EN 302-1 für Polykondensationsstoffe wie folgt geregelt: Dünne Klebfugen sind solche mit einer Fugendicke von ca. 0,1 mm und dicke Fugen weisen Klebfugendicken von $1,0 \pm 0,1$ mm auf. Ergänzend hierzu ist jedoch auszuführen, dass es anerkannter Stand der Technik ist, dass bereits Klebfugen > 0,3 mm und insbesondere solche mit Fugendicken $\geq 0,6$ mm als dicke Fugen bezeichnet werden. Nach Egner und Jagfeld (1962) erfüllen ausschließlich Klebfugen mit Dicken $\leq 0,1$ mm den Tatbestand dünner Fugen und Fugen mit Dicken > 0,1 mm werden als (unterschiedlich) dicke Fugen bezeichnet. Dies dürfte technisch speziell auch im Hinblick auf UF-Harze die zutreffendste Abgrenzung von dünnen und dicken Fugen sein.

Durch geeignete Zuschlagsstoffe und -mengen lässt sich insbesondere eine wesentliche Verbesserung der „Erstarrungselastizität“ und damit eine Reduzierung oder gänzliche Ver-

⁵ Der zuerst von Klemm (1938) eingeführte und sodann von Egner (1938) übernommene Begriff der „Erstarrungselastizität“ bezeichnet das Rissbildungsverhalten während der Volumenschrumpfung wasserbasierter natürlicher und künstlicher Klebstoffe. Bei niedriger „Erstarrungselastizität“ liegt eine extreme Rissbildung in der volumenmäßig ausgeprägt (30 – 50 %) geschrumpften Klebstoffschicht vor, während bei hoher „Erstarrungselastizität“ wesentlich reduziertere oder gar keine Rissbildungen auftreten.

meidung des schrumpfbedingten Zerreißen der Klebstoffmatrix erzielen. Durch die Zuschlagstoffe wird auch der zeitliche Verlauf der Volumenschrumpfung verlangsamt. Der Endwert der Volumenschrumpfung nach ca. 18 Tagen liegt jedoch bei reinen UF-Harzen und solchen mit Zuschlagsstoffen, sodann abhängig von den jeweiligen Mischungsverhältnissen, in vergleichbarer Größenordnung von rd. 20 - 30 Volumenprozent (Klemm, 1938). Die gravierenden Defizite reiner UF-Harze führten bereits sehr früh nach Einführung des ersten industriell hergestellten UF-Harzes (Kaurit-Leim W flüssig) im Jahr 1931 zur Entwicklung und Verwendung geeigneter Zuschlagstoffe. Bei den Zuschlagstoffen ist zu unterscheiden zwischen (inerten) Füllmitteln und Streckmitteln.

3.5.2 Füllstoffe

Füllmittel sind fein(st) gemahlene pulverförmige Stoffe auf organischer oder anorganischer Basis, die nicht oder kaum quellen und die insbesondere keine eigene Klebekraft haben. Bahnbrechend in der Füllstoffentwicklung war die 1936 von Hanns Klemm zum Patent angemeldete Füllstoff-Modifikation des Kaurit Klebstoffs W flüssig mittels gemahlenem Bakelit Kunstharzpulver⁶. Bakelit ist ein duroplastischer Phenol-Formaldehyd-Polykondensations-Kunststoff der, basierend auf der Erfindung von Baekeland im Jahr 1905 der weltweit erste industriell produzierte Kunststoff war (N.N. 1905). (Anmerkung: Phenole fielen vormalig bei der Destillation von Steinkohle in großem Umfang an und Bakelite war billiger als Harnstoff-Formaldehyd).

Der in Böblingen bei Stuttgart ansässige Flugzeugkonstrukteur und Flugzeugindustrielle Klemm stellte die Unzulänglichkeiten reiner UF-Harze bei der von ihm entwickelten Halbschalenbauweise von Holz-Flugzeugrümpfen fest (vgl. Supf, 1955). Bei dieser Herstellung werden Spanten, Stringer und die Sperrholz-Flugzeughaut in einem Herstellvorgang verklebt, wobei die Realisierung durchgängig dünner Klebefugen bedingt durch die früheren Herstellmethoden nicht realisierbar war. Durch Beimengung von 5 – 10 % gemahlenem Bakelit-Pulver zu dem UF-Harz Kaurit W flüssig gelang Klemm sodann die Herstellung eines Klebstoffs mit einer gegenüber dem Ausgangsprodukt wesentlichen geänderten Eigenschaft, nämlich einer drastisch reduzierten Schrumpfrissbildung mit zunehmender Aushärtung. Durch die Zugabe des inerten Füllstoffs wurde des Weiteren der Klebstoff thixotropiert, was

⁶ Die mittels des Bakelit-Füllstoffs erhaltenen Verbesserungen der Leistungseigenschaften des reinen UF-Harzes Kaurit W flüssig sind in der Dissertation Klemm (1938) sowie komprimiert bei Egner (1938) beschrieben. Die eigentliche Patentschrift konnte nicht eruiert werden.

die Streichbarkeit und das „Stehenbleiben“ der dickeren Klebstoffuge verbesserte. Der Bakelit-Pulver gefüllte Kaurit Leim W flüssig wurde 1936 von Klemm unter dem Namen „Klemm“-Leim eingeführt. Im Jahr 1938 übernahm die Firma I.G. Farben das Klemm'sche Patent und vertrieb den Klebstoff sodann in pulvergetrockneter Form unter der Markenbezeichnung Kaurit-Leim WHK (Pulver).

Die durch die Füllstoffmodifikation mittels Bakelit-Pulver erreichten Verbesserungen betreffend „Erstarrungs-Elastizität“ waren zum Einen grundlegend für den Erfolg der neuartigen Klemm'schen Leichtflugzeugbauweise und eröffneten zum Anderen neue und insbesondere verlässlichere Anwendungen im Holz-Hochbau (Egner, 1938). Inerte (Partikel-)Füllstoffe, wie z. B. das von Klemm verwendete Bakelit-Pulver bedingen im Allgemeinen jedoch auch ungünstige Bearbeitungs-Begleiterscheinungen. Bei Bauteilen, die mit derart gefüllten Klebstoffen hergestellt sind, wird insbesondere die Abnutzung von Hobelmessern und Sägeblättern in Folge der granularen Füllstoffpartikel extrem erhöht. Bei neueren Klebstoff-Entwicklungen mit inerten Klebstoffzusätzen, z. B. bei dem Fabrikat Synteko 1206 mit Partikel-gefülltem Härter Synteko 2747 (Fa. Casco Adhesives) wurden die genannten Bearbeitungsnachteile der ausgehärteten Klebstofflotte durch Wahl eines Füllstoffs mit geringerer Härte deutlich reduziert.

3.5.3 Streckmittel

Als Streckmittel werden feingemahlene Stoffe auf organischer Basis bezeichnet, die Quell- und Verkleisterungseigenschaften aufweisen. Kennzeichnend für viele organische Streckmittel ist, dass sie in unterschiedlich ausgeprägtem Umfang eigene Klebekraft besitzen. Für die Streckung von Harnstoffharz-Leimen lassen sich nicht alle bekannten Streckmittel einsetzen. Für die Eignung sind im Wesentlichen die Parameter - Mahlfeinheit, Wasseraufnahmevermögen, Quell- und Verkleisterungsfähigkeit, eigene Klebkraft, pH-Wert und Aschegehalt - von ausschlaggebender Bedeutung. Die wichtigsten bei UF-Harzen verwendeten bzw. untersuchten Streckmittel lassen sich entsprechend ihrer pflanzlichen Herkunft in

- stärkehaltige Mehle (Getreidemehle und Getreidenachmehle)
- eiweißreiche Mehle (Wicken-, Erbsen-, Bohnenmehle)
- abgewandelte Stärkeprodukte (kaltwasserlösliche Quellschmelze) und
- Kokosnussschalen-Mehle

einteilen.

Die unterschiedlichen Streckmehlarten weisen nach BASF (1986) eine Reihe deutlicher Unterschiede auf. So haben stärkehaltige Mehle eine gute Verkleisterungsfähigkeit und verhindern dadurch weitgehend das Durchschlagen des Leims. Diese Mehle dürfen jedoch keinen zu großen Schalenanteil besitzen. Eiweißreiche Mehle neigen zu vorzeitiger Austrocknung und erfordern längere Presszeiten; derartige Mehle weisen sodann eher geringe Lagerstabilitäten auf, was sich auf die praktische Verwendung sehr nachteilig auswirkt. Abgewandelte Stärkeprodukte, wie z. B. native Stärken und Zellulosederivate können wegen ihrer hohen Wasseraufnahmefähigkeit nur in geringen Mengen zugegeben werden, womit man Leimansätze mit geringem Trockengehalt erzielt. Die nachstehend zitierte Quelle (BASF, 1986) beleuchtet die Thematik und Problematik der Streckmittel anschaulich: „Bei richtiger Auswahl der Streckmittel können nicht nur die Verleimungskosten gesenkt, sondern zugleich auch technische Vorteile erreicht werden“.

Streckmittel spielen im Zusammenhang mit der Klebfugenfestigkeit und –beständigkeit von Harnstoff-Formaldehyd-Verklebungen eine ausschlaggebende Rolle. Sie wirken sich einerseits positiv im Hinblick auf deutlich verbesserte Fugenfüllungseigenschaften der Klebstoffe aus. Andererseits reduzieren sie auf Grund ihrer absolut gesehen deutlich geringeren Klebefestigkeit als die eigentlichen Harze die Kohäsionsfestigkeit der Klebstoffschicht und tragen erheblich zu einer deutlich verminderten Wasserbeständigkeit bei.

Die Verarbeitung der Streckmittel bzw. –mehle erfolgt im Falle pulverförmiger UF-Harze nahezu durchweg wie folgt: Zuerst wird die sogenannte Stammlösung bestehend aus dem UF-Harz-Pulver und Wasser (meist in Gewichtsteilen (GWT) von 2 – 3 GWT Harz zu 1 GWT Wasser) angesetzt. Nach einer Reifezeit der Stammlösung von ca. 15 bis 20 Stunden wird sodann das Streckmehl mit ca. 30% bis 50% GWT bezogen auf die Harz-Gewichtsteile unter Verwendung von zusätzlichem Wasser (z. B. 50% GWT Wasser bezogen auf GWT Harz) zugegeben; vgl. hierzu auch die Abschnitte 5 und 7.

Wie aus den vorstehenden Ausführungen ersichtlich, kam der Auswahl, den Eignungsprüfungen und der Festlegung von Anforderungskriterien an geeignete Streckmittel von Anfang der UF-Harz-Entwicklung und Verwendung eine nahezu ebenso bedeutsame Rolle zu wie der Entwicklung der eigentlichen Harze. Da ungefüllte und ungestreckte reine UF-Harze für Verklebungen unter praxisrelevanten Bedingungen weitgehend untauglich waren/sind, wurden seitens der Anwender bereits von Anfang an und sodann ohne Vorliegen dokumentierter

wissenschaftlicher Erkenntnisse speziell zur Fugenbeständigkeit diverse der vorstehend genannten Streckmittel eingesetzt⁷.

Systematische wissenschaftliche Untersuchungen zur Eignung spezieller Streckmittel und unterschiedlicher Streckmittelgehalte wurden erstmalig, vergleichsweise spät, von Egner und Jagfeld (1962) berichtet. In der hier, in Abschnitt 6.2 ausführlich besprochenen Arbeit von Egner und Jagfeld wurde insbesondere das von der Holzindustrie favorisierte Erbsen-Bohnen-Mehl (EB-Mehl) aus geschälten Sämereien untersucht. Des Weiteren wurden die Leistungseigenschaften von Kokosnussschalenmehl „Vavanite“ mit Mahlfeinheit von 300 mesh geprüft. Die Untersuchungen zeigten, dass Art und Menge des Streckmittel-Zuschlags einen extremen Einfluss auf die Festigkeit und Beständigkeit der UF-Verklebungen haben. Bei den Untersuchungen zur Kurzzeitfestigkeit und zum Alterungsverhalten zeigte sich im Falle von EB-Mehl ein Streckmittelzusatz von 30 % als am besten geeignet (vgl. hierzu die Ausführungen in Abschnitt 6.2). Streckungen mit Kokosnussmehl ergaben durchweg unzureichende Ergebnisse.

In einer weiteren Arbeit (Egner et al., 1969) wurde insbesondere der Einfluss des Alters unterschiedlicher Streckmehle – Industriemehl EB, Ahama Leimträger B und Bonit JB bzw. Bonit 125 – untersucht. Die Alter der jeweiligen Mehle variierten von einem Monat bis zu maximal rd. 4 Jahren. Ältere Streckmehle, die teilweise verklumpt waren, wurden vor der Zugabe in Mörsern glatt gerieben. Die Untersuchungen ergaben keinen erkennbaren Einfluss der verwendeten Streckmehle auf die Viskosität, den PH-Wert der Leimmischung und auf die Bindefestigkeit, sofern die Mehle vorschriftsmäßig kühl und trocken gelagert wurden. Bezüglich eingehender Bewertungen der Untersuchungen vgl. Abschnitt 6.3.

⁷ Die zufolge Angaben in den jeweiligen Klebstofflisten der MPA Universität Stuttgart zulässigen Streckmehltypen und –mengen beruhen nachweislich seit Ende der 1950iger Jahre auf Untersuchungen gemäß den „Richtlinien für Prüfverfahren zur Ermittlung des Verhaltens der Leime in tragenden Holzbauteilen“. Die Prüfverfahren umfassten neben den Längszugscher- und Kreuzscherprüfungen vergleichbar den heutigen Prüfungen nach DIN EN 302-1 und DIN EN 302-4 zusätzliche Massivholzverklebungen an Buche, Eiche, Kiefer und Fichte, die über die heute genormten Klebstoffprüfverfahren deutlich hinausgehen (vgl. u.a. Egner und Jagfeld (1962) sowie Egner und Abele (1961)).

4 Entwicklungsgeschichte der Kaurit-Harnstoffharz-Leime

Die erstmalige technische Herstellung eines Harnstoffharzklebstoffs, d. h. eines Kondensationsprodukts aus Harnstoff und Formaldehyd erfolgte unter dem Markennamen Kaurit-Leim (Produkt: Kaurit-Leim W flüssig) 1931 in Ludwigshafen durch die I. G. Farben-Industrie. Der Holzindustrie, die bis dahin neben den in bestimmtem Umfang verwendeten Phenol-Harzen nahezu ausschließlich auf tierische und pflanzliche Leime (Leim = Klebstoff in wässriger Lösung) angewiesen war, wurde damit ein völlig neuer, gänzlich aus synthetisch hergestellten Ausgangsprodukten aufgebauter Klebstoff zur Verfügung gestellt.

Die weitere Entwicklungsgeschichte der Harnstoffharze wurde bis in die 70iger Jahre primär durch die I. G. Farbenchemie und sodann durch die Firma BASF geprägt. In der Folgezeit hat insbesondere auch die Firma Casco Adhesives, Akzo Nobel, die Weiterentwicklung der UF-Harze betrieben. Aus den genannten historischen Gründen und wegen der dominierenden Verwendung der Kaurit-Leime in Bestandsbauten in Deutschland wird nachfolgend exemplarisch die Entwicklungsgeschichte der UF-Harze am Beispiel der Kaurit-Klebstofffamilie in Tabelle 4.1 aufgezeigt.

Jahr	Klebstofffabrikat	historische, entwicklungsgeschichtliche Aspekte und wesentliche technische Änderungen / Randbedingungen
1931	Kaurit-Leim W flüssig	Erstmaliges "Auf-den-Marktbringen" eines industriell hergestellten, synthetischen UF-Leims durch die I.G. Farben-Industrie. Eigenschaften/Nachteile: Die begrenzte Lagerungsstabilität von etwa 3 Monaten beeinträchtigte den Absatz bei Kleinverbrauchern und den Export (wegen der damals sehr langen Frachtzeiten). Der Ausweg aus diesem Dilemma war die Entwicklung der Sprühtrocknung, was zur Entwicklung des Pulverklebstoffs Kaurit-Leim W Pulver (Einführung 1938, siehe unten) führte.
1936	Klemm Leim	Der Flugzeugkonstrukteur und -Fabrikant Hanns Klemm meldet ein Deutsches Reichspatent für ein Verfahren zur Fugenfüllung von Kaurit-Leim W flüssig durch Zusatz von pulverförmig gemahlenem Bakelit-Kunststoff an (Bakelit = duroplastischer Phenol-Formaldehyd-Kunststoff; der erste von Baekeland erfundene industriell hergestellte Kunststoff (N.N. 1908).
1938	Kaurit-Leim W Pulver	Die pulverförmige sprühgetrocknete Variante des Kaurit-Leims W flüssig wird das Standard-UF-Harz in Pulverform
1938	Kaurit-Leim WHK (Pulver)	Die I. G. Farbenindustrie übernimmt das Klemm'sche Verfahren der Fugenfüllung, d. h. den Klemm-Leim in Lizenz und bringt den Klebstoff in Pulverform auf den Markt (das Kürzel HK steht für Hanns Klemm)
1939	Kaurit-Leim W flüssig Kaurit-Leim W Pulver Kaurit-Leim WHK Pulver Kaurit-Leim F flüssig	Es sind die genannten vier Kaurit-Klebstofffabrikate am Markt.
1945	Kaurit-Leim Fabrikat unbekannt	Wiederaufnahme der völlig zum Erliegen gekommenen Klebstoff-Produktion; einige Produktionsstätten waren trotz mehrfacher Bombentreffer in brauchbarem Zustand
1950	wie 1939	Es gab wieder die gleiche Kaurit-Produktpalette für Holz-Konstruktionsverklebungen wie 1939
1960	Kaurit-Leim WHK 220 Pulver	Der Klebstoff ist im Wesentlichen identisch mit dem Produkt Kaurit-Leim WHK (Pulver)
1960	Kaurit-Leim W 234 Pulver	Der Klebstoff stellt eine Modifikation des Ursprungsklebstoffs Kaurit-Leim W Pulver dar
1968	Kaurit-Leim 270 flüssig	Weiterentwicklungen der Kaurit-Leim-Familie
1970	Kaurit-Leim 220 Pulver	
1971	Kaurit-Leim 234 Pulver	

Tabelle 4.1 Entwicklungsgeschichte der Harnstoffharzklebstoffe der Firmen I.G. Farben-Industrie, Klemm und BASF

5 Eigenschafts- und Anwendungsprofile ausgewählter Harnstoffharz-Klebstoffe

Im Folgenden werden Details der Eigenschafts- und Anwendungsprofile einiger ausgewählter Harnstoffharzklebstoffe aufgeführt. Die genannten Eigenschaften und Anwendungsbereiche fußen hierbei ausschließlich auf den meist historischen Angaben in den Technischen Merkblättern der jeweiligen Klebstoffe.

5.1 Kaurit-Leim WHK 220 Pulver

„Kaurit-Leim WHK 220 Pulver ist ein fugenfüllender Leim. Er dient zur Verleimung von Werkstücken mit mäßiger Passgenauigkeit, insbesondere im Ingenieurholzbau. Der Klebstoff wurde von der MPA Stuttgart geprüft. Die Verleimungen sind beständig gegen Luftfeuchtigkeiten und –temperaturen, wie sie z. B. bei überdachten Gebäuden auftreten. Die Verarbeitung erfolgt vorwiegend im Kaltverfahren (BASF, 1961)“. Bezüglich der Zusammensetzung ist angegeben: „pulverförmiges, konfektioniertes Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukt“.

Die wichtigsten Eigenschaften und Anwendungsbereiche sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt in der weitergehend bezüglich Details auf die Tabellen 5.2 bis 5.5 verwiesen wird. Im Einzelnen sind sodann in Tabelle 5.2 Gelier- bzw. Topfzeiten der Leimflotte in Abhängigkeit vom Härtertyp, dem Lösungsverhältnis der Härterlösungen und dem Leim-Härterlösungsverhältnis aufgeführt. In Tabelle 5.3 sind Angaben zu Gebrauchsdauern und Presszeiten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Härtern und Verwendungstemperaturen enthalten. Die Tabellen 5.4 und 5.5 geben die erforderlichen Mischungsverhältnisse von Leimpulver bzw. –lösung zu Härterpulver bzw. –lösung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Härtern einerseits bezogen auf die sogenannten Stammlösung (Tab. 5.4) und andererseits bezogen auf die Leimpulvermenge (Tab. 5.5) an. Die Angaben in den Tabellen 5.4 und 5.5 beziehen sich primär auf den Klebstofftyp Kaurit-Leim WHK 220 Pulver; mit angegeben sind auch die Mischungsverhältnisse für den in Abschnitt. 5.3 aufgeführten Klebstofftyp Kaurit-Leim 234 Pulver.

Die Tabellen 5.2 – 5.5 weisen die sehr variablen Verarbeitungsgrenzen des Klebstofftyps Kaurit-Leim WHK 220 Pulver aus. in Abhängigkeit von den jeweiligen Härtern, Wassermengen und Umgebungstemperaturen aus.

Farbe	hellbraun
Lieferform	pulverförmig
Lagerfähigkeit in geschlossener Originalverpackung	ca. 6 Monate bei 20 °C ¹⁾
Verarbeitung (Leimlösung)	2,5 (bzw. 3) ^{*)} Gewichtsteile WHK 220 Pulver werden in 1 Gew. Tl. Wasser (15 - 20 °C) gelöst (= Leimlösung). *) Sofern im Untermischverfahren gearbeitet wird, empfiehlt es sich zur Vermeidung einer eventuell zu starken Verdünnung der Leimmischung, den Pulveranteil von 2,5 Gew.Tl. auf 3 Gew.Tl. zu erhöhen.
Reifezeit der Leimlösung	Die Lösung soll etwa 1 Stunde reifen. Entwurf: Die Lösung sollte zweckmäßig über Nacht reifen. Die Lösung ist vor dem Gebrauch gut durchzurühren. Die Behälter sind abzudecken.
Haltbarkeit der Leimlösung	Es wird empfohlen, nur Lösungen für den Bedarf eines Tages anzusetzen. Entwurf: ca. 4 Tage in gut geschlossenem Behälter
verwendbare (pulverförmige) Härter	Schnellhärter Pulver, Kalthärter gelb Pulver, Kalthärter braun Pulver, Härter 40 Pulver, Härter 70 Pulver (nur im Untermischverfahren, vorzugsweise in der warmen Jahreszeit)
Lösungsverhältnis Härterpulver: Wasser	siehe Tabelle 5.2 bis Tabelle 5.5
Mischungsverhältnis Härterlösung / Leimlösung	siehe Tabelle 5.2 bis Tabelle 5.5
zusätzliche Wasserverdünnung	keine
Verarbeitung	Vorstrich- oder Untermischverfahren
Anmerkung zum Vorstreichverfahren	Im Vorstrichverfahren erweist sich bei sehr dicker Leimfuge ein beidseitiges Härtervorstreichen als vorteilhaft, um eine gleichmäßige Durchhärtung zu erzielen. Der Härterauftrag muss vor dem Zusammenlegen der Teile vollständig aufgetrocknet sein (ca. 12 % Holzfeuchtigkeit).
Gelierzzeit	siehe Tabelle 5.2
Gebrauchsdauer der Leim-Härter-Mischung	siehe Tabelle 5.3
Gesamtpresszeit in Stunden	siehe Tabelle 5.3

¹⁾ zur Lagerfähigkeit von Kaurit-Leim WHK 220 Pulver: Das Pulver muss gut verschlossen (luftdicht) und kühl, möglichst unter 20 °C gelagert werden. Das Pulver muss vor Feuchtigkeitszutritt geschützt werden, da es sonst zusammenklumpt (auch bereits unter Einfluss der Luftfeuchtigkeit) und nach einiger Zeit unlöslich wird. Verklumptes Pulver kann solange verarbeitet werden, als es noch zerkleinert und in Wasser gelöst werden kann.

Tabelle 5.1 Eigenschaften und Anwendungen von Kaurit-Leim WHK 220 Pulver gemäß Technischem Datenblatt vom Januar 1961 (BASF, 1961) bzw. gemäß vorläufiger Arbeitsanweisung (BASF, 1959) des Technischen Datenblattes vom Dezember 1959

Härter	Lösungsverhältnis der Härterlösung		Härterlösung auf KAURIT-Leim WHK 220 Pulver-Leimlösung (2,5 : 1) in %	°C	
	Härterpulver GWT	Wasser GWT		20	30
Schnellhärter Pulver	30	70	-	vorstreichen	
Härter gelb Pulver	15	85	5	58'	24'
Härter braun Pulver	15	85	10	60'	26'
Härter 40 Pulver	17	83	10	1h 36'	43'
Härter 70 Pulver	50	50	10	3h	1h 15'

Tabelle 5.2 Gelierzeiten (Richtwerte)⁸ von Kaurit-Leim WHK 220 Pulver (BASF, 1961)

Kaurit-Leim WHK 220 Pulverlösung Leimlösung 2,5 : ¹⁾	GWT	100	100	100
Härter gelb-Lösung	GWT	5	-	-
Härter 40-Lösung	GWT	-	10	-
Härter 70-Lösung	GWT	-	-	10
Gebrauchsdauer der Leim-Härter-Mischung bei ca. 20 °C	Stunden (h)	45'	1h 15'	2,5 h
	Minuten (')	15'	35'	1 h
Gesamtpresszeiten ¹⁾ in Stunden bei ca. 20 °C	Stunden (h)	2,5 h	3,5 h	4h 45'
	Minuten (')	1 h	2 h	3h 15'

¹⁾ Zur Verkürzung der Presszeit kann auch eine der beiden Leimflächen vorgewärmt werden, während auf die andere die Leim-Härter-Mischung aufgetragen wird. Die Teile sollten in diesem Falle sofort zusammengelegt und unter Pressdruck gebracht werden.

Tabelle 5.3 Hinweise für die Verarbeitung (Gebrauchsdauer, Presszeit) von Kaurit-Leim WHK 220 Pulver in Abhängigkeit von unterschiedlichen Härtern und Umgebungstemperaturen (BASF, 1961)

Anmerkung: Die Tabelle gibt einige Hinweise für die Verarbeitung von Kaurit-Leim WHK 220 Pulver. Die in der Tabelle enthaltenen Zeiten sind Richtwerte, die tatsächlich erforderlichen Zeiten sind von den betrieblichen Verhältnissen abhängig.

⁸ Anmerkung: Unter dem Begriff Gelierzeit wird im heutigen Sprachgebrauch die Topfzeit respektive die Gebrauchsdauer verstanden, die nach DIN EN 302-7 bestimmt wird. Hierbei ist die Topfzeit / Gebrauchsdauer als die Zeit definiert, die ein gebrauchsfertiger Klebstoff bei 20 ° Celsius braucht, bis seine scheinbare Viskosität nach dem Brookfield-Verfahren (EN ISO 2555) auf 25000 mPa · s angestiegen ist.

Klebstofftyp	Härtertyp	Härterlösung		Stammlösung		Leimflotte		Zusatz Streck- mehl ¹⁾
		Pulver	Wasser	Pulver	Wasser	Stamm- lösung	Härter- lösung	
		Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.	
Kaurit-Leim WHK 220 Pulver	Schnellhärter Pulver	30	70	2,5	1	Vorstreichen		-
	Härter gelb Pulver	15	85	2,5	1	100	5	-
	Härter braun Pulver	15	85	2,5	1	100	10	-
	Härter 40 Pulver	17	83	2,5	1	100	10	-
	Härter 70 Pulver	50	50	2,5 (3)	1	100	10	-
Kaurit-Leim 234 Pulver	Härter 30 Pulver	15	85	1	1	100	7,5	25
	Härter 70 Pulver	50	50	1	1	100	7,5	25

¹⁾ Bonit 125 oder Walzit 250

Tabelle 5.4 Mischungsverhältnisse (bezogen auf die Stammlösung) für Kaurit-Leim WHK 220 Pulver (BASF, 1961) und Kaurit-Leim 234 Pulver (BASF und Klemm-Technik, 1980)

Klebstofftyp	Härtertyp	Leim- pulver	Härter- pulver	Wasser	Feststoff- anteil ¹⁾ Leimflotte	Mischung in Gew. Tl. gemäß			
						Leim- pulver	Härter- lösung	Wasser	Zusatz
						Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.
	-	Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.	%	Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.	Gew. Tl.
Kaurit-Leim WHK 220 Pulver	Härter gelb Pulver	100	1,05	45,95	69	100	7	40	-
	Härter braun Pulver	100	2,1	51,9	66,3	100	14	40	-
	Härter 40 Pulver	100	2,38	51,62	66,5	100	14	40	-
	Härter 70 Pulver	100 (100)	7 (6,67)	47 (40)	69,5 (72,7)	100 (100)	14 (13,3)	40 (33,33)	-
Kaurit-Leim WHK 234 Pulver	Härter 30 Pulver	100	2,25	112,75	57,5	100	15	100	50 ²⁾
	Härter 70 Pulver	100	7,5	107,5	59,4	100	15	100	50 ²⁾

¹⁾ einschließlich Zusatzstoffe

²⁾ Bonit 125 oder Walzit 250

Tabelle 5.5 Mischungsverhältnisse (hier ermittelt in Bezug auf die Leimpulvermenge) für Kaurit-Leim WHK 220 Pulver und Kaurit-Leim 234 Pulver

5.2 Kaurit-Leim W 234 Pulver

Im ersten Technischen Merkblatt (BASF, 1960) vom März 1960 wird ausgeführt: „Kaurit-Leim W 234 Pulver“ wird zusammen mit Härtern sowohl im Kalt- als auch im Heißverfahren bei der Sperrholz-, Türen- und Möbelherstellung sowie im holzverarbeitenden Handwerk verwendet. Kaurit-Leim W 234 Pulver ergibt Verleimungsfestigkeiten, die im Kaltverfahren dem Test JF 20⁹ gemäß DIN 68705 entsprechen.

Im Technischen Merkblatt (BASF, 1960) wird das Kleben tragender Holzbauteile nicht berührt und für Kaltverklebungen wird explizit ausgewiesen, dass nur Verleimungsfestigkeiten gemäß JF 20 erreicht werden, das heißt nachweislich lediglich eine Beständigkeit der Klebfuge bei kurzzeitiger (24h) Kaltwasserlagerung.

5.3 Kaurit-Leim 234 Pulver

Ein Vergleich der verfügbaren Technischen Merkblätter und der Prüfberichte zu diesem Klebstoff von der Ersteinführung (1971) bis zum Jahr 2006 zeigt eine für viele Klebstoffentwicklungen typische Aufweitung des Einsatzspektrums, hier z. B. auch unter Einbezug neuer Streckmittel.

a) In den Technischen Merkblättern (BASF, 1971; 1976) wird ausgeführt: „Kaurit-Leim 234 Pulver wird zusammen mit Härtern sowohl nach dem Kalt- als auch nach dem Heißverfahren in der Sperrholz-, Türen- und Möbelherstellung sowie im holzverarbeitenden Handwerk verwendet. Je nach Leimansatz erhält man Verleimungsfestigkeiten, die die Testanforderungen für JF 20, JW 67 oder A 100 nach DIN 68705 erfüllen. Gemäß Technischem Merkblatt W 234 Pulver“ vom März 1976 [BASF, 1976] wird das Kleben tragender Holzbauteile nicht berührt und für Kaltverklebungen wird explizit ausgewiesen, dass nur Verleimungsfestigkeiten gemäß IF 20 erreicht werden, d. h. nachweislich lediglich eine Beständigkeit der Klebfugen bei kurzzeitiger (24 h) Kaltwasserlagerung.

b) In den Technischen Datenblättern (BASF und Klemm-Technik; 1980 sowie BASF und Türmerleim Werke GmbH, 1983) wird ausgeführt: „Kaurit-Leim 234 Pulver ist ein reines Harnstoff-Formaldehyd-Kondensat der BASF, das in Verbindung mit den Streckmehlen Bonit 125 oder Walzit 250 mit den Härtern 30 und 70 Pulver verarbeitet wird. Die Verleimungen sind fugenfüllend und beständig gegen Luftfeuchtig-

⁹ Die Wasserlagerungsvorbehandlung der Verleimungsprüfungen JF 20 JW 67 und A 180 gemäß DIN 68705 sind in nachfolgender Zusammenstellung aufgeführt.

Ansatz-Nr.	11
Kaurit-Leim 234 Pulver	100
Wasser	50
Leguminosenmehl zugelassen für tragende Bauteile	50
Wasser	50
Härter-70-Lösung 1:1	15
Gebrauchsdauer [h] bei 20 °C bei 30 °C	3h 30' 1h 15'
erforderliche spezifische elektrische Arbeit bei Parallelheizung $\left[\frac{W_{\min}}{\text{cm}^2} \right]$	1,5
Querheizung $\left[\frac{W_{\min}}{\text{cm}^3} \right]$	3,3

Tabelle 5.6 Leimflottenzusammensetzung in Gew. Tl. und erforderliche Leistungsdaten für die Hochfrequenzaushärtung des Klebstoffs Kaurit-Leim 234 Pulver gemäß Ansatz Nr. 11 für die Verleimung tragender Bauteile gemäß (BASF, 1978; 1984)

6 Literaturrecherche und -auswertung

6.1 Allgemeines

Eine der zentralen Aufgaben des Forschungsvorhabens bestand in umfassenden Literaturrecherchen und -auswertungen zu Harnstoff-Formaldehyd-Leimen, -Streckmitteln und – Verklebungen. Insgesamt wurden 150 Veröffentlichungen respektive öffentlich zugängliche Prüf- und Forschungsberichte evaluiert. Des Weiteren wurden rd. 50 nicht veröffentlichte interne UF-Klebstoff-Prüfberichte und Technische Klebstoffdatenblätter sowie die Klebstofflisten der MPA Universität gesichtet. Die Literaturrecherchen und -auswertungen dienten den folgenden primären Zielsetzungen:

- Zusammenstellung des weltweiten Standes des Wissens zur Dauerhaftigkeit von Harnstoffharz-Verklebungen bei unterschiedlichen Klimaeinwirkungen und hierauf aufbauend, die Erstellung einer vergleichenden Bewertung der Literaturaussagen.
- Erhalt von Erkenntnissen dahingehend, wie viele Harnstoffharzfabrikate über die vier Fabrikate, die heute in der Klebstoffliste¹⁰ der MPA Universität Stuttgart aufgeführt werden, für tragende Holzbauteilverklebungen eingesetzt worden sind.

Die Literaturrecherchen umfassten insbesondere auch die technischen Merkblätter der verwendeten Harnstoffharzleime, die teilweise vergleichend hinsichtlich der Verarbeitungsparameter bzw. –vorgaben ausgewertet wurden. Hierbei sollten, sofern möglich, Klebstoffe mit sehr engen Verarbeitungsgrenzen (Fugendicken, Gebrauchsdauern, Temperaturbeschleunigung) extrahiert werden. Es sollte eine Klassifizierung der Harnstoffharzklebstoffe hinsichtlich Verarbeitungs- und Anwendungssensitivität erfolgen.

Der Abschnitt 25 des Forschungsberichtes enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten ausgewerteten Literaturstellen. Hierbei wird differenziert nach öffentlich zugänglicher Literatur, MPA-internen Prüfungsberichten sowie Normen und Patentschriften.

¹⁰ http://www.mpa.uni-stuttgart.de/organisation/fb_1/abt_12/listen_und_verzeichnisse/klebstoffliste_1_05_03_2012.pdf
(Stand 05.03.2012)

Nachstehend werden die Inhalte der wichtigsten Publikationen und Prüfberichte im jeweils erforderlich erachteten Umfang dargestellt und mit Bezug auf die Fragestellungen des Forschungsvorhabens kritisch analysiert.

6.2 Veröffentlichung von Egnér und Jagfeld (1962) – „*Untersuchungen an Harnstoffharzleimen mit Streck- und Füllmitteln für die Leimung von tragenden Holzbauteilen*“

6.2.1 Allgemeines

Einleitend wird ausgeführt, dass Leime für Bauzwecke kaltaushärtend, lange gebrauchsfähig (= lange Topfzeit), schnellbindend und beständig in dicken Leimfugen (Dicke über 0,1 mm) sein müssen. *„Während Resorcinharzleime in dicken Leimfugen gute Beständigkeiten aufweisen, ist dies i.d.R. bei ungefüllten UF-Leimen nicht der Fall“*. Hervorgehoben wird:

„Beständigkeit in dicken Leimfugen ist aber Voraussetzung dafür, dass in großen geleimten Bauteilen auch bei nicht einwandfreier Passung (kleine Dickenabweichungen von Brettern, örtlich leicht unterschiedlicher Pressdruck) befriedigende Leimbindung erreicht wird.“

Im Weiteren wird darauf hingewiesen, dass mit dem bereits vor dem 2ten Weltkrieg entwickelten und in Deutschland in großem Umfang verwendeten Kaurit-Leim WHK gute, in zahlreichen Forschungsarbeiten über 25 Jahre (Anmerkung: keine Literaturzitate) gute Beständigkeit in dicken Leimfugen nachgewiesen wurde. Nachteilig bei Verwendung des Klebstoffs WHK ist jedoch der verhältnismäßig hohe Verschleiß der spanabhebenden Werkzeuge infolge des Füllmittel-Zusatzes an ausgehärtetem Kunstharzpulver. Dies führte zur Suche nach Füll- und Streckmitteln, die günstigere Standzeiten der Bearbeitungswerkzeuge ergeben.

„Als geeignet erschienen der Praxis bestimmte organische Streck- oder Füllmittel, die als Mehle vom Verarbeiter und nicht vom Leimhersteller der Leimflotte zugegeben werden, und die überdies im Gegensatz zu Kaurit-Leim WHK helle Leimfugen ergeben.“

Da keine ausreichenden Unterlagen zur Beurteilung derartiger Streck- und Füllmittel vorlagen, wurde seitens der Autoren ein vom Ministerium für Wohnungsbau, Städtebau und

Raumplanung gefördertes Forschungsvorhaben zum Einfluss unterschiedlicher Streckmittelanteile auf die Festigkeitseigenschaften durchgeführt. Hierbei wurden insbesondere auch die Auswirkungen der Streckmittelgehalte auf das Alterungsverhalten bis zur Dauer eines Jahres untersucht.

6.2.2 Untersuchte Leime, Streckmittel, Leimansätze, Streckmittelzusätze und Auftragsverfahren

6.2.2.1 UF-Leime mit organischen Streckmitteln

Für die Untersuchungen zum Einfluss der Streckmittel bzw. deren Anteile wurde der Klebstoff (Harz) Kaurit-Leim W 234 Pulver in Verbindung mit dem langsam wirkenden Härter 70 verwendet. Die Verwendung der Klebstofflotte erfolgte im Untermischverfahren (Harz und Härter vermischt in der Klebstofflotte). Als Streckmittel wurden zwei unterschiedliche organische Stoffe verwendet:

- 1) EB-(Industrie-)Mehl; ein organisches Mehl, das vorwiegend aus geschälten Sämereien (Erbsen, Bohnen) hergestellt wird, und
- 2) Kokosnussschalenmehl „Vavanite“ mit Mahlfineinheit 300 mesh.

Im Falle des EB-Mehls wurde eine sehr weitgespannte Bandbreite von 10 % bis 100 % Mehlzusatz auf die Leimlotte untersucht. Die Streckung mit Kokosmehl wurde ausschließlich mit einem Gewichtsteile(GWT)-Prozentsatz von 10 % der Leimlotte (Harzpulver + Wasser) untersucht.

Die Herstellung und Verarbeitung der mit EB-Mehl bzw. Kokosnussschalenmehl gestreckten Klebstoffloten erfolgte durchweg im Normalklima 20 °C/65% rel. LF. Die ungestreckte Kaurit-Leim W 234-Leimlotte wurde immer im Verhältnis 2 GWT Leimpulver : 1 GWT Wasser angerührt und anschließend 16 h abgedeckt gelagert. Der Streckmehlzusatz wurde getrennt von der Leimlotte jeweils im Verhältnis 1 GWT Streckmehl : 1GWT Wasser mit Wasser angerührt und ebenfalls 16 h gelagert. Anschließend wurden die Leimlotte und die Streckmehllotte gemischt und der Härter zugesetzt. Bezüglich der jeweils verwendeten GWT-Prozentsätze vgl. Tabelle 6.1.

Leimflotte			Mehlflotte (EB-Mehl)				Leim + Mehl- flotte
Kaurit-Leim W234 Pulver	Wasser	Pulver + Wasser = Leimflotte	Streckmehl- zusatz bezüglich Leimflotte	Mehl	Wasser	Mehl+Wasser = Streckmehl- lösung	
GWT	GWT	GWT	%	GWT	GWT	GWT	GWT
(100) 66,7	(50) 33,3	(150) 100	10	10	10	20	120
			20	20	20	40	140
			30	30	30	60	160
			50	50	50	100	200
			100	100	100	200	300

Tabelle 6.1 Zusammenstellung der von Egner und Jagfeld (1962) untersuchten Leim- und Streckmehl (EB-Mehl)-Ansätze

6.2.2.2 UF-Referenzleim mit Kunstharzpulver-Füllmittel

Als UF-Referenzklebstoff mit nachweislich guter Beständigkeit in dicken Klebstoffugen wurde der Bakelite-gefüllte Klebstoff Kaurit-Leim WHK Pulver in Verbindung mit Kalthärter rot, der im Vorstrichverfahren (getrennter Harz-Härterauftrag) aufgetragen wurde, verwendet. Die Mischungsverhältnisse der Leim- und der Härterflotte sind in Tabelle 6.2 aufgeführt. (Anmerkung: In der Veröffentlichung von Egner und Jagfeld 1962 wird das Kunstharzpulver-Füllmittel durchgängig als anorganisches Füllmittel bezeichnet, was nach heutiger Terminologie unzutreffend ist. Das Bakelitpulver-Füllmittel ist organischer Natur, jedoch synthetisch hergestellt).

Leimflotte			Härterflotte		
WHK-Pulver	Wasser	Pulver + Wasser	Kalthärter rot	Wasser	Härter + Wasser
GWT	GWT	GWT	GWT	GWT	GWT
100	40	140	15	85	100

Tabelle 6.2 Harz-Härter Mischungsverhältnis des UF-Referenzleims „WHK Pulver-Kalthärter rot“ bei Egner und Jagfeld (1962)

6.2.2.3 PRF-Referenzleim

Als weiterer Referenzklebstoff wurde der Phenol-Resorcin-Formaldehyd(PRF)-Leim Kauresin-Leim 440 flüssig in Verbindung mit 15 % Härterpulverzusatz verwendet. Der Auftrag erfolgte im Untermischverfahren.

6.2.3 Prüfkörper, Fugendicken, Versuche, Klimabehandlungen

Die Untersuchungen zum Einfluss des Streckmitteltyps und –gehalts wurden mittels dreier unterschiedlicher Prüfkörpertypen bzw. Prüfverfahren durchgeführt:

- a) Längszugscherprüfungen nach DIN 53254 (Anmerkung: der Prüfkörpertyp und das Prüfverfahren entsprechen EN 302-1),
- b) Kreuzscherprüfungen analog zu den heutigen Prüfungen nach EN 302-4,
- c) Blockscherprüfungen an 3lagig faserparallel verklebten Prüfkörpern.

Die Prüfungen wurden mit unterschiedlichen Fugendicken bzw. Fugendickenbereichen von 0,1 mm, 0,6 – 0,7 mm und 1,0 – 1,1 mm, zwei Holzarten (Fichte, Buche) und mit verschiedenen Klima- bzw. Wasserbeanspruchungen durchgeführt. Nachfolgend wird ausschließlich über die im Mittelpunkt des Interesses stehenden Längszugscherprüfungen berichtet, an denen der Einfluss des Streckmehlzusatzes und das Alterungsverhalten primär untersucht wurden. Die Alterungsversuche wurden **ausschließlich** im Normklima 20°C/65% rel. LF durchgeführt. Die Prüfungen zur Nassbindefestigkeit erfolgten vergleichbar wie bei der Lagerungsfolge A2 nach EN 301 nach 4tägiger Kaltwasserlagerung mit vorhergehender 7tägiger Aushärtezeit nach der Verklebung im Normklima.

6.2.4 Versuchsergebnisse

6.2.4.1 Aushärtedauer bzw. Abbindegeschwindigkeiten

Bezüglich der Ermittlung der Aushärtedauer ist folgendes anzumerken: Die Aushärtedauer (auch Abbindegeschwindigkeit genannt) bezeichnet wie in der heutigen EN 302-6 die Zeitspanne zwischen dem vollen Anliegen des Pressdrucks und dem Zeitpunkt derjenigen Prüfung, bei der erstmalig ein bestimmtes Längszugscherfestigkeitsniveau erhalten wird. Als Anforderungsniveau gilt in EN 302-6 ein Zugscherfestigkeitswert von 4 N/mm² bei ausschließlicher Zugrundelegung von Längszugscherprüfkörpern aus Buchenholz gemäß EN 302-1.

In der Arbeit von Egner und Jagfeld wurde die Aushärtungsdauer primär an Langholzverleimungen gemäß DIN 53254 (entspricht 302-1) mit Fichtenholz untersucht, wobei als Grenzwert 4 N/mm^2 zugrunde gelegt wurde. Bei den in geringerem Umfang vorgenommenen Untersuchungen zur Aushärtedauer von Langholzverklebungen aus Buchenholz wurde ein erhöhtes Anforderungsniveau von 6 N/mm^2 zugrunde gelegt.

Die Versuchsergebnisse belegen prinzipiell plausibel einen erheblichen Anstieg der Aushärtedauer mit zunehmender Klebfugendicke und zunehmendem Streckmehlzusatz. So stieg die Aushärtedauer, die bei der 0,1 mm dicken Fuge und 0 % Streckmittelzusatz 4 Stunden betrug auf über 170 Stunden bei der 1 – 1,1 mm dicken Fuge mit 50 % Streckmehlzusatz.

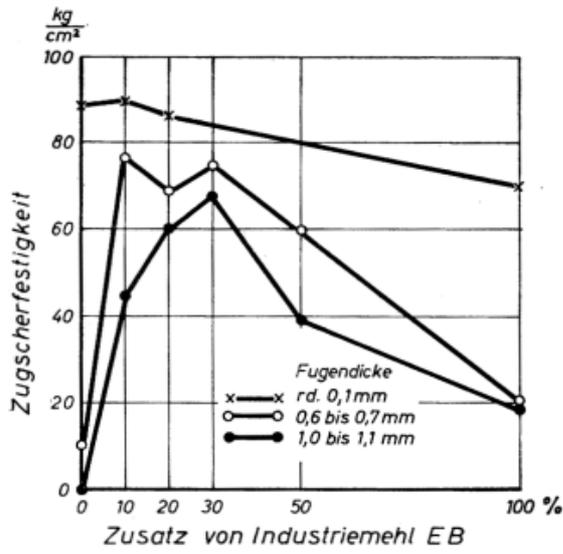
6.2.4.2 Einfluss des Streckmittelgehalts auf die Längszugfestigkeiten

6.2.4.2.1 EB-Mehl, Fichtenholzverklebungen

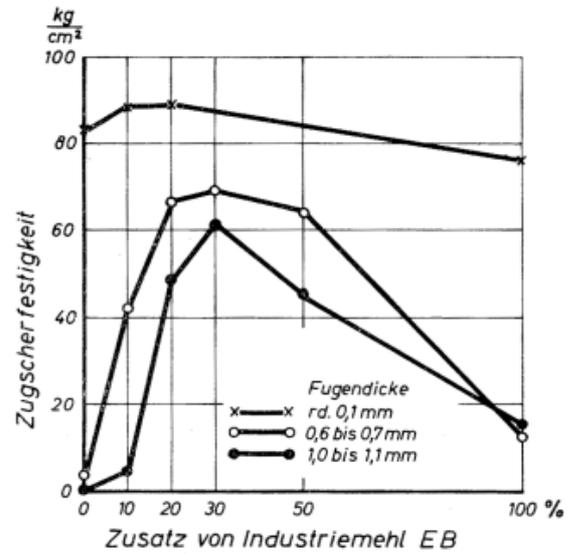
Die Bilder 6.1 a-c zeigen die Zusammenhänge zwischen der **Trocken**-Zugscherfestigkeit und dem Streckmittelanteil für diskrete Fugendicken von 0,1 mm, 0,6 – 0,7 mm und 1,0 bis 1,1 mm sowie Fugen/Proben-Alterungszeiträumen von 7 Tagen, 30 Tagen und einem Jahr. Der Zusammenhang zwischen der **Nass**-Scherfestigkeit (7 Tage Aushärtung bzw. Alterung und anschließend 4 Tage Kaltwasserlagerung) und dem prozentualen Streckmittelzusatz ist für die drei untersuchten Fugendicken in Bild 6.1 d dargestellt.

Aus den Bildern 6.1 a-c für die **Trocken**-Zugscherfestigkeiten gehen anschaulich für alle dargestellten Alterungszeiträume (7 Tage, 30 Tage sowie 1 Jahr) gut vergleichbar die folgenden Sachverhalte hervor:

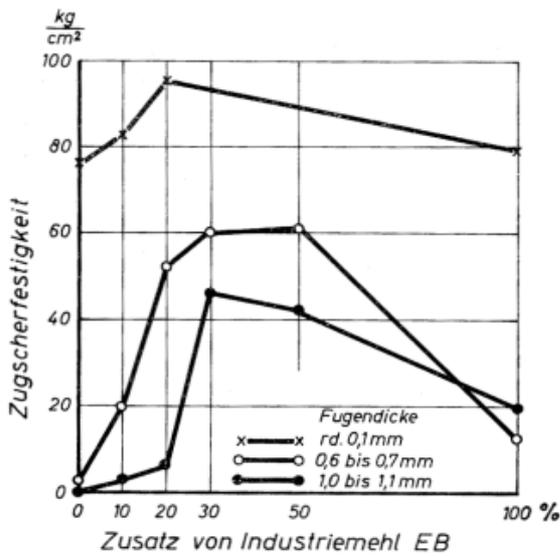
- a) Bei der **dünnen Fuge (0,1 mm)**, die unabhängig vom EB-Mehlgehalt die höchsten Festigkeiten aufweist, wirkt sich der prozentuale Streckmittelgehalt vergleichsweise gering aus. Die Festigkeiten nehmen im Falle geringer Zusätze (bis maximal 20 %–30 %) geringfügig/mäßig zu und fallen bei 100 % Streckmehlzusatz wieder auf den Ausgangswert des reinen, ungestreckten Harzes bzw. einen gegenüber dem Ausgangswert rd. 20 % niedrigeren Wert ab.



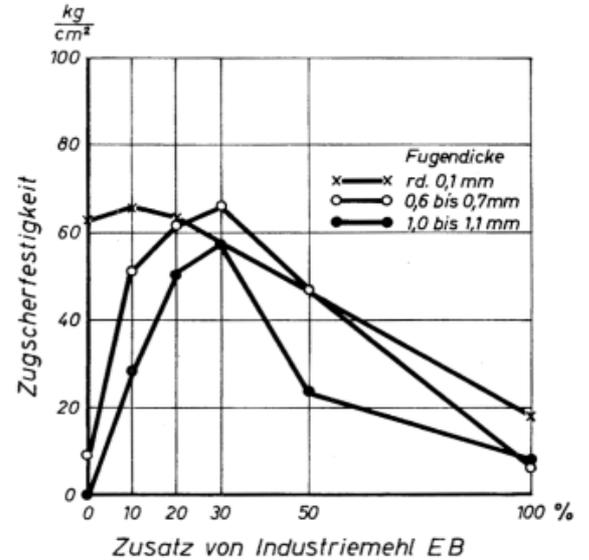
a)



b)



c)



d)

Bild 6.1 a–d

Zugscherfestigkeiten von trocken bzw. nass geprüften Längszugscherprüfkörpern aus Fichtenholz in Abhängigkeit vom prozentualen Streckmittelanteil sowie den Parametern Fugendicke und Alterungsdauer

a) Trockenprüfung, 7 Tage Alterung

b) Trockenprüfung, 30 Tage Alterung

c) Trockenprüfung, 1 Jahr Alterung

d) Nassprüfung, 7 Tage Alterung vor 4tägiger Wasserlagerung

(aus Egner und Jagfeld, 1962)

- b) Bei den **dicken Fugen (0,6 – 0,7 mm sowie 1,0 – 1,1 mm)** zeigt sich hingegen ein bei beiden Fugendickenbereichen qualitativ gleicher, gegenüber der 0,1 mm Fuge völlig anderer Einfluss des Streckmehlgehalts. Ohne Streckmehlzusatz weist die Klebfuge eine verschwindend geringe Festigkeit auf. Die Trocken-Zugscherfestigkeiten nehmen sodann mit zunehmendem Streckmehlgehalt bis zu einem Maximum respektive bis zu einem Maximalwertplateau zu, das abhängig von der Aushärte- bzw. Alterungszeit einem Streckmittelanteil von rd. 20 % – 50 % zuzuordnen ist (siehe nachfolgend). Mit weiter zunehmendem Streckmittelgehalt, der jedoch nur mittels des extremalen Streckmehlzusatzes von 100 % geprüft wurde, fallen die Zugscherfestigkeiten erheblich auf ein sehr niedriges Festigkeitsniveau von rd. 1,5 – 2 N/mm² ab.

Der skizzierte Sachverhalt unterscheidet sich bei der 1,0 – 1,1 mm dicken Fuge im Vergleich zur 0,6 – 0,7 mm dicken Fuge dadurch in gewissem Maße, dass einerseits die Festigkeiten durchweg, teilweise deutlich, niedriger liegen (Ausnahme: 0 % und 100 % Zusatz) und, dass andererseits das Festigkeits-Maximalwertplateau einer geringeren Bandbreite des Streckmehlzusatzes von rd. 20 – 40 % zugeordnet ist.

Vergleicht man die vorstehend für die **Trocken**-Zugscherfestigkeiten beschriebenen Einflüsse unterschiedlicher Streckmehlzusätze mit den in Bild 6.1d für die **Nass**-Zugscherfestigkeiten dargestellten Zusammenhängen, so ergeben sich folgende Unterschiede:

- c) Bei der Nass-Zugscherfestigkeit wirkt sich nunmehr – auch bei der dünnen Fuge (0,1 mm) – ein Streckmehlgehalt größer rd. 25 - 35 % zunehmend in hohem Maße festigkeitsmindernd aus.
- d) Der Abfall der Nass-Zugscherfestigkeiten ist bei größeren Streckmittelgehalten ($\geq 40\%$) im Gegensatz zu den Trockenscherfestigkeiten bei allen Fugendicken vergleichbar deutlich/extrem ausgeprägt. Bei 50 % EB-Mehlzusatz liegen die Festigkeiten nur noch bei rd. 45 % – 70 % der Maximalwerte (45 % bei der 1,0 – 1,1 mm dicken Fuge). Bei 100 % Streckmehlzusatz betragen die Nass-Zugscherfestigkeiten bei der dünnen Fuge weniger als 2 N/mm² und bei den dickeren Fugen weniger als 1 N/mm².

Das Festigkeitsoptimum der Nass-Zugscherfestigkeit liegt bei Betrachtung aller geprüften Fugendicken von 0,1 – 1,1 mm etwa bei 25 – 35 % Streckmehlzusatz.

Unter Berücksichtigung aller Ergebnisse betreffend Trocken- und Nassscherfestigkeiten, unterschiedliche Alterungszeiträume (nur bei den Trockenscherfestigkeiten) sowie unterschiedliche Fugendicken von 0,1 mm bis 1,1 mm ergibt ein rd. 30%iger EB-Streckmehlzusatz in grober Näherung die höchsten Festigkeiten. Diese bereits von den Autoren Egnér und Jagfeld getroffene Feststellung wird im Rahmen der hier vorgenommenen Neubewertung der Versuchsergebnisse bestätigt.

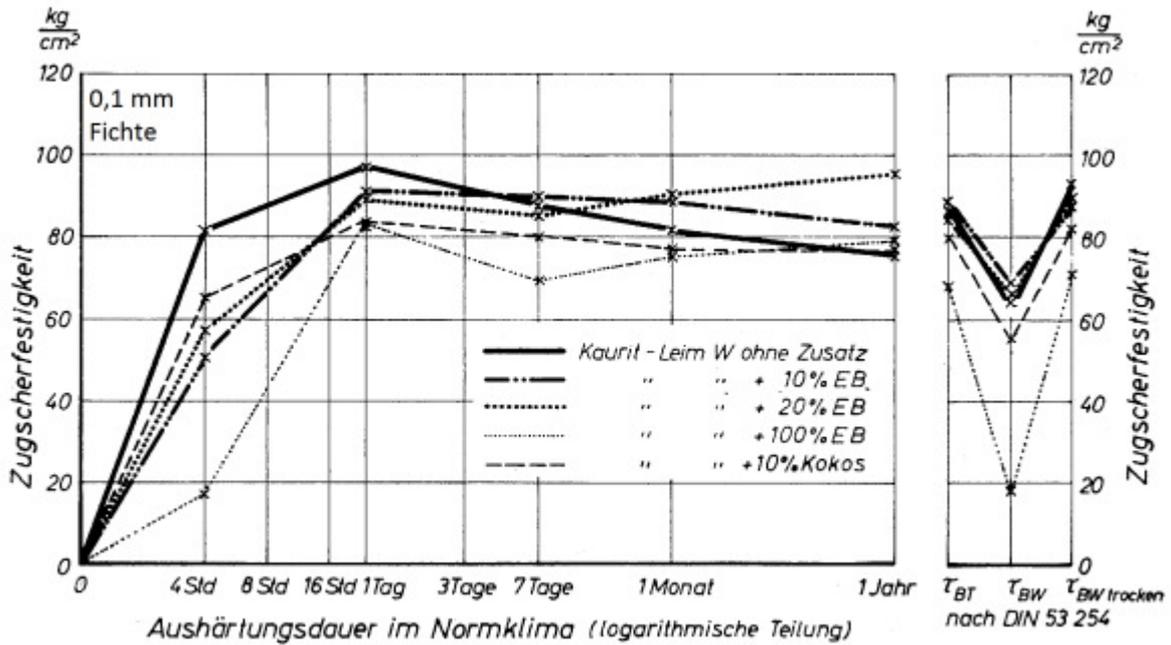
6.2.4.2.2 Kokosnussschalenmehl, Fichten- und Buchenholzverklebungen

Die Versuche an mittels 10 % Kokosnussschalenmehl-Zusatz gestrecktem Klebstoff ergaben bei der 1 mm dicken Klebefuge der Fichtenholzprüfkörper (Bild 6.4) und bei der 0,6 mm dicken Klebefuge mit Buchenholzfügeteilen (Bild 6.3) sehr ungenügende Trocken- und Nassscherfestigkeiten. Diese Streckmehlvariante wurde daher seitens Egnér und Jagfeld im Weiteren nicht eingehender diskutiert und konsequenter Weise auch nicht für die Praxis empfohlen.

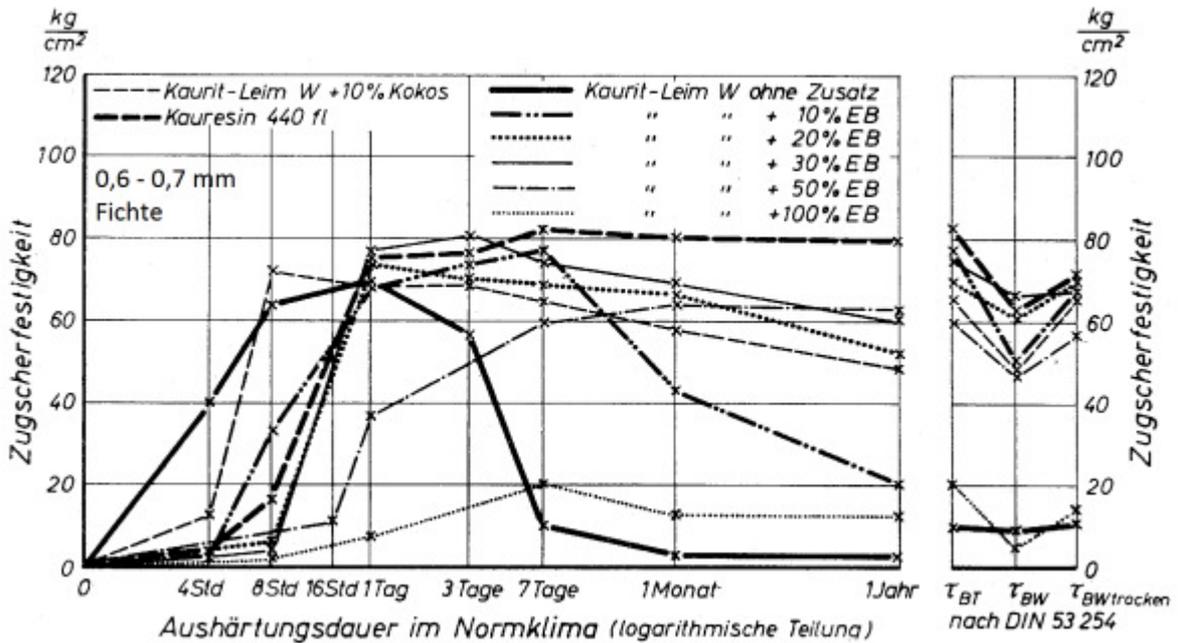
6.2.4.3 *Einfluss des Streckmittelgehalts auf das Alterungsverhalten unterschiedlich dicker Klebefugen*

6.2.4.3.1 Fichtenholzverklebungen

Die Bild 6.2a-b und Bild 6.3 zeigen die Längszugscherfestigkeiten der Fichtenholzprüfkörper - hergestellt mit unterschiedlichem Klebstoff-Streckmittelgehalten - in Abhängigkeit von der Alterungszeit bei Normalklimabedingungen, jeweils getrennt für die Klebstofffugendicken 0,1 mm bzw. 0,6 – 0,7 mm und 1,0 – 1,1 mm. Zusätzlich zum Zugscherfestigkeits-Alterungsverhalten sind in den Graphen die Trocken-, Nass- und Wiedertrockenfestigkeiten (Lagerungsfolgen 1, 6 und 7) für die jeweiligen Prüfzeitpunkte gemäß DIN 53254 angegeben. Für eine quantitative Diskussion der Versuchsergebnisse wurden die genannten Bilder im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhaben bezüglich der Trockenscherfestigkeiten zu den Alterungszeitpunkten 7 Tage und 1 Jahr ausgewertet, siehe Tabelle 6.3. In Tabelle 6.3 sind des Weiteren für alle untersuchten Klebstoff-, Streckmittelzusätze- und Fugendicken-Konfigurationen die Verhältniszahlen der Festigkeiten nach einjähriger Alterung bezogen auf die Festigkeiten nach (eintägiger) und siebentägiger Alterung/Aushärzzeit angegeben. Nachstehend werden die Alterungsergebnisse der Fichtenholzprüfkörper getrennt für die einzelnen Klebfugendicken bzw. Klebfugendickenbereiche diskutiert.



a)



b)

Bild 6.2 a–b Längszugscherfestigkeiten von Fichtenholzprüfkörpern hergestellt mit unterschiedlichen gestreckten UF-Klebstoffen und einem Referenz-PRF-Klebstoff in Abhängigkeit von der Alterungsdauer im Normklima

a) Fugendicke 0,1 mm;

b) Fugendicke 0,6–0,7 mm;

(aus Egner und Jagfeld, 1962)

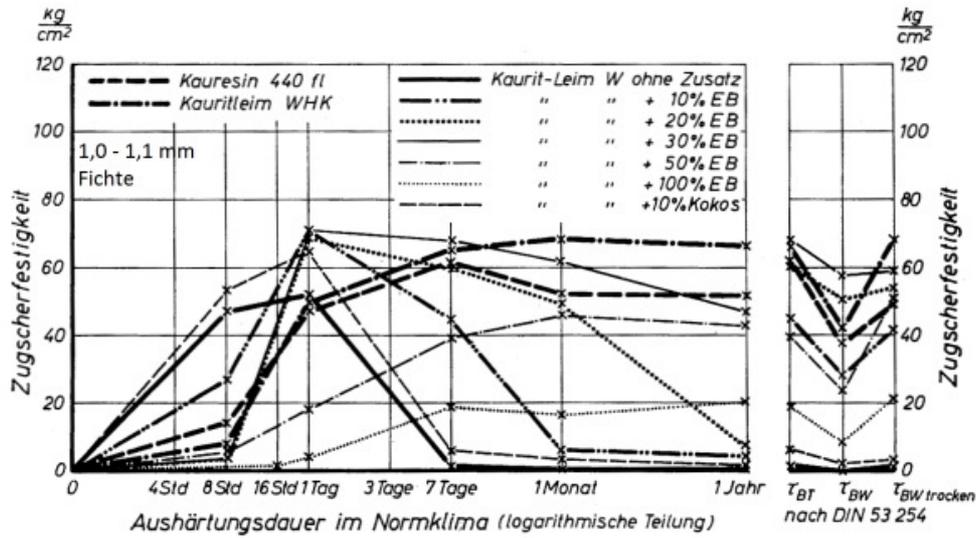


Bild 6.3 Längszugscherfestigkeiten von Fichtenholzprüfkörpern mit Fugendicken von 1,0 – 1,1 mm hergestellt mit unterschiedlichen gestreckten UF-Klebstoffen und einem Referenz-PRF-Klebstoff in Abhängigkeit von der Alterungsdauer im Normklima (aus Egnér und Jagfeld, 1962)

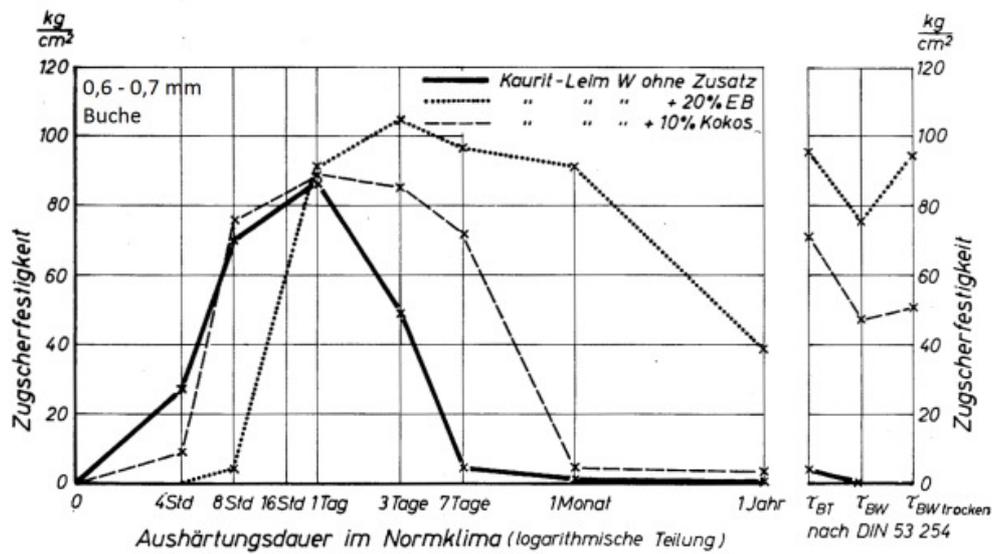


Bild 6.4 Längszugscherfestigkeiten von Buchenholzprüfkörpern mit Fugendicken von 0,6 – 0,7 mm hergestellt mit unterschiedlich gestreckten UF-Klebstoffen in Abhängigkeit von der Alterungsdauer im Normklima (aus Egnér und Jagfeld, 1962)

a) 0,1 mm Klebfugendicke: Wie aus Bild 6.2 a ersichtlich, liegt bei allen Klebstoffkonfigurationen bis zu einem Alterungszeitpunkt von rd. 24 h ein Anstieg der Zugscherfestigkeit infolge fortschreitender Aushärtereaktion des Klebstoffs vor. Nach einer Aushärtungs- bzw. Alterungszeit von ein bis sieben Tagen erfolgten mit Ausnahme des ungestreckten und des mit 10 % EB-Mehl gestreckten UF-Klebstoffs Kaurit-Leims W 234 keine Festigkeitsabnahmen bis zur Alterungsdauer von einem Jahr. Bei den mit 20 % und 100 % EB Mehlzusatz gestreckten Klebstoffen wurden nach einjähriger Alterung sogar rd. 10 % höhere Festigkeiten erhalten. Die Festigkeitsabnahmen des ungestreckten und des 10 %-ig gestreckten UF-Klebstoffs betragen bezüglich der Eintagesfestigkeit 23 % bzw. 10 % und bezüglich der 7-Tage-Festigkeit 14 % bzw. 8 %.

b) 0,6 – 0,7 mm Klebfugendicke: Der Zusammenhang zwischen Zugscherfestigkeit und Alterungsdauer zeigt für den PRF-Referenzklebstoff nach Ende der Aushärtezeit von 7 Tagen erwartungsgemäß (nahezu) keinen Festigkeitsabfall innerhalb der einjährigen Alterungszeit. Im Gegensatz dazu war bei allen UF-Klebstoffkonfigurationen (Ausnahme Kaurit-Leim W 234 mit 50 % Streckmehlzusatz, siehe unten) ein unterschiedlich ausgeprägter, teilweise erheblicher Festigkeitsabfall mit zunehmender Alterungszeit festzustellen (vgl. Bild 6.2 b). Bei 0 %, 20 % und 30 % Streckmehlzusatz betragen die Festigkeitsabnahmen nach einjähriger Alterungszeit bezogen auf den 7-Tage-Wert 70 %, 84 %, 24 % und 20 %. Bei 100 % Streckmehlzusatz lag ebenfalls ein 35 %iger Festigkeitsabfall vor; dies ist jedoch vor dem Hintergrund der absolut extrem niedrigen Festigkeiten (ebenso wie im Falle des unverstärkten Klebstoffs) im Grunde belanglos. Bei einem Streckmehlzusatz von 50 % wurde im Gegensatz zu den niedrigen Zusätzen von 10 %, 20 % und 30 % sowie gegenüber dem sehr hohen Streckungsgrad von 100 % kein alterungsbedingter Festigkeitsabfall festgestellt. Innerhalb des Alterungszeitraums von 7 Tagen bis zu einem Jahr lag ein vergleichsweise konstantes Festigkeitsniveau von rd. 6 N/mm² vor.

Klebstoff	Streckmittel	Zeitpunkt der Prüfung und Festigkeitsverhältnisse 1 Jahr/7 Tage bzw. (1 Jahr/1 Tag)	Trocken-Zugscherfestigkeit in N/mm ² in Abhängigkeit von der Fugendicke (in mm)		
			0,1	0,6 - 0,7	1,0 – 1,1
W 234 Pulver	kein Streckmittel	7d (1d)	8,75 (9,80)	1,00	0,20
		1 J	7,50	0,30	0,05
	10 % EB	1J/7d bzw. (1J/1d)	0,86 (0,77)	0,30	0,25
		7d (1d)	9,0 (9,15)	7,70	4,5
	20 % EB	1 J	8,25	2,00	0,4
		1J/7d bzw. (1J/1d)	0,92 (0,90)	0,26	0,09
	30 % EB	7d	8,50	6,88	6,00
		1 J	9,60	5,25	0,70
	100 % EB	1J/7d	1,13	0,76	0,12
		7d	--	7,5	6,75
	1 J	1J/7d	--	0,80	0,70
		7d	6,92	2,00	1,85
1 J	1 J	7,80	1,30	2,00	
	1J/7d	1,13	0,65	1,08	
Kauresin 440 flüssig (PRF)	-	7d	--	8,15	6,1
		1 J	--	7,95	5,2
Kaurit-Leim WHK	Kunstharz-pulver	1J/7d	--	0,98	0,85
		7d	--	--	6,60
1 J	1J/7d	1 J	--	--	6,60
		1J/7d	--	--	1,00

Tabelle 6.3

Zusammenstellung der Trocken-Zugscherfestigkeiten des UF-Klebstoffs Kaurit-Leim W 234 Pulver mit unterschiedlichen Streckmehl (EB-Mehl-) Zusätzen in Abhängigkeit von der Alterungszeit der Verklebungen. Des Weiteren sind die Verhältnisse der Festigkeiten nach einem Jahr Alterung bezüglich der Eintages- bzw. Siebentage-Festigkeiten aufgeführt. Mit angegeben sind die Festigkeiten bzw. Festigkeitsverhältnisse der Referenzklebstoffe Kauresin 440 flüssig (PRF-Klebstoff) und des Kaurit-Leims WHK.

c) 1,0 – 1,1 mm Klebfugendicke: Die beiden Referenzklebstoffe – der kunstharzgefüllte UF-Klebstoff WHK und der PRF-Klebstoff – zeigten, wie in Bild 6.3 dargestellt, vergleichbar wie bei der Fugendicke 0,6 - 0,7 mm keine bzw. keine nennenswerte alterungsbedingte Abnahme der Festigkeiten. (Anmerkung: Dies trifft genaugenommen auch für den mit 100 % EB-Mehl gestreckten UF-Klebstoff zu, wobei jedoch das absolute Festigkeitsniveau so niedrig liegt, dass eine Bewertung des Alterungsverhaltens technisch belanglos ist). Die mit 10 %, 20 % und 30 % EB-Mehl Zusatz gestreckten UF-Verklebungen zeigten vergleichbar wie bei der 0,6 – 0,7 mm dicken Klebfuge, nun jedoch noch ausgeprägter, einen erheblichen alterungsbedingten Festigkeitsabfall. Bezogen auf das Festigkeitsmaximum, das bei den drei genannten Streckmehl-Zuschlagsmengen jeweils nach eintägiger Aushärtung erreicht war, lagen die Festigkeiten nach einem Jahr nur noch bei rd. 5 % , 8 % bzw. 65 % der Ausgangsfestigkeit.

Bei einem Streckmehlzusatz von 50 % war – wie bei der 0,6 - 0,7 mm dicken Fuge – kein alterungsbedingter Festigkeitsabfall zu beobachten. Die Festigkeit nahm mit deutlich langsamerer Aushärtegeschwindigkeit gegenüber geringeren Streckmehlzusätzen bis zu einer Aushärte/Alterungsdauer von einem Monat stetig zu und blieb sodann bis zum längsten untersuchten Alterungszeitpunkt von einem Jahr quasi konstant. Unabhängig vom zufriedenstellenden Alterungsverhalten ist jedoch darauf hinzuweisen, dass das absolute Festigkeitsniveau im Aushärte/Alterungszeitraum von 1 - 12 Monaten nur rd. 4,3 N/mm² betrug und damit gegenüber dem Festigkeitsplateau der 0,6 – 0,7 mm dicken Fuge im nämlichen Zeitraum um rd. 30 % niedriger lag.

6.2.4.3.2 Buchenholzverklebungen

Das Zugscherfestigkeits-Alterungsverhalten der Buchenholzproben, das ausschließlich mit 0,6 – 0,7 mm dicken Klebefugen in Verbindung mit drei unterschiedlichen Streckmehlgehalten (0%, 10 % und 20 %) untersucht wurde, ist in Bild 6.4 dargestellt. Die Graphen veranschaulichen für den nichtgestreckten und für den mit 10% Kokosmehl-Zusatz gestreckten Klebstoff eine auf nahezu Null abfallende Scherfestigkeit nach rd. einem Monat Alterungszeit. Im Falle eines 20%-igen Streckmehl-Zusatzes fiel die Festigkeit nach Erreichen eines Maximalwertes bei rd. 3tägiger Aushärtezeit stetig auf rd. 40 % des Höchstwertes nach einjähriger Aushärtedauer ab.

6.2.5 Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse

Nachstehend werden in den Punkten 1. - 4. einige Textpassagen aus Egner und Jagfeld (1962) hinsichtlich der Ergebnisse der Längszugscherprüfkörper wörtlich bzw. „quasi“ wörtlich wiedergegeben. Unter Punkt 5. werden die Schlussfolgerungen der Autoren Egner und Jagfeld wörtlich zitiert.

1. „In der Regel erreichten sämtliche Verleimungen ihre Höchstfestigkeit nach 1 bis 7 Tagen (Eine Ausnahme bildeten Streckungen mit 50 % EB-Mehl, mit denen erst nach 30 Tagen die Höchstfestigkeit erreicht worden ist). Ungestreckte und mit organischem Mehlen gestreckte Harnstoffharzleime zeigten nach diesen Zeitpunkten in dicker Leimfuge (Anmerkung: rd. 0,5 – 1,1 mm) sodann überwiegend einen mehr oder weniger großen Festigkeitsabfall“.
2. „Bei einer dünnen Leimfuge von rd. 0,1 mm erfolgte bei dem ungestreckten Kaurit Leim W während einer Alterungsdauer von einem Jahr ein Festigkeitsabfall von rd. 20 % während bei einem EB-Mehlzusatz von 20 % eine Festigkeitssteigerung von 7 % und nach einem Jahr mit einer Zugscherfestigkeit von 9,6 N/mm² die höchste Verklebungsfestigkeit aller Klebstoff- und Fugendickenkonfigurationen erhalten wurde“. (Anmerkung: dies schließt auch die mituntersuchten UF- und PRF-Referenz-Klebstoffe (Kaurit-Leim WHK und Kauresin 440 fl.) ein).
3. „In Leimfugen von 0,6 bis 0,7 mm Dicke trat ein Festigkeitsabfall des ungestreckten Kaurit-Leims W bereits nach 24 Stunden ein; er setzte sich so lange fort, bis nach rd. 30 Tagen nur noch unbedeutende Festigkeitswerte vorlagen. Streckungen mit 20, 30 und 50 % EB-Mehl bewirkten Leimbindefestigkeiten, die bei Fichtenholz nach einem Jahr noch über 5 N/mm² lagen. Bis zu diesem Zeitpunkt war aber auch bei diesen Streckungsverhältnissen ein mehr oder weniger großer Festigkeitsabfall festzustellen.“
4. Leimfugen von 1,0 bis 1,1 mm Dicke: „Der Festigkeitsabfall der mit 10 % und 20 % EB-Mehl und mit 10 % Kokosmehl gestreckten Kaurit-Leime über längere Zeit trat besonders bei Leimfugen von rd. 1 mm Dicke in Erscheinung. Hat sich ein mit 20 % EB-Mehl gestreckter Leim in 0,6 bis 0,7 mm dicker Fuge 2 Jahre lang relativ gut gehalten, so versagte er in noch dickerer Fuge offensichtlich sehr schnell. Nach einem Jahr wiesen nur noch die mit 30 % und 50 % EB-Mehl gestreckten Kaurit-Leime W sowie Kauresin 440 und Kaurit-Leim WHK Zugscherfestigkeiten von über 4 N/mm²

auf, wobei der erstgenannte Leim aber nur noch rd. 65 % des Höchstwertes nach einem Tag aufwies, während die Bindefestigkeit von Kauresin und Kaurit-Leim WHK annähernd gleich groß geblieben war“.

5. Allgemeine Schlussfolgerungen: „Bei Betrachtung der untersuchten Einflussgrößen auf die Bindefestigkeit eines gestreckten Harnstoffharzleims in Leimfugen mit rund 0,5 bis 1,0 mm Dicke, zum Beispiel Abbindegeschwindigkeit, Trocken- und Nassfestigkeit, Alterungsbeständigkeit und Aufnahme von Schwindspannungen aus dem verleimten Holz, kann festgestellt werden, dass der Zusatz von 30 % Industriemehl, bezogen auf den flüssigen Harnstoffharzleim, die günstigsten Ergebnisse brachte und der in dieser Weise gestreckte Leim die für die Bauholzleimung erforderlichen fugenfüllenden Eigenschaften in ausreichendem Maß besitzt. (Nach neueren Untersuchungen¹¹ hat sich auch für das Streckmehl „Leimträger AHAMA B“ ein Zusatz von 30 %, bezogen auf das Flüssigharz, als günstig erwiesen.) Bezüglich des Alterungsverhaltens ist jedoch der mit Industriemehl EB gestreckte Harnstoffharzleim dem Kauritleim WHK und den Resorcinharzleimen unterlegen; vgl. die Abbildungen 6 und 8 (hier: Bilder 6.2b und 6.3). Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass auch nach einem Jahr noch kein Beharrungszustand der Leimbefestigkeit zu erwarten ist, jedenfalls nicht bei allen Streckungsgraden. Weitere Versuche in dieser Richtung sind daher unumgänglich“.

Anmerkung des Autors des vorliegenden Forschungsberichtes: Die Darstellung der Versuchsergebnisse durch die Autoren Egner und Jagfeld in dem komplex strukturierten Beitrag sind unstrittig korrekt und belegen die Problematik von UF-Harzen und deren Streckung sehr ausführlich. Bezüglich einer kritischen Würdigung der Schlussfolgerungen der Autoren Egner und Jagfeld wird insbesondere auf den nachfolgenden Punkt e) verwiesen.

Wesentliche Erkenntnisse sind:

- a) dass ungestreckte UF-Harze (hier Kaurit-Leim W 234 Pulver) auch bei dünnen Fugen ein ausgeprägtes festigkeitsminderndes Alterungsverhalten aufweisen und daher unabdingbar zu füllen bzw. zu strecken sind (Anmerkung: die Festigkeitsminderung resultiert aus dem ausgeprägten Schwind/Schrumpfverhalten des Klebstoffs, was zu erheblichen Eigenspannungen in der Fuge bzw. zur Fragmentierung der Fuge infolge eigenspannungsbedingter Rissbildungen führt).

¹¹ Egner und Abele (1961)

- b) Die Streckung (das Verfüllen) mit natürlichen organischen Mehlen ermöglicht innerhalb einer bestimmten optimalen Bandbreite des Mehlzusatzes eine Schrumpfstabilisierung der Fuge. Dieser positive Effekt wird jedoch nur bei sehr dünnen Klebfugen nicht durch eine verzögerte Alterung abgebaut.
- c) Bei dickeren Fugen (rd. 0,5 - 1 mm) hängt die Trocken- und Nassfestigkeit der Fugen und deren alterungsbedingte Veränderungen sehr empfindlich von Streckmehlgehalt ab. Lediglich bei einem 50 % Streckmehlzusatz wurde im einjährigen Untersuchungszeitraum keine alterungsbedingte Festigkeitsabnahme festgestellt. Da jedoch der im Hinblick auf das Alterungsverhalten optimale 50 %ige Streckmehlzusatz zu einem absolut gesehen zu niedrigen Festigkeitsniveau – insbesondere bei der Nassbindefestigkeit – führt und für die Verarbeitung infolge deutlich zu langer Aushärtezeiten ungeeignet ist, wurde aus den Untersuchungen mit Blick auf die Aspekte – ausreichend hohes Festigkeitsniveau, ausreichende Nassbindefestigkeit und praxismögliche Verarbeitung – als summarisch geeignetste Streckmehlmenge ein Zusatz von 30 % abgeleitet.
- d) Verklebungen mit dem „empfohlenen“ 30 %igen Streckmehlzusatz wiesen in den Untersuchungen bei dickeren Fugen (rd. 0,5 – 1 mm), für die zufolge der Autoren Egnér und Jagfeld Klebstoffe für Holzbauwerke geeignet sein müssen, ab 1 – 3 Tagen nach Verklebungsherstellung einen **stetigen Festigkeitsabfall** bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes von einem Jahr auf. Im Falle sehr dicker Fugen von rd. 1 mm war der experimentell erhaltene Festigkeitsabfall bezüglich einer logarithmisch geteilten Zeitachse sogar progressiv. Absolut betrugen die Festigkeitsabnahmen innerhalb der einjährigen Untersuchungszeit abhängig von der Fugendicke (rd. 0,65 mm bzw. rd. 1,05 mm) 20 % bzw. 30 %.
- e) Im Rahmen einer eingehenden Analyse der Schlussfolgerungen der Autoren Egnér und Jagfeld ist kritisch anzumerken, dass die vorstehend unter c) und d) zusammengefasste Alterungsthematik in gewisser Weise relativiert wurde. In den vorstehend unter 5. wörtlich wiedergegebenen Schlussfolgerungen wird im letzten Abschnitt ausgeführt: „Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass auch nach einem Jahr noch kein Beharrungszustand der Leimbindefestigkeit zu erwarten ist, jedenfalls nicht bei allen Streckungsgraden“. In der Tat „**deuten**“ die Versuchsergebnisse jedoch nicht nur darauf hin, sondern **belegen eindeutig** und insbesondere auch für den vorgeschlagenen optimalen Streckmehlzusatz von 30 %, dass zumindest bei dem verwendeten

Klebstoff Kaurit-Leim W 234 Pulver ein erhebliches festigkeitsminderndes Alterungsverhalten vorliegt, das nach Maßgabe der erprüften Kurvenverläufe auch bei längeren Alterungszeiten anhalten sollte.

6.3 *Veröffentlichung von Egner, Jagfeld und Kolb (1969) – „Alterungsuntersuchungen an gestreckten Harnstoffharz- leimen für die Herstellung tragender Holzbauteile“*

6.3.1 Allgemeines

In der Veröffentlichung wird über ein Forschungsvorhaben zu Alterungsuntersuchungen an Holzklebefugen berichtet. Im Vordergrund standen die Untersuchungen an gestreckten Harnstoffharzleimen. Zu Referenzzwecken wurden auch ein nicht gestrecktes UF-Harz und zwei Resorcin-Klebstoffe untersucht. Die Untersuchungen standen in unmittelbarem Zusammenhang mit einem früheren Forschungsvorhaben der Autoren (Egner und Jagfeld, 1962), in dem die Eignung unterschiedlicher Streckmehle und insbesondere der optimale mengenmäßige Zusatz des Streckmehls EB untersucht wurden (vgl. hierzu Abschnitt 6.2). Da in der genannten Untersuchung aus dem Jahr 1962 das Alterungsverhalten der unterschiedlich gestreckten Klebefugen nur über einen Zeitraum von maximal einem Jahr – mit teilweise sehr unzureichenden Versuchsergebnissen untersucht wurde – stellten die hier berichteten Untersuchungen eine notwendige Ergänzung/Fortführung der Versuche des Jahres 1962 dar, um das Alterungsverhalten über einen deutlich längeren Zeitraum beurteilen zu können.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit betraf die Klärung der Fragestellung, ob das Alter des Streckmehls (Alter von wenigen Monaten bis zu mehreren Jahren) gegebenenfalls nachteilige Auswirkungen auf die Verklebungsfestigkeit hat. Weiterhin wurden in der Untersuchung auch die Aspekte des zeitlichen Viskositätsverlaufs der gestreckten Leimflotten nach Härterzugabe sowie die zeitlichen pH-Wert-Änderungen der Leimflotten nach Härter- bzw. Streckmehlzugabe untersucht. Über die beiden letzten vorstehend genannten Punkte wird in der vorliegenden Zusammenfassung und Bewertung der Untersuchungen nicht berichtet.

6.3.2 Untersuchte Klebstoffe, Streckmittel, Prüfkörper und Fugendicken

Im Focus der Untersuchungen stand das Alterungsverhalten von Verklebungen mit dem Kaurit-Leim 234 Pulver¹², gestreckt mit unterschiedlichen Streckmehlen verschiedenen Alters. Zum Vergleich wurde auch das Alterungsverhalten des nicht mit natürlichem organischen Streckmehl sondern mit ausgehärteten Phenol-Kunststoffpartikeln (gemahlene Bakelitmasse) gefüllten UF-Klebstoffs Kaurit-Leim WHK (= Kaurit-Leim 220 Pulver) sowie von zwei unterschiedlichen Resorcinharz-Klebstoffen (Karesin 440 fl. und Karesin 450 fl.)¹³ untersucht. Tabelle 6.4 beinhaltet eine Zusammenstellung der untersuchten Klebstoffkonfigurationen einschließlich der Harz-Härter-Mischungsverhältnisse sowie der typ-, alterungs- und mengenmäßigen Streckmehlzugaben.

Die Untersuchungen wurden ausschließlich mit Längszugscherprüfkörpern analog zu EN 302-1 mit einer Fugendicke von 0,5 mm durchgeführt. Die überwiegende Anzahl der Versuche erfolgte mit normgemäßen Buchenholzprüfkörpern. Zur Anbindung an die erwähnten Versuche von Egner und Jagfeld des Jahres 1962, die primär mit Fichtenholz durchgeführt worden sind, wurden in geringerem Umfang, d. h. ausschließlich mit der Klebstoff/Streckmehlkonfiguration E3, auch Versuche mit Fichtenholz vorgenommen.

¹² nachfolgend meist mit Plv. abgekürzt

¹³ In der Veröffentlichung von Egner et. al (1969) werden die Karesin-Klebstoffe 440 flüssig und 450 flüssig durchweg als Resorcinharz-Klebstoffe bezeichnet. Es handelt sich hierbei jedoch um Phenol-Resorcin-Harnstoffharz-Klebstoffe (vgl. z. B. Technisches Datenblatt, BASF (1982)); die Klebstoffe werden hier daher im Weiteren als PRF-Klebstoffe bezeichnet.

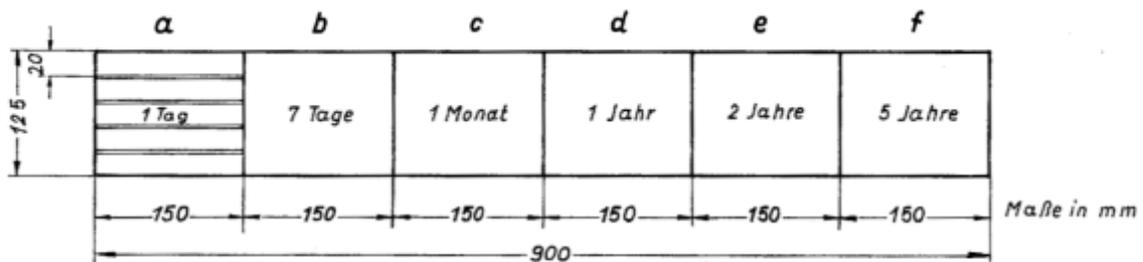
Klebstoff- typ	Klebstoff- fabrikat	Leimflotte	Härter	Streckmehl			laufende Klebstoff- bezeich- nung
				Art	Menge	Mehlalter	
UF	Kaurit-Leim 234 Plv.	100 Gew.-% Pulver + 50 Gew.-% Wasser	Härter 70 10 Gew.-% bzgl. Leim- flotte	Industriemehl EB	50 Gew.-% bzgl. Leimpulver	4J + 3M	E1
						3J + 3M	E2
						1M	E3
				Ahama- Leimträger B	50 Gew.-% bzgl. Leimpulver	2J + 4 M	A1
						7M	A3
	Bonit JB entspr. Bonit 125	50 Gew.-% bzgl. Leimpulver	3M	B3			
Kaurit-Leim 220 Pulver (WHK)	100 Gew.-% Pulver + 38 Gew.-% Wasser	Härter 70 10 Gew.-% bzgl. Leim- flotte	1) -	-	-	W1	
PRF	Kauresin 440 fl.	100 Gew.-% Kauresin 440 fl.	444 Plv. 20 Gew.-% bzw. Leim- flotte	-	-	-	K0
PRF	Kauresin 450 fl.	100 Gew.-% Kauresin 450 fl.	455 Plv. 20 Gew.-% bzw. Leim- flotte	-	-	-	R0

¹⁾ kein Zusatz von organischem Streckmehl; zur Fugenfüllung ist dem Harzpulver gemahlenes ausgehärtetes Kunstharzpulver (Bakelite) beigemischt

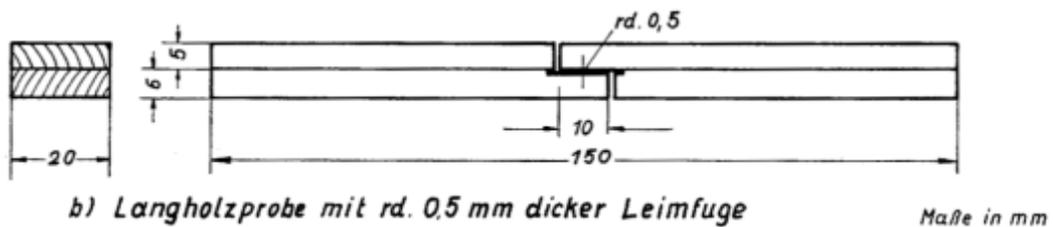
Tabelle 6.4 Zusammenstellung der in den Alterungsversuchen von Egner et al. (1969) geprüften UF-Harz-Konfigurationen mit unterschiedlichen Streckmehltypen und –altern sowie mit drei nicht mit Mehl gestreckten Referenzklebstoffen

Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens wurden wie in Bild 6.5 gezeigt, 900 mm lange und 125 mm breite Plattenstreifen verklebt, die in Plattenlängsrichtung in jeweils sechs Abschnitte a – f mit einer Länge von 150 mm, entsprechend der Länge der Längszugscherprüfkörper, unterteilt wurden. Jeder Plattenabschnitt wies in Breitenrichtung 5 Prüfkörper auf. Die Proben der Plattenabschnitte a – f wurden sodann nach Lagerungsdauern (ohne Last) von einem Tag, 7 Tagen, einem Monat sowie 1, 2 und 5 Jahren zur Bestimmung des Alterungseinflusses auf Zug geprüft. Die Lagerung der Proben erfolgte durchweg im Normalklima 20°C/65% rel. LF.

Je Verklebungskonfiguration wurden zwei Plattenstreifen mit gleicher Unterteilung in die Abschnitte a - f hergestellt, so dass je Konfiguration und Alterungszeit 10 Proben vorlagen. Bezüglich des Auftrennens der Platten bzw. Plattenabschnitte in die einzelnen Prüfkörper wurden des Weiteren zwei Varianten untersucht. Ein Teil der Platten (Menge nicht spezifiziert) wurde 2 bis 4 Tage nach der Verklebung in die einzelnen Prüfkörper aufgetrennt, während bei dem anderen Teil der Platten die Prüfkörper erst wenige Stunden vor der Prüfung zugeschnitten wurden.



a) Verleimte Holzplatten mit Einteilung in Abschnitte a bis f entsprechend den angegebenen Zeiten zwischen Verleimung und Prüfung



b) Längszugprobe mit rd. 0,5 mm dicker Leimfuge

Bild 6.5 Schema der Prüfkörperzuordnung bei den Alterungsversuchen (aus Egner et. al. (1969)); die Prüfkörpergeometrie und die Abmessungen der Längszugscherprüfkörper entsprachen DIN 53254 bzw. EN 302-1

6.3.3 Versuchsergebnisse

Die Bilder 6.6a und 6.6b zeigen für alle untersuchten Konfigurationen den Zusammenhang zwischen der Längszugscherfestigkeit und der Alterungszeit. Im Einzelnen beinhalten die Bilder 6.6a und 6.6b den Festigkeits-Alterungs-Zusammenhang der Buchenholzprüfkörper, wobei in der Darstellung 6.6a die Ergebnisse derjenigen Proben gezeigt sind, die unmittelbar (rd. 3 Tage) nach der Verklebung aus den Platten geschnitten wurden und Bild 6.6b zeigt die Versuchsergebnisse der unmittelbar vor der Prüfung zugeschnittenen Proben. Bild 6.7 beinhaltet ausschließlich für die Klebstoff-Streckmehlkonfiguration E3 einen Vergleich der Festigkeits-Alterungsverläufe der Buchenholz- und der Fichtenholzproben.

Die Untersuchungen ergaben (erwartungsgemäß) keinen signifikanten Einfluss des Proben-zuschnitt-Zeitpunkts auf den Alterungs-Festigkeitszusammenhang. Dieser Aspekt der Unter-suchungen wird daher im Weiteren nicht eingehender diskutiert.

6.3.3.1 *Zusammenhang zwischen Alterungszeit und Längszugscherfestigkeit*

6.3.3.1.1 Buchenholzverklebungen

Die Bilder 6.6a und 6.6b zeigen für die mit EB-Mehl unterschiedlichen Alters gestreckten UF-Leime (E1 – E3) ein Festigkeitsmaximum nach rd. vierwöchiger Alterung und hieran an-schließend einen von Egner et al. als geringfügig bezeichneten Festigkeitsabfall (siehe hier-zu nachfolgend). Im Gegensatz dazu wurde bei den Klebstoffkonfigurationen A1, A3 und B3 das Festigkeitsmaximum bei unterschiedlichen Alterungszeitpunkten erhalten.

Einheitlich lag jedoch bei allen UF-Klebstoff-Streckmehlkonfigurationen die Längszugscher-festigkeit nach fünfjähriger Alterung über 9 N/mm^2 . (Anmerkung: Dieser Festigkeitswert wur-de in der damals im Entwurf vorliegenden DIN 68141 und gleichermaßen heute für die 0,5 mm dicke Fuge in EN 15425¹⁴ als Festigkeitsanforderungswert nach 7 Tagen Aushärtezeit spezifiziert). Der zu Vergleichszwecken mit untersuchte UF-Klebstoff W1 (Kaurit-Leim WHK) zeigte im Verlauf der Alterungszeit anschließend an ein Festigkeitsminimum nach 4wöchiger Lagerung einen Festigkeitsanstieg bis zum Alterungszeitpunkt 2 Jahre und sodann nur eine unwesentliche Abnahme bis zum Alterungszeitpunkt 5 Jahre.

¹⁴ EN 15425 spezifiziert die Prüfungen und Leistungsanforderungen an 1K-PU-Klebstoffe und hierbei u.a. Anforderungen an Versuchsergebnisse mit Längszugscherprüfkörpern mit 0,5 mm Fugendi-cke. Die für Pheno- und Aminoplaste, d.h. für UF-Harz-Klebstoffe gültige Norm EN 301 enthält kei-ne Erfordernis für Prüfungen von Fugendicken von 0,5 mm und daher auch keine diesbezüglichen Anforderungen.

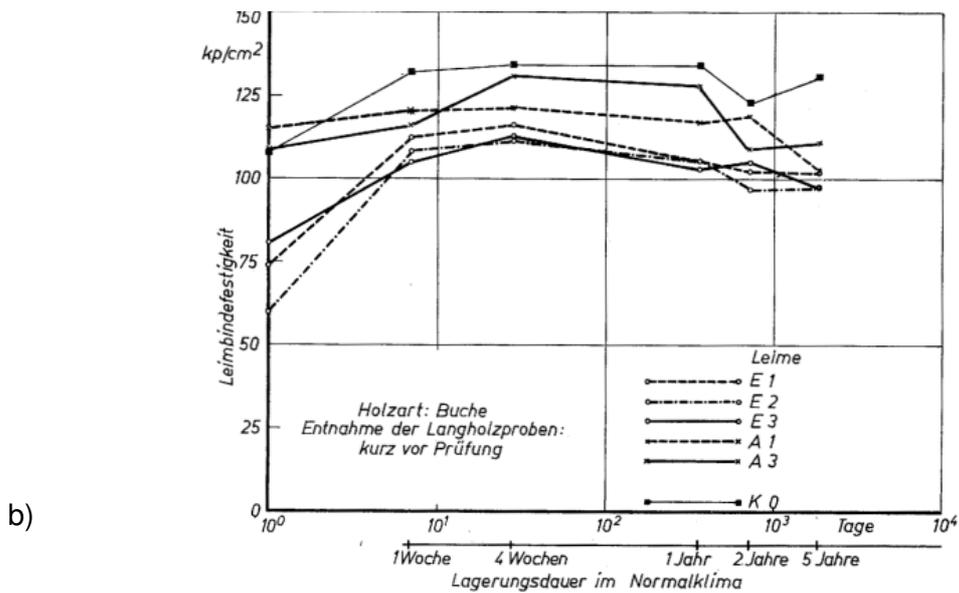
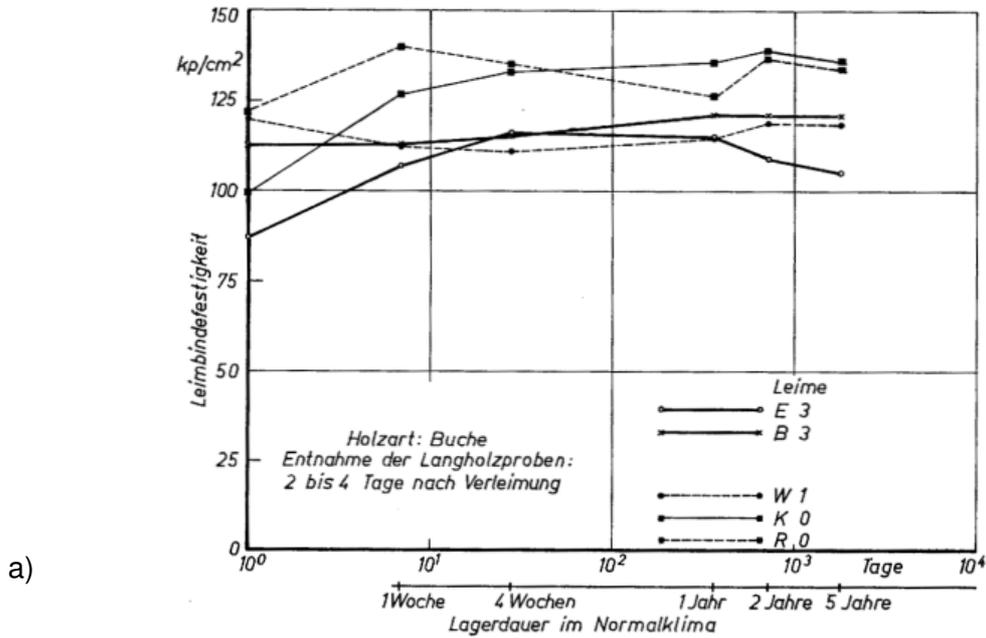


Bild 6.6a,b

Zusammenhang zwischen Alterungszeit und Längszugscherfestigkeit von Buchenholz-Prüfkörpern nach DIN 53254 bzw. EN 302-1 verklebt mit unterschiedlich gestreckten UF-Harzen und mit PRF-Klebstoffen (aus Egner et al., 1969)

- a) Prüfkörperzuschnitt 2 – 4 Tage nach Verklebung
- b) Prüfkörperzuschnitt unmittelbar vor Prüfung

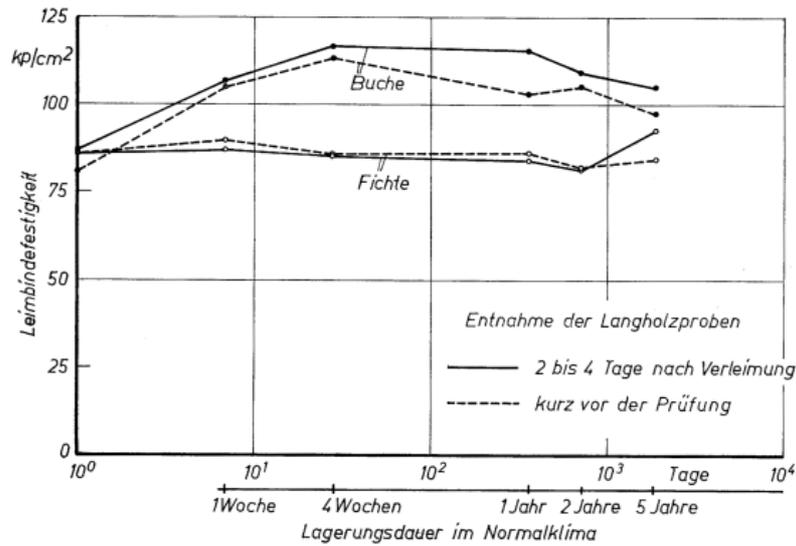


Bild 6.7 Zusammenhang zwischen Alterungszeit und Längszugscherfestigkeit von Buchen- und Fichtenholzprüfkörpern nach/in Anlehnung an EN 302-1 verklebt mit der gestreckten UF-Harzkonfiguration E3 (aus Egner et. al., 1969)

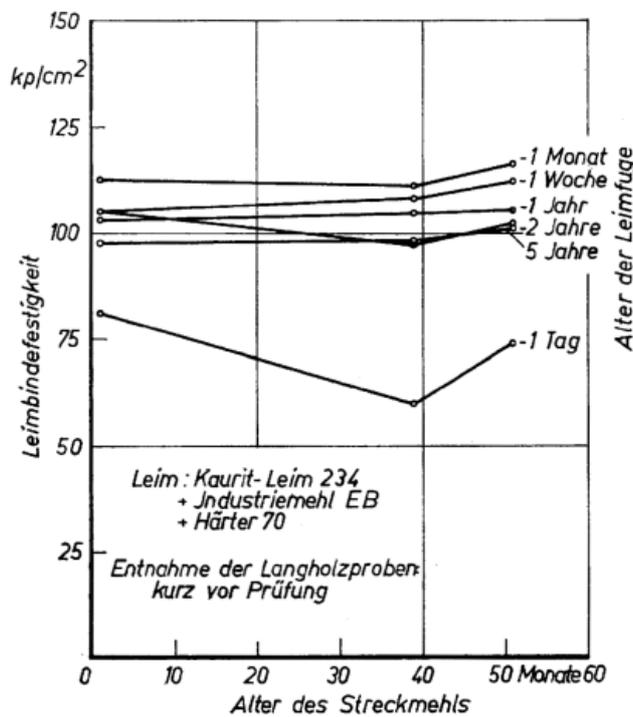


Bild 6.8 Zusammenhang zwischen Längszugscherfestigkeit und Alter des Streckmehls „Industriemehl EB“ bei UF-Verklebungen mit dem Klebstoff Kaurit-Leim 234 und Härter 70 in parametrischer Abhängigkeit vom Klebfugenalter (aus Egner et. al., 1969)

Die PRF-Referenzklebstoffe K0 und R0 zeigten durchweg die höchsten Festigkeitswerte; bei summarischer Bewertung der Graphen in den Bildern 6.6a und 6.6b ist keine alterungsbedingte Festigkeitsabnahme der PRF-Klebstoffe zu konstatieren.

6.3.3.1.2 Fichtenholzverklebungen

Die in Bild 6.7 dargestellten Festigkeits-Alterungszusammenhänge der Fichtenholzverklebungen (Konfiguration E3) zeigten keinen Einfluss der Alterung auf die Festigkeit.

6.3.3.1.3 Einfluss des Streckmehllalters

Bild 6.6b veranschaulicht, dass das Alter des Streckmehls weder bei dem Industriemehl EB (Klebstoffe E1, E2 und E3) noch bei dem Mehltyp „Ahama-Leimträger B“ (Klebstoffe A1 und A3) einen signifikanten Einfluss auf die zeitabhängigen Zugscherfestigkeiten hatte. Dieser Sachverhalt wird für den Fall des Industriemehls EB in Bild 6.8 in Form des Zusammenhangs von Zugscherfestigkeit und Alter des Streckmehls für unterschiedliche Klebfugenalterungszeiten noch deutlicher veranschaulicht.

6.3.4 Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse

Die Autoren Egner, Jagfeld und Kolb fassen die Versuchsergebnisse wie folgt zusammen:

1. Das Alter des Streckmehls hat keinen erkennbaren Einfluss auf die Längszugscherfestigkeit bei dickeren Leimfugen von rd. 0,5 mm, sofern die Mehle kühl und trocken gelagert werden.
2. Das Alter des Streckmehls hat keinen erkennbaren Einfluss auf Viskosität und pH-Wert der Leimmischung.
3. Ein Streckmehlzusatz von 50 % bezogen auf das UF-Harzpulver ergab keine nennenswerten Festigkeitseinbußen nach 5jähriger Alterung.

Anmerkungen des Autors dieses Forschungsberichtes: Die Schlussfolgerungen von Egner et. al. geben die Versuchsergebnisse überwiegend korrekt wieder. Dies betrifft insbesondere den Einfluss des Alters des Streckmehls auf das zeitabhängige Festigkeitsverhalten der Klebefugen. Betrachtet man jedoch die Zielsetzung der Untersuchungen, nämlich ungeklärte Fragen einer früheren Arbeit der Autoren Egner und Jagfeld aus dem Jahr 1962 zur Alterungsbeständigkeit von Klebfugen gestreckter UF-Leime mit Zeiträumen über einem Jahr zu klären, so sind zumindest zur Konzeption der Versuche und zu deren Interpretation die folgenden Fragen angezeigt:

1. Warum wurden die in den neueren Untersuchungen erhaltenen Alterungsergebnisse nicht vergleichend mit den Versuchsergebnissen aus dem Jahr 1962, die seinerzeit teilweise deutlich abweichende Tendenzen zeigten, diskutiert?
2. Warum wurden die mit dem EB-Streckmehl bei den Buchenholzverklebungen erhaltenen eindeutigen Festigkeitsabnahmen nach 5 Jahren nicht mit Blick auf deutlich längere Alterungs-/Lebensdauern diskutiert?
3. Am gravierendsten stellt sich jedoch die Frage, warum das Alterungsverhalten unter idealen Konstantklimabedingungen untersucht wurde bzw. warum die Übertragbarkeit der Konstantklima-Alterungsversuche auf Wechselklimabedingungen in keiner Form angesprochen wurde. Diese Frage erhebt sich insbesondere deshalb, weil die hier berichteten Versuche in der Folge durchweg als Beleg für ein vernachlässigbares Alterungsverhalten und für ein unproblematisches Zeitstandverhalten herangezogen wurden.
- 4.

6.4 *Veröffentlichung von Kolb und Frech (1977) – „Langfristiges Verhalten von Brettschichtholz verleimt mit Harnstoffharzleim“*

6.4.1 Allgemeines

Die Motivation der Untersuchungen von Kolb und Frech (1977 (Prüfungsbericht); 1978 (Publikation)) resultierte aus verschiedenen, oft unerklärlich erscheinenden Schadensfällen mit UF-verklebten BSH-Trägern unterschiedlichen Alters. Des Weiteren legte es „das Wissen um eine gewisse Empfindlichkeit solcher Verklebungen gegenüber Witterungs- bzw. Feuchtigkeitseinflüssen¹⁵“ nahe, die Verklebungsqualität von UF-verklebten BSH-Trägern unterschiedlichen Alters und „verschiedener“ Art zu überprüfen. Es sollte hierbei untersucht werden, ob und gegebenenfalls inwieweit die Faktoren Zeit (Alter), Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse im Zusammenhang mit der einwirkenden Belastung die Festigkeit der Leimverbindungen beeinflussen.

¹⁵ Aus Kolb und Frech (1978)

Da die genannten Problemstellungen bis zum Zeitpunkt der (seinerzeitigen) Untersuchungs-Initiierung in erster Linie in Laborversuchen behandelt worden waren, lag es nahe, das Verhalten der UF-Klebstofffamilie praxisnah an Bauwerken zu untersuchen. Für die Untersuchungen wurden insgesamt neun Bauwerke A - I mit Bauwerksaltern von 8 - 21 Jahren ausgewählt. Die Klimabeanspruchungen der untersuchten Bauwerke umfassten die folgenden Bedingungen: *Anmerkung:* In Anlehnung an die heutige Terminologie der DIN 1052:2008 bzw. des Eurocodes 5 werden den jeweiligen Klimabeanspruchungen Nutzungsklassen (NK) zugeordnet:

- geschlossen und beheizt: NK 1
- geschossen und ab und zu beheizt NK 1
- geschlossen und unbeheizt NK 1/2
- offen und unbeheizt NK 2
- allseitig offen und unbeheizt NK 2

Zum Erhalt von Referenzwerten wurden auch zwei mit unterschiedlichen UF-Klebstoffen neu verklebte BSH-Bauteile in die Untersuchungen mit einbezogen.

Die Untersuchungsmethodik umfasste die Entnahme von rd. 5 - 20 Bohrkernen aus unterschiedlichen Trägern jedes Bauwerks, die sodann nach speziellen Klima/Wasservorbehandlungen Scherfestigkeitsprüfungen unterzogen wurden.

6.4.2 Prüfkörper, untersuchte Klima/Wasser-Vorbehandlungen

Die Bohrkernkerne, die durchweg eine Länge von rd. 80 mm und einem Durchmesser von rd. 30 mm aufwiesen, wurden von der ursprünglichen Trägeraußenseite her in drei gleich lange Bohrkernabschnitte a (außen), b (mittig) und c (innen) aufgetrennt. Die zu prüfende Klebfläche jedes Bohrkernabschnitts betrug nominell 600 mm². Die Bohrkernkerne respektive die hieraus jeweils hergestellten drei Bohrkernabschnitte wurden nach Bearbeitung zu teilprismierten Prüfkörpern gemäß DIN EN 392 nach unterschiedlichen klimatischen Vorbehandlungen im Scherversuch geprüft. (Anmerkung: Die Norm DIN EN 392 lag zum Zeitpunkt der Untersuchungen von Kolb und Frech noch nicht vor, es waren jedoch vergleichbare Prüfvorschriften aus den USA bekannt; bzgl. der seinerzeitigen Auswertung der Scherfestigkeit ohne Berücksichtigung eines Größeneinflussfaktors k_t für die Scherlänge vgl. Fußnote 25 in Abschnitt 18.1)

Die untersuchten Klima/Wasser-Vorbehandlungen I, II und III (nachfolgend Lagerungsarten genannt) waren wie folgt charakterisiert:

- *Lagerungsart I*
 - Normalklima 20°C/65 % rel. LF nach DIN 50014
 - Es wurden wechselweise die Proben a oder c verwendet.
 - Der mittlere Holzfeuchtegehalt bei der Prüfung betrug 12,8 %.

- *Lagerungsart II*
 - Wasserlagerung (Nassprüfung), gekennzeichnet durch:
 - 5 Tage Lagerung in Wasser bei 20°C. Es wurden wechselweise die Proben a oder c verwendet.
 - Der mittlere Holzfeuchtegehalt bei der Prüfung betrug 97,4 %.

- *Lagerungsart III*
 - Nass-Trocken-Wechselagerung (Trockenprüfung), gekennzeichnet durch:
 - Verwendung der Proben b
 - 4 Zyklen mit einer Dauer von jeweils 8 Tagen Behandlung während eines Zyklus mit:
 - a) 4 Tage Lagerung in Wasser bei 20°C
 - b) 4 Tage Trocknung bei 50°C
 - Nach Abschluss der 4 x 8 = 32tägigen Zyklusbehandlung sodann 5 Wochen Lagerung im Normalklima 20°C/65% rel. LF.
 - Der mittlere Holzfeuchtegehalt bei der Prüfung betrug 11,4 %.

6.4.3 Versuchsergebnisse

Die Tabelle 6.5 enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Versuchsergebnisse. Angegeben sind die Mittelwerte und Variationskoeffizienten der Scherfestigkeiten der Referenzproben und der zusammengefassten Bauwerke A - I jeweils für die Lagerungsarten I - III. Des Weiteren sind die mittleren Scherfestigkeitsverhältnisse $f_{v,A-I} / f_{v,ref}$ für die jeweiligen Lagerungsarten angegeben. Ebenfalls aufgeführt sind – für die Referenzproben und die Proben der Bauwerke A - I – die mittleren Abminderungen der Festigkeiten nach Behandlung mit den Lagerungsarten II und III bezogen auf die Normalklimalagerung I.

Wie ersichtlich, wurden im Mittel für die Proben aus den Bauwerken A – I bei allen Lagerungsarten unwesentlich geänderte Scherfestigkeiten gegenüber den Referenzproben erhalten. Auch die Streuungsmaße waren im Wesentlichen gleich. In diesem Sinne betrug sowohl für die Referenzproben wie für die Proben der Bauwerke A – I die Verhältnisswerte der

nass geprüften Proben (Lagerungsart II) bzw. der wieder trocken geprüften Proben gleich-
 ermaßen rd. 65 % bzw. 90 % der trocken gelagerten Proben.

Lagerungsart	Referenzproben		Proben der Bauwerke A - I		Verhältniswerte	
	\bar{X}_{ref}	V_{ref}	\bar{X}_{A-I}	V_{A-I}	$\frac{\bar{X}_{A-I}}{\bar{X}_{ref}}$	$\frac{V_{A-I}}{V_{ref}}$
-	N/mm ²	%	N/mm ²	%	%	%
I	7,93	15,4	7,99	15,5	100,8	100,6
II	5,19	10,8	5,13	11,3	99,6	104,6
III	7,21	15,1	6,98	17,5	97,2	115,9
Verhältniswert (%) II/I	65,4	-	64,7	-	-	-
Verhältniswert (%) III/I	90,9	-	87,7	-	-	-

Tabelle 6.5 Zusammenstellung der in den Untersuchungen von Kolb und Frech (1977) an den Bohrkernen der Bauwerke A – I sowie an den Referenzproben erhaltenen Druckscherfestigkeiten (Mittelwerte und Variationskoeffizienten) nach drei unterschiedlichen Klima/Wasserlagerungsarten (aus Kolb und Frech, Tabellen 2 und 3)

6.4.4 Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse

Kolb und Frech schlussfolgerten basierend auf den erhaltenen Ergebnissen, dass bei Brett-schichtholzträgern, die ordnungsgemäß mit Harnstoffharzleim verleimt sind / worden sind, nicht mit einer festigkeitsmindernden Alterung zu rechnen ist, sofern die Klebstoffe die Prü-fungen nach DIN 68141 bestanden haben.

Anmerkung des Autors dieses Forschungsberichtes: Die Schlussfolgerungen von Kolb und Frech beziehen sich auf Untersuchungen von Klebfugen, die bei Einsatz in den Nutzungsklassen I und II und Alterungsbedingungen unter Last Bauwerksalter von 8 – 21 Jahren aufwiesen. Aussagen über wesentlich längere Klebfugen/Bauwerksalter von rd. 40 – 80 Jahren, die vielfach für heutige Bestandsbauten unterstellt werden müssen, können hie-raus nicht zwingend abgeleitet werden. Des Weiteren ist naheliegend zu hinterfragen, ob aus den Untersuchungen an einigen wenigen BSH-Bauwerken, die mit speziellen, nicht näher spezifizierten UF-Klebstoffen verklebt wurden, auf das Alterungs- und Zeitstandverhalten von Harnstoffharzleim im Generellen geschlossen werden kann.

6.5 Veröffentlichung von Clad (1978) – „Harnstoff verleimte Träger nach 35 Jahren“

6.5.1 Allgemeines

Das spezielle Ziel der Studie bestand in einer experimentellen Verifizierung der Fragestellung, ob besonders „korrosive“ Industrielatmosphären bei Harnstoffharzverleimungen möglicherweise zu Problemen führen. Hierzu wurde einerseits ein Träger in Bauteilabmessungen der 35 Jahre bei der Fa. BASF einem „korrosiven“ Industrieklima ausgesetzt war sowie andererseits hieraus hergestellte Kleinproben geprüft.

In der Arbeit werden des Weiteren insgesamt 16 Dachkonstruktionen (durchweg Bauwerke der BASF AG) aus UF-verklebtem Brettschichtholz und Balkenschichtholz aufgeführt, die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung im Jahr 1978 Bauwerksalter zwischen 20 – 41 Jahren aufwiesen und die zufolge Clad noch „allen Beanspruchungen“ standhielten (Anmerkung: Weitergehende Angaben zum baulichen Zustand der Tragwerke und insbesondere zu den Klebefugen werden in der Arbeit nicht gemacht). Ergänzend zu den aufgeführten BASF-Bauwerken werden Literaturstellen zitiert (Chug, 1962; Steinger, 1967), welche die in der Schweiz gewonnenen positiven Praxiserfahrungen über die Alterungsbeständigkeit von Harnstoffharzleimen hervorheben. So berichtet z. B. Steinger über Untersuchungen zur Alterungsbeständigkeit von UF-verklebten Holz-Brückenträgern, bei denen auch nach 20 Jahren Einsatz unter teilweise äußerst ungünstigen Witterungs- und Umgebungseinflüssen die Gebrauchstauglichkeit ohne nennenswerte Schäden gegeben war.

Die Veröffentlichung von Clad beinhaltet des Weiteren wiederholte und umfassende Hinweise auf die von ihm wesentlich erachteten Voraussetzungen und Randbedingungen für schadensfreie UF-Verklebungen (insbesondere die Holzfeuchte bei der Verklebung sowie die Klimabedingungen bei der Verwendung). Auf die Möglichkeit/Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Schäden bei Nichterfüllung der Voraussetzungen/Randbedingungen wird in diesem Zusammenhang eingehendst hingewiesen. Nachstehend werden wesentliche Aussagen aus Clad (1978) auszugsweise wiedergegeben¹⁶:

¹⁶ nachfolgende fette Schriftzüge sind Hervorhebungen seitens des Verfassers dieses Forschungsberichtes.

1. *„Als wichtigste Vorbedingung für eine einwandfreie Verleimung wird die richtige Wahl desjenigen Feuchtigkeitsgehalts des zu verleimenden Holzes bezeichnet, welcher der am Ort des Einbaues herrschenden Ausgleichsfeuchtigkeit entsprechen soll“.*
2. *„Die Auswahl der Leime richtet sich nach den Klimabedingungen, denen die Verbindungen später ausgesetzt sind“.*
3. *„Für Bauteile, die kurzzeitig, jedoch nicht öfter wiederkehrend der Nässe oder Feuchtigkeit ausgesetzt sein können, dürfen Kunstharzleime auf Basis von Harnstoff-Formaldehyd oder Resorcin-Formaldehyd verwendet werden“.*
4. *„Für Bauteile, die der Nässe, sehr feuchtwarmen oder tropenähnlichen Klimabedingungen ausgesetzt sein können, dürfen **nur** Kunstharzleime auf Basis Resorcin-Formaldehyd verwendet werden“.*
5. *„Es sind Leime zu verwenden, die in dicken Fugen beständig sind (z. B. **gefüllte** Harnstoffharzleime, Leime auf Resorcin-Basis), jedoch jeweils nur für den zugelassenen Klimabereich.“*
6. *„Brettschichtholzbauteile, die ganz oder teilweise ungeschützt im Freien stehen und somit unmittelbar der Witterung ausgesetzt sind, sind natürlich im Hinblick auf das Aufreißen von Leimfugen am meisten gefährdet. **Gleiches gilt für Träger im Räumen mit extremen Klima-Wechselbeanspruchungen.** Hier empfiehlt es sich, für die Verleimung **nur** Phenol-Resorcin-Formaldehydkondensat einzusetzen.*
7. *„Je nach dem Feuchtigkeitsgehalt des Holzes können erhöhte Temperaturen eine Harnstoffharzverleimung mit der Zeit zerstören“.*
8. *„Unter **normalen** Verhältnissen ist in Deutschland mit gefüllten Harnstoffharzleimen eine voll befriedigende Beständigkeit bei Bauholzverleimungen zu erwarten, soweit derartige Konstruktionen vor Feuchtigkeit und Nässe geschützt sind“.*

6.5.2 Versuchsmaterial, Klebstoff, Prüfkörper und –prüfverfahren, Klima- und Wasservorbehandlungen

Das Versuchsmaterial bestand aus einem geraden „Balkenschichtholz“-Träger der im Jahr 1939 in einer Holzdachkonstruktion über einer Produktionsanlage der I. G. Farben verbaut und 1974, d. h. nach 35jährigem Einsatz zur Untersuchung der Leimverbindungen und der Trägertragfähigkeit ausgebaut wurde. Der Querschnitt des 10,35 m langen Trägers wies Abmessungen (Breite x Höhe) von 16 cm x 42,5 cm auf und bestand aus fünf miteinander verklebten Nadelholzbohlen mit jeweils 8,5 cm Dicke. Die Verklebung der Bohlen, die keine Keilzinkenstöße jedoch Stumpfstöße im Biegedruckbereich aufwiesen, erfolgte mittels des fugenfüllenden UF-Klebstoffs Kaurit-Leim 220 Plv.¹⁷

Die Dachkonstruktion war nach Clad im Jahr 1974 ungeachtet von Beschädigungen durch Kriegseinflüsse noch als voll funktionsfähig anzusehen. Ein Trägerende war über dem Auflager in eine Außenwand einbetoniert, wodurch dieser Teil infolge des völligen Luftabschlusses durch Fäulnis weitgehend zerstört war. Im Bereich der freien Spannweite waren nach Angaben von Clad keine Schäden festzustellen. (Anmerkung: An anderer Stelle wird jedoch ausgeführt, dass der Träger, der bei Anlieferung an die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe, eine Holzfeuchte von 18,5 % hatte, in der obersten (= biegedruckseitigen) Leimfuge Klebfugenrisse von 25 cm Länge und 5 cm Tiefe aufwies).

An dem Träger respektive an hieraus entnommenen Proben wurden die folgenden Versuche durchgeführt:

1. Biegefestigkeitsversuch am gesamten Träger, Stützweite 9 m.
2. Blockscherprüfungen nach ASTM¹⁸ an jeweils 9 Proben aus jeder der vier Klebefugen. Jeweils drei Proben jeder Klebefuge wurde trocken geprüft, drei Proben wur-

¹⁷ Im Jahr 1939 war als fugenfüllender UF-Leim ausschließlich das Fabrikat Kaurit Leim WHK (Pulver) verfügbar, das in späteren Jahren (1960 - 1970) zunächst als Kaurit-Leim WHK 220 Pulver und so dann als Kaurit-Leim 220 Pulver bezeichnet wurde. In der Veröffentlichung werden keine Angaben zum verwendeten Härter gemacht; sehr wahrscheinlich wurde Kalthärter Lila = Härter 70 verwendet.

¹⁸ Die verwendete Prüfnorm ist in der Veröffentlichung nicht spezifiziert; die Prüfungen wurden jedoch wahrscheinlich gemäß ASTM D 905-49 durchgeführt.

den nach 48stündiger Kaltwasserlagerung (20°C) nass geprüft und drei Proben wurden vor der Prüfung nach vorheriger 48stündiger Kaltwasserlagerung im Klima 20°C/65 % rel. LF in den trockenen Zustand (Holzfeuchte rd. 12 %) rückklimatisiert.

3. Querkzugfestigkeitsprüfungen an trockenen Proben. Die Prüfkörper sind nicht spezifiziert, entsprachen jedoch wahrscheinlich Kompaktproben nach DIN 68141.
4. Mikroskopische Untersuchung an den geprüften Leimfugen seitens der Firma BASF AG unter Verwendung von Mikrotom-Schnitten mit Jodanfärbung.

6.5.3 Versuchsergebnisse

Die in der Veröffentlichung benannten Versuchsergebnisse der Festigkeitsprüfungen sind in Tabelle 6.6 komprimiert zusammengestellt. Die bei Clad nicht im Detail bewerteten Festigkeitsergebnisse werden im folgenden Abschnitt im Rahmen der Anmerkungen des Autors dieses Forschungsberichtes eingehend diskutiert. Die mikroskopischen und chemischen Untersuchungen, die seitens der Fa. BASF AG an den Leimfugen durchgeführt wurden, ergaben nach Clad keine Hinweise auf „Zersetzung und Zerstörung“ der Fugenbereiche.

Festigkeitsart	Prüfkörpertyp	Festigkeiten (in N/mm ²) bei unterschiedlichen Holzfeuchtegehalten bei der Prüfung				Festigkeitsverhältnisse	
		trocken		nass	wiedertrocken	$\frac{f_{nass}}{f_{trocken}}$	$\frac{f_{wiedertrocken}}{f_{trocken}}$
		11 % - 12 %	18,5 %	48 h in Wasser bei 20°C	11 % - 12 %		
Biegefestigkeit f_m	Bauteil	-	29,7	-	-	-	-
Scherfestigkeit $f_{v,mean}$	Scherprüfkörper	8,92	-	2,32	6,66	0,26	0,75
Querkzugfestigkeit $f_{t,90,min}$ $f_{t,90,max}$	Querkzugprüfkörper	1,01 1,61	-	-	-	-	-

Tabelle 6.6 Versuchsergebnisse der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe, an einem ausgebauten UF-Harz-verklebten Biegeträger nach 35 Jahren Beanspruchung im Bauwerk sowie an Querkzug- und Scher-Kleinproben aus Klebfugenbereichen des Trägers (Clad, 1978).

6.5.4 Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse

Clad schlussfolgert aus den erhaltenen Versuchsergebnissen, dass der seit 35 Jahren im Einsatz befindliche Balkenschichtholzträger keine Anzeichen einer Alterung und damit für ein Nachlassen der Leimbindefestigkeit erkennen ließ. Der besondere Nutzen der Ergebnisse besteht nach Clad darin, dass die Bewährung UF-verklebter Träger unter Verwendung von Brettlamellen bzw. Bohlen mit deutlich über 3 cm Dicke belegt wurde. (Anmerkung: Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung im Jahr 1978 war die Dicke von BSH-Lamellen im Regelfall auf 30 mm begrenzt; eine Erhöhung auf 40 mm war möglich, wenn Trocknung und Holz Auswahl besonders sorgfältig¹⁹ erfolgten und die Bauteile keine extremen klimatischen Wechselbedingungen ausgesetzt sind.

Clad weist im Weiteren darauf hin, dass die aus dem Schrifttum bekannten guten Erfahrungen mit UF-verklebten tragenden Holzbauteilen in Europa, speziell in Deutschland und der Schweiz, im Widerspruch zu den Erfahrungen in den USA stehen. Als Erklärung dafür werden die speziell in Deutschland entwickelten fugenfüllenden UF-Harze und die diesbezüglich im Flugzeugbau gesammelten Erfahrungen aufgeführt. Als weitere wesentliche Begründungen werden die rigiden Produkt- und Produktionsüberwachungen sowie die „relativ“ engbegrenzten Feuchtigkeitsbereiche der zu verleimenden Hölzer genannt. Die in den USA gemachten negativen Erfahrungen mit UF-Verklebungen führt Clad speziell auch darauf zurück, dass man die Erfahrungen mit PRF-Klebstoffen, die eine Anwendung in wesentlich größeren Holzfeuchtebereichen ermöglichen, unzulässigerweise auf die wesentlich feuchtigkeitsempfindlicheren UF-Klebstoffe übertrug.

Anmerkung des Autors dieses Forschungsberichts: Es werden zunächst die von Clad kaum diskutierten Versuchsergebnisse detaillierter betrachtet:

- Die erhaltenen Werte für die Biegefestigkeit und den Biegeelastizitätsmodul von 29,7 N/mm² bzw. 10200 N/mm² entsprechen weitgehend den Eigenschaften eines Balkenschichtholz- bzw. BSH-Trägers aus Nadelholz der Festigkeitsklasse C 24 (= visuelle Sortierklasse S10 bzw. vormals Güteklasse II). Anmerkung: Eine Bewertung der vermutlichen Güteklasse/Sortierklasse des Holzes ist bei Clad nicht angegeben.

¹⁹bezüglich sorgfältiger Trocknungsbedingungen und der extremen klimatischen Wechselbedingungen sind in der damaligen und heutigen Literatur keine verbindlichen Angaben zu finden.

- Die in Karlsruhe erprüfte mittlere Blockscher-Trockenfestigkeit liegt mit $8,9 \text{ N/mm}^2$ geringfügig (6 %) über der im vorliegenden Forschungsvorhaben erhaltenen mittleren Blockscherfestigkeit von insgesamt 420 Proben aus 11 Gebäuden, deren mittleres Bauwerksalter von 35 Jahren genau demjenigen des Versuchsträgers von Clad entspricht.
- Die Extremalwerte der Trocken-Querzugfestigkeiten liegen in der erwarteten Bandbreite.
- Die mittlere Nassscherfestigkeit und der Verhältniswert von Nass- zu Trockenscherfestigkeit liegen im Gegensatz dazu mit $2,3 \text{ N/mm}^2$ bzw. 0,26 deutlich unterhalb derjenigen Werte, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens mit doppelt so lange im Kaltwasser gelagerten Blockscherproben erhalten wurden. In den eigenen Untersuchungen wurde eine mittlere Nass-Scherfestigkeit von rd. $4,2 \text{ N/mm}^2$ und ein mittleres Nass- zu Trockenscherfestigkeitsverhältnis von rd. 0,51 erhalten.
- Die bei den „Clad“-Proben bestimmte mittlere Wiedertrocken-Scherfestigkeit von $6,7 \text{ N/mm}^2$ und der Verhältniswert von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeit von 0,75 entsprechen weitgehend den in den eigenen Untersuchungen erhaltenen Werten.
- Auf die spezielle Zielsetzung der Studie (vgl. Abschnitt 6.5.1), nämlich die Beantwortung der Fragestellung, ob besonders „korrosive“ Industrieatmosphären bei UF-Verleimungen möglicherweise zu Problemen führen, geht Clad in den Schlussfolgerungen nicht ein.
- Von wesentlicher Bedeutung ist, dass die mitgeteilten Versuchsergebnisse, mit denen die Leistungsfähigkeit von UF-Verklebungen in tragenden Holzbauteilen belegt werden soll, an Verklebungen erhalten wurden, die unter Verwendung des bezüglich Fugendicken- und Feuchtebeständigkeit (speziell bei dicken Fugen) deutlich geeignetsten UF-Klebstoffs, Kaurit Leim WHK = Kaurit Leim 220 Plv., vorgenommen wurden. (Anmerkung: Aufgrund der speziellen Füllung des Klebstoffs mit ausgehärtetem, zermahlenen PRF-Kunststoffpulver) können die Langzeitergebnisse mit diesem Klebstoff keinesfalls pauschal auf andere UF-Klebstoffe, insbesondere nicht auf solche, die mit organischen Mehlen gefüllt sind, übertragen werden).

Im Einzelnen belegen die Versuche einerseits die nachweislich sehr hohe Trockenfestigkeit des im Speziellen verwendeten Klebstoffs auch nach jahrzehntelanger Nutzung in unterschiedlichen und teilweise sehr ungünstigen (= feuchten) Nutzungsbedingungen. In diesem Sinne belegen auch die Scherfestigkeiten der wiedergetrockneten Proben, bei denen eine Residual-Scherfestigkeit von 76 % der Trockenscherfestigkeit erhalten wurde, dass UF-Harze durchaus Feuchteeinwirkungen ertragen können, ohne dass die Wiedererlangung eines hohen Prozentsatzes der Trocken-Ausgangsfestigkeit sehr leidet.

Wesentlich ist andererseits jedoch auch, dass die mittlere Nass-Scherfestigkeit nach lediglich 2tägiger Kaltwassereinwirkung nur noch rd. 25 % der Trockenscherfestigkeit betrug. Die erhaltene Festigkeitsreduzierung war damit um den Faktor 2 größer, als diejenige in sehr umfangreichen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens (vgl. Abschnitte 10 sowie 18 und 19). Ursächlich hierfür könnten die häufig aufgetretenen Feuchtebeanspruchungen der Träger infolge der kriegsbedingten Beschädigungen der Dacheindeckung angesehen werden, wodurch anzunehmend irreversible Degradationen der Nass-Bindfestigkeit induziert wurden. Die hohen Feuchtebeanspruchungen sind mit großer Wahrscheinlichkeit auch ursächlich für die oben genannten, vergleichsweise großen Delaminierungen in der ersten biegedruckseitigen Klebefuge des Versuchsträgers.

6.6 *Veröffentlichung von River, Ebewele und Myers (1994) – „Failure mechanisms in wood joints bonded with urea- formaldehyde adhesives“*

6.6.1 Allgemeines, untersuchte UF-Klebstoffe

Die Untersuchungen von River et al. (1994) zielten auf ein verbessertes Verständnis der Bruchmechanismen von Holzverklebungen sowohl mit unmodifizierten wie mit Amin-modifizierten UF-Harzen ab. Insbesondere sollte ermittelt werden, in welchem Umfang Amin-Modifikationen die Dauerhaftigkeit von UF-verklebten Holzverbindungen erhöhen können.

Den Schwerpunkt der Forschungsarbeit stellen sehr umfassende elektronenmikroskopische Untersuchungen an Bruchflächen unterschiedlich gealterter sowie gealterter und mechanisch beanspruchter Proben dar. Aufbauend auf den Klebfugen-/Bruchbildern werden Modelle zur Schädigungsentwicklung in unterschiedlich modifizierten Klebstofffugen entwickelt. Die me-

chanischen Versuchsergebnisse werden vergleichsweise allgemein und wenig differenziert/detailliert wiedergegeben.

In den Versuchen wurden zwei unmodifizierte UF-Harze (ein kommerziell verfügbares und ein labormäßig hergestelltes Harz), sowie sieben labormäßig mit Amin-Modifikationen hergestellte Harze untersucht (Ebewele et al., 1991a,b). Für Referenzzwecke war in den Untersuchungen auch ein kommerziell produziertes Phenol-Formaldehyd-Harz (PF)-Harz mit einbezogen.

6.6.2 Untersuchte Prüfkörpertypen und Klima/Wasser-Vorbehandlungen

Das Bruchverhalten der Verklebungen wurde mittels zweier unterschiedlicher Prüfkörpertypen bzw. Versuchsarten und unterschiedlichen Klimavorbehandlungen (siehe unten) untersucht. Zum einen wurden bruchmechanische Spaltzug-Untersuchungen mit parabolisch belasteten DCB-Proben zur Bestimmung der MODE I Bruchzähigkeit und der Rissinitiierungsenergie durchgeführt. Zum anderen wurden Fugenscherfestigkeiten mittels druckscherbeanspruchter Blockscherproben bestimmt (bezüglich Details der Probengeometrie, Probenherstellung und der Versuchsdurchführung siehe River und Okkonen (1993), Ebewele et. al. (1993) sowie Okkonen und River (1989)).

Zur Untersuchung der Einflüsse von Alterungsvorgängen auf die Klebfugenfestigkeit wurden bei beiden Prüfkörpertypen - Spaltzug- und Scherprüfkörper - beschleunigte Alterungsbehandlungen in Form von Kaltwasser-Druck-Vakuum-Trocknungs(VPSD)-Zyklen durchgeführt (Ebewele et. al. 1991a). Ausschließlich bei den Druckscherprüfkörpern wurde des Weiteren der Einfluss einer Feucht-Heiß-Alterung bei 70°C und 80% relativer Luftfeuchte mit einer Dauer von bis zu 40 Tagen untersucht. Zur Beurteilung der Alterungseinflüsse wurden bei allen Prüfkörpergruppen auch Referenzprüfungen an unbehandelten nichtgealterten Prüfkörpern durchgeführt.

6.6.3 Mechanische Versuchsergebnisse

Wie vorstehend erwähnt, werden die mechanischen Versuchsergebnisse - Mode I - Energiefreisetzungsraten und Blockscherfestigkeiten - in der Originalveröffentlichung sehr summarisch und häufig undifferenziert wiedergegeben. Die mitgeteilten Ergebnisse wurden hier bestmöglich zusammengefasst und sind in Tabelle 6.7 zusammengestellt.

Prüfkörpervor- behandlung	Klebstofftyp bzw. -modifikation	Mode I-Riss-Initie- rungs-Energiefrei- setzungsrate $G_{c,init,I}$	Blockscher- festigkeit f_v
-	-	J/m^2	N/mm^2
keine Vorbe- handlung (= Trocken- Referenzwerte)	alle Klebstoffe	$G_{c,ref} = 95 - 567$	$f_{v,ref} = 16 - 26$
	unmod. Klebstoffe	$G_{c,ref} > 40$	
	modif. Klebstoffe und Ameisensäure Härter		
Druck-Vakuum- Wasser-Rück- trocknungs (VPSD-) Vorbehandlung	alle Klebstoffe	(28% - 84%) $G_{c,ref}$	(20% - 95%) $f_{v,ref}$
	unmod. Klebstoffe	(28% - 37%) $G_{c,ref}$	(20% - 60%) $f_{v,ref}$
	best.-modif. Klebstoffe	--	100% $f_{v,ref}$
	PF-Referenz-Klebstoffe	--	95% $f_{v,ref}$
Feucht-Heiß- Alterung (40 Tage)	unmodif. Klebstoffe	--	(17% - 22%) $f_{v,ref}$
	best.-modif. Klebstoffe	--	95% $f_{v,ref}$
	PF-Referenz-Klebstoffe	--	95% $f_{v,ref}$

Tabelle 6.7 Zusammenstellung von MODE I-Energiefreisetzungsraten und Blockscherfestigkeiten unterschiedlich gealterter, mit verschiedenen UF-Klebstoffen verklebter Probekörper (vgl. River et al. (1994))

Die Versuchsergebnisse der **nicht** gealterten, trocken geprüften Probekörper zeigten über alle Klebstoffmodifikationen hinweg eine große Streubreite. Die Alterungsvorbehandlungen ergaben jedoch deutliche Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Klebstofftypen.

Die MODE I - Energiefreisetzungsrate $G_{c,init,I}$ der unmodifizierten Klebstoffe nahm bei der VPSD-Vorbehandlung auf rd. 30 % – 40 % der Trocken-Referenzwerte ab, während bei den modifizierten Klebstoffen und bei dem PF-Referenzklebstoff häufig wesentlich geringere Abnahmen festgestellt wurden. Zuzufolge der undetaillierten Darstellungen der Versuchsergebnisse lässt sich lediglich für die Gesamtheit aller Klebstoffkonfigurationen bei VPSD-Vorbehandlung ausführen, dass Energiefreisetzungsraten von 28 % - 84 % der Trocken-Referenzwerte erhalten wurden.

Hinsichtlich der Blockscherfestigkeiten nach VPSD-Behandlung gilt, dass bei den unmodifizierten Klebstoffen Abnahmen auf 20 % - 60 % der Trocken-Referenzwerte erhalten wurden, während bei den „am besten“ modifizierten UF-Klebstoffen und bei dem PF-Referenzklebstoff 95 % - 100 % der Trockenwerte erzielt wurden.

Nach Vorbehandlung durch 40tägige Feucht-Heiß-Alterung, die lediglich bei den Druck-Scherprüfkörpern durchgeführt wurde, ergaben sich bei den unmodifizierten Klebstoffen, wie bei der VPSD-Vorbehandlung, extreme Festigkeitsabnahmen während die „am besten“ modifizierten UF-Harze und der PF-Referenzklebstoff nur unwesentlich Festigkeitseinbußen zeigten. Die Residual-Blockscherfestigkeiten der unmodifizierten Klebstoffe betragen nach der Feucht-Heiß-Alterung lediglich rd. 20 % der Trockenreferenzwerte.

Modellvorstellungen für die Ursachen der erheblichen Festigkeitsunterschiede zwischen den unterschiedlich modifizierten UF-Klebstoffen werden auf der Basis der nachfolgend beschriebenen elektronenmikroskopischen (ESM-)Befunde vorgestellt.

6.6.4 Ergebnisse der ESM - Untersuchungen an Klebfugen(Bruch-)flächen

6.6.4.1 Klebfugenzustand nach der Aushärtung

Die mikroskopischen Untersuchungen an gebrochenen und nicht gebrochenen Prüfkörpern zeigten, dass die Klebstoffschichten der unterschiedlich modifizierten Klebstoffe vor jeglicher Alterungsvorbehandlung und vor den mechanischen Prüfungen in drei deutlich unterschiedlichen Zuständen, die mit Typ I, II und III bezeichnet wurden, vorliegen. Die Klebstoffschicht-Zustände I, II und III, die mit dem Grad der Klebstoffmodifikation zusammenhängen, haben zufolge der durchgeführten Untersuchungen einen ausgeprägten Einfluss auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Verklebungen.

- **Typ I – Klebstoffschicht:** Die sogenannte Typ I-Klebstoffschicht ist typisch für Klebfugen mit unmodifizierten UF-Harzen. Die Klebstoffschicht weist gerade, glatt berandete Risse (= primäre Aushärtungs-Schwindrisse ①) auf, die parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung der Füge­teile verlaufen (siehe Bild 6.9). Die Rissflächen stehen senkrecht zur Holzoberfläche. Die Risslinien schneiden sich im Allgemeinen unter einem Winkel von 90 %. Betrachtet man die Oberfläche einer geprüften Klebefuge, so weist diese das genannte Rissmuster auf, wobei die Klebstoffschicht in einzelne Blöcke oder Quader zerbrochen ist. (Anmerkung: Das Rissmuster ähnelt demjenigen eines extrem

ausgetrockneten (salzhaltigen) Bodens). Das skizzierte Rissmuster wird häufig bei dickeren UF- und MUF-Klebstoffschichten erhalten, z. B. in Fugen mit geringem bis weitgehend fehlendem Pressdruck. Das genannte Rissmuster wird auch erhalten, wenn der Klebstoff zur Bestimmung der Aushärtungs- bzw. Schrumpfeigenschaften auf einer Fläche ausgegossen wird).

Die Rissbildungen resultieren aus der Freisetzung der Aushärtungs-Schrumpfeigenspannungen, infolge der durch die Holzfügeteile und der Klebstoffschicht selbst behinderten Schrumpfverformung der Klebstoffschicht während des Aushärteprozesses. Die ausgeprägte Ebenheit der Rissoberflächen ist nach Ward (1971) und Williams (1984) charakteristisch für einen schnell voranschreitenden Spröbruch in einem Polymer mit eingeschränkter molekularer Beweglichkeit und geringem Potential für plastische Deformationen. Aufgrund der größeren Steifigkeit des Holzes in Faserlängsrichtung treten deutlich mehr Aushärtungs-Schwindrisse rechtwinklig zur Faserrichtung auf als längs zur Faserrichtung.

- **Typ II – Klebstoffschicht:** Die sogenannte Typ II-Klebstoffschicht ist nach River et al. typisch für mäßig modifizierte Klebstoffe. Vergleichbar der Typ I-Klebstoffschicht treten auch hier Aushärtungs-Schwindrisse, sodann jedoch mit größeren Zwischenabständen und nur selten parallel zur Faserrichtung auf. Die Rissoberflächen sind glatt. Bei einigen modifizierten Klebstoffen liegen Aushärtungs-Schwindrisse rechtwinklig zur Faserrichtung vor, wobei die Risstiefen sodann jedoch i. d. R. nicht bis zur Holzoberfläche reichen.
- **Typ III – Klebstoffschicht:** Die Typ III-Klebstoffschichten liegen – vor der Alterungsvorbehandlung und den mechanischen Prüfungen – im Gegensatz zu den Klebstoffschichttypen I und II in **ungerissenem** Zustand vor. Ursächlich dafür ist, wahrscheinlich kombiniert, dass der Klebstoff beim Aushärten geringer schwindet und des Weiteren eine geringere Steifigkeit und höhere Zähigkeit aufweist (keine Sprödrüchigkeit, nichtlinearer Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang), was zur Verhinderung einer Rissbildung führt. Typ III-Klebstoffschichten waren in den durchgeführten Untersuchungen charakteristisch für unmodifizierte UF-Harze, die mit Ameisensäure ausgehärtet wurden und einige modifizierte UF-Harze mit Amin-Hydrochlorid-Härtern. Übliche PF-Klebstoffe liefern nach Aussage der Autoren ebenfalls eine Typ III-Klebstoffschicht.

Grundsätzlich setzen die Rissbildungen ① in der Klebstoffschicht die Aushärtungs-Schwindspannungen frei, schädigen hierbei aber die Holzfügeteile. Die beim Bruch freigesetzte Energie der Klebstoffschicht führt in Verbindung mit der Kontraktion der Klebstoffschicht parallel zur Fuge zu Zellbrüchen /-rissen im Holz (Holz-Interface-Risse) unmittelbar angrenzend an die klebstoffpenetrierte Holzgrenzschicht (vgl. Bild 6.9). Dies bedeutet, dass bei geklebten Verbindungen mit Typ I- und Typ II- Klebstoffschichten die Holz-Interface-Schicht vor jeglicher mechanischer/klimatischer Beanspruchung eine Vielzahl von Mikrorissen aufweist. Im Gegensatz dazu sind die Holz-Interface-Schichten bei Typ III- Klebstoffschichten weitestgehend rissfrei und unbeschädigt.

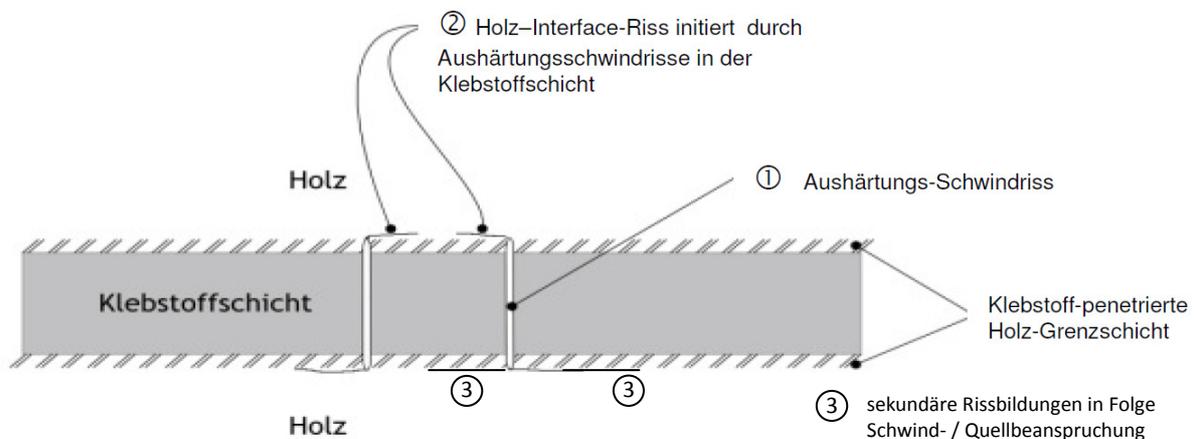


Bild 6.9: Schematische Darstellung der aufeinanderfolgenden Rissbildungen in Typ I-Klebstoffschichten mit unmodifizierten UF-Harzen (nach River et al., 1994)

- ① Glatte Aushärtungs-Schwindrisse in der Klebstoffschicht rechtwinklig zur Fuge und parallel/rechtwinklig zur Faserrichtung der Holzschicht
- ② Mikroanrisse an den Enden der Schwindrisse ① sowie verteilt im Holz-Interface unmittelbar anschließend an die Klebstoff-penetrierte Holz-Grenzschicht in Folge von Energiefreisetzungen beim Entstehen der Aushärtungs-Schwindrisse
- ③ Sekundäre Rissbildungen in Folge Schwind- / Quellbeanspruchungen bei den VPSD- oder Feucht-Heiß-Alterungsbehandlungen. Das Risswachstum geht von den Enden der primären Schwindrisse ① und von den Mikroanrissen ② aus. Durch Zusammenwachsen von Rissen kommt es letztlich zu Delaminierungen im Holz-Klebstoff-Interface

6.6.4.2 Einfluss von Alterungsbehandlungen auf die Rissbildungen in Klebstoffschichten

In Anbetracht der verschiedenen Zustandsformen (Typ I, II und III) der Klebstoffschichten nach der Aushärtung ist es nach Auffassung der Autoren River et al. nicht überraschend, dass die zyklische Druck-Vakuum (VPSD)-Behandlung einen deutlich größeren Einfluss auf unmodifizierte Klebstoffe mit Typ I-Klebstoffschichten hat, als auf Typ II- und Typ III-Klebstoffschichten mit modifizierten Klebstoffen.

Mittels elektronenmikroskopischer Aufnahmen wurde festgestellt, dass die VPSD-Behandlung keinen offensichtlichen mechanischen/strukturellen Einfluss auf die hochgradig parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung segmentiert vorliegende Typ I- Klebstoffschicht selbst hat. Die durch das Quellen und Schwinden hervorgerufenen Spannungen sind offensichtlich nicht ausreichend groß, um in der bereits ausgeprägt gerissenen Klebstoffschicht weitere Rissbildungen zu verursachen. Im Gegensatz dazu waren bei einigen modifizierten Klebstoffen mit anfänglich ungerissenen Typ III-Klebstoffschichten nach der Alterungsbehandlung Risse rechtwinklig zur Klebfugenebene und parallel zur Faserrichtung festzustellen. Diese Risse wiesen jedoch zerklüftete Rissoberflächen auf, im Gegensatz zu den völlig glatten Oberflächen der Aushärtungs-Schwindrisse der Typ I- und II-Klebstoffschichten. Derartig zerklüftete Rissoberflächen sind nach Auffassung der Autoren bei einem zäh-elastifizierten Klebstoff zu erwarten, der während einer Beanspruchung bis zum Bruch durch Temperatur und Feuchtigkeit plastiziert wird. Das Auftreten der faserparallelen Risse hatte offensichtlich nur einen geringen Einfluss auf die Festigkeit der Verklebungen.

Basierend auf der Feststellung, dass die unmodifizierten Klebstoffe bereits nach wenigen VPSD-Zyklen einen Großteil ihrer Scherfestigkeit einbüßten, die Klebstoffschicht selbst durch die Druck-Vakuum-Behandlung jedoch offensichtlich keine weiteren Schädigungen erfuhr, schlussfolgerten die Autoren, dass im Wesentlichen die Holz-Interfaceschicht mit den bereits vor der Behandlung vorliegenden dicht verteilten Mikrorissen ② und ③ weiter geschädigt wird (siehe Bild 6.9). Die Mikrorisse agieren hierbei annahmegemäß als Startrisse in faserparallelen Ebenen mit geringer Festigkeit. Infolge der unterschiedlichen Feuchte- und Temperatur-Ausdehnungskoeffizienten von Klebstoff und Holz breiten sich die Initialrisse in den schwachen Ebenen sodann aus. Im Extremfall stark vorgeschädigter (Typ I-) Klebstoffschichten unmodifizierter UF-Klebstoffe wachsen die Risse sodann zusammen und führen im Weiteren zu Delaminierungen der Klebschicht.

Die Lagerung in feuchter (80% rel. LF) und heißer (70 °C) Luft hat zufolge der durchgeführten Untersuchungen erhebliche physikalische und chemische Folgen für UF-Klebstoffe. Bei den vorhandenen Aushärtungs-Schwindrissen nahmen zum einen die Rissbreiten infolge Erosion durch das heiße und feuchte Klima während der 40tägigen Alterungslagerung zu. Die Rissbreiten nahmen ebenfalls durch weiteres Schrumpfen der Klebstoffschicht während der Alterung zu. Zum anderen wurden neue Rissbildungen mit glatten, nicht erodierten Rissoberflächen in der Nähe der primären erodierten Aushärtungs-Schwindrisse festgestellt.

6.6.4.3 *Bruchverhalten und -flächen nicht gealterter Proben*

Das Bruchverhalten / die Bruchflächen der nicht gealterten Proben unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart (Spaltzug- oder Schubbeanspruchung) und des Typs der Klebfugenschicht (Typ I, II oder III).

6.6.4.3.1 Bruchflächen bei Spaltzugprüfungen

Allgemein ist zu den im speziellen verwendeten Prüfkörpern (River und Okkonen, 1993; Ebele et. al, 1993a) anzumerken, dass der Faserverlauf leicht schräg, rd. 5 – 7 Grad zur Initialkerbe und zur Klebfuge angeordnet ist, so dass der Rissfortschritt bedingt durch den Faserverlauf weitestgehend in die Klebfugenebene gezwungen wird.

Die Bruchflächen der unmodifizierten UF-Klebstoffe mit einer Typ I-Klebstoffschicht bestanden weitestgehend aus flachen, abschnittsweise Interface-nahen Rissen im Holz. Die einzelnen Abschnitte der Rissflächen in Rissfortschrittsrichtung werden durch deutlich sichtbare Riefen begrenzt, deren gegenseitiger Abstand etwa der Länge der durch die primären Schwind-Schrumpfrisse entstandenen Klebstoffblöcke entspricht. Annahmegemäß erfolgt der Rissfortschritt in der von Mikrorissen durchsetzten Holzklebstoff-Interfaceschicht, verspringt sodann rechtwinklig zur Rissfortschrittsrichtung längs der Schwindschrumpfrisse ①, erzeugt hierbei auf der gegenüberliegenden Seite die erwähnten Riefen im Holz und verspringt anschließend wieder in Rissfortschrittsrichtung und in der mikrorissgeschädigten Holz-Klebstoff-Interfaceschicht. In der eigentlichen Klebstoffschicht traten keine neuen Bruchflächen auf.

Bei den modifizierten UF-Klebstoffen mit Typ II Klebstoffschichten traten ebenfalls im Wesentlichen Holzbrüche im Holz-Klebstoff-Interface auf, wobei in gewissem Umfang auch Brüche in der Klebstoffschicht selbst vorkamen. Über diese mehr oder weniger ausgeprägt geriefelten Bruchflächen verspringt der Riss vergleichbar zu den Aushärtungs-Schwindrissen

der Typ I-Klebstoffschichten in das gegenüberliegende Holz-Klebstoff-Interface, wobei in gewissem Umfang auch Brüche in der Klebstoffschicht auftraten.

Bei den Typ III- Klebstoffschichten der modifizierten Klebstoffe trat ein vergleichbares Bruchverhalten auf, jedoch mit geringer ausgeprägtem Verspringen der Risse zwischen den beiden Holz-Klebstoff-Interfaces. Im Falle eines Klebstoffbruches waren die Rissoberflächen ausgeprägt geriefelt. Die genannten Riefen belegen ein duktiles Bruchverhalten mit ausgeprägten plastischen Deformationen im Gegensatz zu den sehr glatten Aushärtungs-Schwindrissen der unmodifizierten Klebstoffe. Der Übergang von einer glatten zu einer geriefelten Bruchoberfläche in der Klebstoffschicht resultiert aus einem slip-stick-ähnlichen Bruchvorgang, der für zähelastifizierte wärmeaushärtende Klebstoffe typisch ist (Kinloch und Young, 1983).

6.6.4.3.2 Bruchflächen bei Scherprüfungen

Die nicht gealterten Prüfkörper zeigten sowohl bei den unmodifizierten wie bei den modifizierten Klebstoffen einen hohen Prozentsatz an Holzversagen bzw. von Holzfaserbruchanteilen. Im Falle der unmodifizierten Klebstoffe mit Typ I - Klebstoffschichten waren rechtwinklig zur Rissfortschritts- und Scherbeanspruchungsrichtung Reihen mit eigenartig aussehenden Holz-Faserbüscheln im Bereich der Aushärtungs-Schwindrisse festzustellen (Bild 6.10). Die Entstehung der Faserbüschel resultiert zufolge der Autoren aus zwei Effekten, zum einen aus den Mikrorissen im Holz-Klebstoff-Interface und zum anderen aus den Aushärtungs-Schwindrissen rechtwinklig zur Klebfuge der Typ I-Klebstoffschichten.

Zunächst wirken die Mikrorisse² gemäß Bild 6.9 im Holz-Klebstoff-Interface als Startkerben für die Rissentwicklung parallel zur Fuge. Im Weiteren erfolgt sodann bei Schubbeanspruchung und der hieraus aus der diskreten Fugendicke resultierenden Momentbeanspruchung in der Fuge, infolge des geringen Seitenverhältnisses der durch die Aushärtungs-Schwindrisse¹, (vgl. Bild 6.9), segmentierten Klebstoffblöcke eine Verdrehung der Klebstoffsegmente gemäß Bild 6.10 Die Verdrehungsbeanspruchung der vergleichsweise starren Klebstoffsegmente bewirkt eine Spaltzugbeanspruchung in der Holzschicht jeweils ausgehend von den Aushärtungs-Schwindrissen der Klebstoffschicht. Die Bruchbeanspruchung ist lokal somit eine überlagerte Scher- und Querzugbeanspruchung.

Bei einigen modifizierten Klebstoffen hatte die Klebstoffschicht eine geringere (Kohäsions-) Festigkeit als das Holz, wodurch sich in der Klebstoffschicht typische Schubbrüche mit schräg zur Riss- bzw. Klebfugenebene geneigte Bruchflächen ergaben (siehe Bild 6.11a).

6.6.4.4 *Bruchverhalten und –flächen gealterter Proben*

Das Bruchverhalten und die Bruchflächen von Proben nach zyklischer Druck-Vakuum (VPSD)-Behandlung ist im Vergleich zu den nicht gealterten Proben qualitativ ähnlich, jedoch quantitativ durch verstärktes Weiterreißen der Schwind-Schrumpfrisse zu größeren Rissen und niedrigeren Festigkeiten hin ausgezeichnet. (Anmerkung: Die Ausführungen der Autoren zu den Resultaten der VPSD-Behandlung sind in quantitativer Hinsicht vergleichsweise vage).

Der Einfluss einer vorgeschalteten Feucht-Heiß-Alterung (70°C und 80 % rel. Luftfeuchte) wurde, wie in Abschnitt 6.6.2 ausgeführt, nur bei den Scherprüfkörpern untersucht. Die Schädigung der Klebfugen durch Feucht-Heiß-Alterung zeigte sich bei den unmodifizierten UF-Klebstoffen sehr deutlich in Form zweier Effekte. Zum einen traten schräg zur Fugenebene in der Klebstoffschicht verlaufende Risse auf (Bild 6.11b). Zum anderen traten verstärkt Segmentierungen der Klebstoffschicht auf, vergleichbar den in Bild 6.9 gezeigten, nun jedoch mit gehäuften Querspaltrissen (vgl. Bild 6.11c). Insgesamt führten beide Schädigungsmechanismen zu einer verstärkten Granulierung der Fuge.

Im Unterschied zu den unmodifizierten UF-Klebstoffen bildeten sich bei einigen der modifizierten Harze, wie bei den nichtgealterten Proben schräg verlaufende Schubrisse in der Klebstoffschicht aus (vgl. Bild 6.11a). Es erfolgte jedoch infolge Fehlens der rechtwinklig zur Fuge verlaufenden Schrumpfrisse keine Granulierung der Klebstoffschicht. Bei einigen der modifizierten Klebstoffe bildeten sich überhaupt keine (Kohäsions-)Schubrisse aus.

6.6.5 Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse

Die Autoren Raknes et al. schlussfolgern, dass die Modifizierung von UF-Harzen mittels flexibler di- und trifunktionaler Amine den Widerstand von Klebfugen gegenüber zyklischen Schwind-Quellbeanspruchungen wesentlich verbessert. Dies resultiert aus der starken Reduzierung oder der völligen Verhinderung schrumpfbedingter Rissbildungen in der Klebstoffschicht und hieraus folgender Holz-Klebstoff-Interface-Risse.

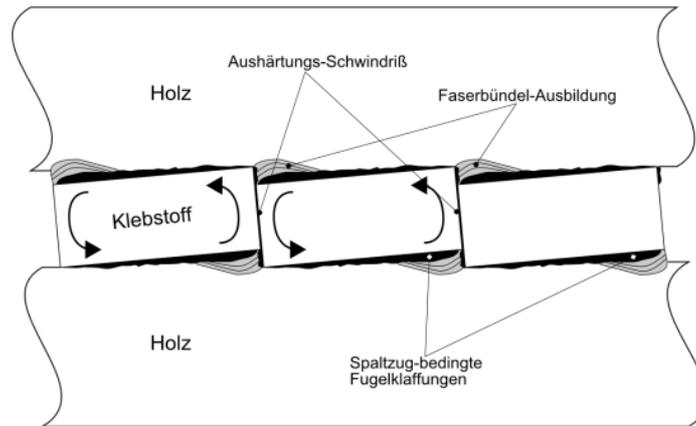


Bild 6.10: Schematische Darstellung des Bruchbildes bei Scherversuchen an nicht gealterten Typ I -Klebstoffschichten nach River et. al. (1994). Das Bild veranschaulicht die Ausbildung der typischen Faserbüschel, die aus der Quersugbeanspruchung des Holz-Interfaces am Übergang jeweils benachbarter und relativ zueinander verdrehter Klebstofffugen-Segmente resultieren. Die Bildung der einzelnen Klebstoffsegmente ist ursächlich durch die Aushärtungs-Schwindrisse bedingt (vgl. Bild 6.9).

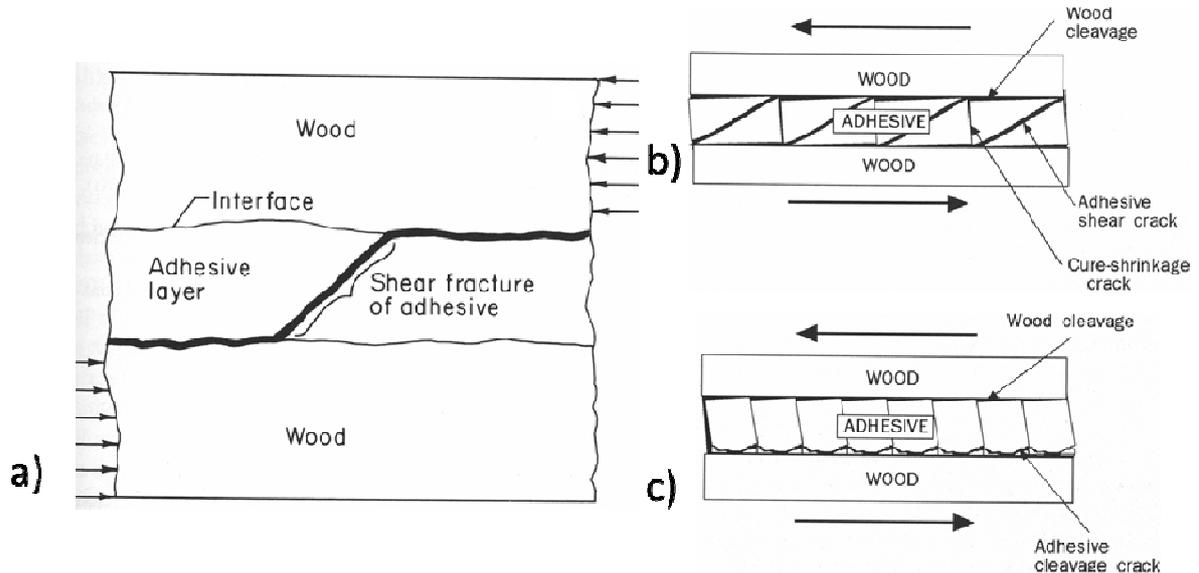


Bild 6.11a-c: Bruchschemata schubbeanspruchter reiner und modifizierter UF-Klebstoff-fugen ohne bzw. mit vorhergehender Klima-Alterung nach River et. al. (1994).

- a) Rissverläufe einiger modifizierter UF-Klebstoffe ohne vorheriger Alterung. Schräger (ca. 45°) Schubriss in der Fuge normal zur Hauptzugspannung
- b) und c) typische/unterschiedliche Rissverläufe in „reinen“ UF-Klebstoff-fugen nach vorhergehender Klimaalterung.

6.7 Veröffentlichung von Raknes (1997) – „Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing“

6.7.1 Allgemeines

Der Autor beschreibt zunächst die Gründe dafür, siehe nachfolgend, warum in Skandinavien 1964 Harnstoffharz(UF)-Klebstoffe nicht für tragende Holzbauteile zugelassen wurden (Anmerkung: dieser Sachverhalt gilt unverändert bis heute). Im Zusammenhang mit dem genannten Verwendungsausschluss wurde zur Klärung offener Fragen zur Dauerhaftigkeit von UF-Holzverklebungen ein Forschungsvorhaben zum Alterungsverhalten unterschiedlicher Klebstofftypen initiiert. Das Alterungsverhalten der Klebstoffe wurde bezüglich einiger Aspekte über einen Zeitraum von 30 Jahren untersucht. Die Ergebnisse werden zusammenfassend in der hier diskutierten Publikation (Raknes, 1997) mitgeteilt; die Einzelergebnisse sind in den in Norwegisch verfassten Schriften (Raknes, 1968; 1971; 1976; 1981) enthalten.

Die von Raknes zitierten Gründe für die Nichtzulassung von UF-Harzen in Skandinavien Mitte der 60iger Jahre resultierten im Wesentlichen aus Untersuchungen von Wangaard (1946) und Bergin (1958), deren Erkenntnisse Raknes wie folgt zusammenfasst:

„UF-Harze sind bei Außenklimabedingungen nicht dauerhaft und können durch hohe Temperaturen oder hohe Luftfeuchtigkeit oder speziell durch eine Kombination beider Einwirkungen zerstört werden.“

Auf der anderen Seite wird seitens Raknes unter Bezugnahme auf Clad (1960) darauf hingewiesen, dass einige Fabrikate unter normalen Innenraumbedingungen ein „gutes Verhalten“ in der Praxis belegt haben. In der Literaturübersicht erwähnt Raknes auch Ergebnisse von Egner und Kolb (1966), wonach ein spezielles fugenfüllendes Harnstoffharzprodukt – Kaurit WHK – nach 17 Jahren Innenraumlagerung ausreichend hohe Festigkeiten zeigte. Ungeachtet dessen war jedoch auch bei diesem Produkt ein Festigkeitsabfall speziell bei dicken Klebfugen festzustellen.

Zufolge der vorstehend genannten Untersuchungsergebnisse wurden die Leistungseigenschaften der UF-Harze wie auch spezieller anderer Klebstofftypen (säurehärtende Phenol-(PF-)Harze und Caseinklebstoffe) als zweifelhaft/unklar bezüglich der folgenden Fragestellungen bewertet:

„Würde der Festigkeitsabfall andauern, oder, würde sich der Festigkeitsabfall auf einem akzeptierbaren Niveau stabilisieren? Und wie sollten „gute“ von „schlechten“ Klebstoffen unterschieden werden“.

Zum Erhalt von Untersuchungsergebnissen zur Langzeit-Dauerhaftigkeit von UF-Klebstoffen wurden sodann 1964 Versuche begonnen, um das Verhalten der genannten Klebstoffklassen unter natürlichen und beschleunigten (Klima-)Expositionen zu klären. Zu Vergleichszwecken wurden auch zwei Phenol-Resorcin (PRF-)Klebstoffe und ein Resorcin (RF-)Klebstoff untersucht. Diese Klebstoffe werden nachfolgend als PRF/RF – Klebstoffe bezeichnet. Die ebenfalls mituntersuchten Kaseinklebstoffe und ein saures Phenolharz sind im vorliegenden Zusammenhang nicht relevant.

Die Prüfkörper (siehe nachfolgend) wurden über einen Zeitraum von bis zu 30 Jahren unterschiedlichen beschleunigten und natürlichen Alterungseinwirkungen jedoch durchweg ohne äußere mechanische Belastung ausgesetzt und nach unterschiedlichen Lagerungsdauern in Blockscher- und Delaminierungsprüfungen untersucht.

6.7.2 Untersuchte UF-Klebstoffe, Prüfkörper und Fugendicken

Die Untersuchungen umfassten insgesamt sieben verschiedene UF-Klebstofffabrikate, die drei unterschiedlichen Klassen bzw. UF-Typen hier mit I, II und III bezeichnet, zuzuordnen sind. Die Aushärtung der Klebstofffugen erfolgte überwiegend bei 20°C und in zwei Fällen bei 40°C. Die untersuchten UF-Klebstofftypen umfassten vier „klassische“ am Markt verfügbare UF-Harze mit innerten Füllstoffen (UF-Typ I), zwei furfurylierte UF-Versuchsharze (UF-Typ II) und ein Resorcin-modifiziertes UF-Harz (UF-Typ III). Die Tabelle 6.8 enthält eine Zusammenstellung der untersuchten Harz-Härterkombinationen und der jeweils verwendeten Aushärtetemperaturen.

UF-Typ	lfd. Nr. der Verklebungsbzw. Versuchs-konfiguration	UF-Klebstoff		Aushärte-temperatur °C
		Harz	Härter	
I "klassische" UF-Harze mit innerten Füllstoffen	5	Cascorit 1201	2630	20
	6	Dynorit L101	H 118	20
	7	Dynorit L101	H 118	40
	8	Cascorit 1209	2697	40
	9	Kaurit WHK	Härter 70	20
II furfurylierte Versuchs-UF- Harze	3	Cascorit 1250	2656	20
	4	Dynorit L166	H 126	20
III Resorcin-modi- fiziertes UF-Harz	10	Aerolite 311	LB 2	20

Tabelle 6.8 Zusammenstellung der von Raknes (1997) untersuchten UF-Harze

Als Prüfkörper bei den **beschleunigten** Alterungsversuchen (siehe nachfolgend) wurden einschnittige faserparallel verklebte Längszugscherproben aus Buchenholz (*Fagus sylvatica*) gemäß englischen Prüfnormen BS 1204 -Teil 1 und/ -Teil 2 verwendet. Der Prüfkörper entspricht im Prinzip dem Längszugscherprüfkörper gemäß EN 302-1, weist jedoch eine größere Scherlänge l_s und Scherfläche $A = l_s \cdot b$ von $A = 1 \text{ inch} \times 1 \text{ inch} = 25,4 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm} = 645 \text{ mm}^2$ auf (EN 302-1: $l_s = 10 \text{ mm}$; $A = 200 \text{ mm}^2$). Es wurden zwei deutlich unterschiedliche Fugendicken untersucht. Zum einen dünne Fugen (close contact) mit Dicken $< 0,1 \text{ mm}$ und zum anderen sehr dicke Fugen von rd. $1,3 \text{ mm}$.

Als Prüfkörper bei den **natürlichen** Alterungsversuchen (siehe nachfolgend) wurden einschnittige Blockscherprüfkörper nach ASTM D 905-49 und Delaminierungsprüfkörper gemäß ASTM D 1101-59, jeweils aus Fichtenholz (*picea abies*), verwendet. Die ASTM-Blockscherprüfkörper haben eine Scherlänge und -breite von $38,1 \text{ mm} \times 50,8 \text{ mm}$. Die Ab-

messungen der ASTM-Delaminierungsprüfkörper entsprechen im Wesentlichen denjenigen der EN 302-2.

Die Blockscher- und Delaminierungsprüfkörper wurden zum Prüfzeitpunkt jeweils kurzen Brettschichtholzabschnitten, mit denen die eigentlichen Alterungslagerungen vorgenommen wurden, entnommen. Die kurzen Brettschichtholz(BSH-)abschnitte wiesen Querschnittsabmessungen von 15 cm x 15 cm und Längen von 30 cm zu Beginn der Alterungsversuche auf. Der Querschnittsaufbau bestand jeweils aus 6 flächig miteinander verklebten Lamellen (dünne Fugen $\leq 0,1$ mm) mit den Abmessungen (Dicke x Breite x Länge) von 2,5 cm x 15 cm x 30 cm. Die BSH-Abschnitte wurden von Brettschichtholz(BSH-)trägern gleicher Querschnittsabmessungen mit einer Länge von 4,5 m abgeschnitten. Je Klebstoff wurden insgesamt vier BSH-Träger hergestellt bzw. verwendet.

6.7.3 Alterungsbedingungen

6.7.3.1 Beschleunigte Alterung

Es wurden zwei nachstehend spezifizierte beschleunigte Alterungsbedingungen, hier mit BA-FH und BA-FT bezeichnet, sowie aus Vergleichsgründen Referenz(Normalklima-)bedingungen (R) verwendet:

- R-20/65 = Referenz(Normalklima-)bedingungen
20°C/65% rel. Luftfeuchte (LF); insgesamt 5 Jahre Lagerung
- BA-FH = Feucht-Heiß-Zykluslagerungen
stufenweise verändertes Klima mit aufeinanderfolgenden Feucht- und Heißperioden (siehe nachstehend) von jeweils einem Monat; insgesamt 3 Jahre Lagerung
 - Feuchteperiode: 20°C - 25°C / 85 % – 90 % rel. LF
 - Heißperiode: 50°C / 50 % - 60 % rel. LF
- BA-FT = Feucht-Trocken-Zykluslagerungen
stufenweise verändertes Klima mit aufeinanderfolgenden Feucht- und Trockenperioden (siehe nachstehend) von jeweils einem Monat; insgesamt 5 Jahre Lagerung
 - Feuchteperiode: 20 – 25°C / 85 – 90 % rel. LF
 - Trockenperiode: 25 – 30°C / 25 – 30 % rel. LF

6.7.3.2 *Natürliche Alterung*

Neben den Referenzklimabedingungen R-20/65 wurden insgesamt vier unterschiedliche nachfolgend spezifizierte natürliche Alterungsbedingungen, hier mit NA-1 bis NA-4 bezeichnet, über unterschiedliche Zeiträume von mindestens 10 bis maximal 33 Jahren untersucht:

- R-20/65: Referenzbedingungen: 20°C / 65% rel. Luftfeuchte
- NA-1: Außenklima, ungeschützt auf einem Dach (= ungeschütztes Außenklima); Versuchszeitraum 10 Jahre
- NA-2: Außenklima, unter Dach (= geschütztes Außenklima); Versuchszeitraum 22 Jahre
- NA-3: ungeheiztes, gut belüftetes Lager; die geschätzten Temperatur- und Luftfeuchtespannen betragen: -10°C bis +35°C sowie 40 % – 80 % rel. LF
- NA-4: geheizter Keller mit relativ trockenem Klima; die geschätzten Temperatur- und Luftfeuchtespannen betragen: +15°C bis +25°C sowie 30 % – 60% rel. LF

Die Gründe für die bei unterschiedlichen Alterungsbedingungen deutlich unterschiedlichen Alterungszeiträume sind zum einen in den Versuchsergebnissen und zum anderen in der Zerstörung von Versuchsständen begründet (siehe nachfolgend).

Vor Beginn der natürlichen Alterungslagerungen wurde mittels Delaminierungs- und Blockscherprüfungen kontrolliert, ob die Klebfugen der BSH-Träger den Anforderungen des Norwegischen Glulam Control, NTI, (1975) entsprechen. Dies war ausnahmslos gegeben.

6.7.4 **Versuchsergebnisse**

6.7.4.1 *Versuche mit beschleunigter Alterung*

Die Versuchsergebnisse wurden von Raknes (1997) in qualitativer Weise wie folgt zusammengefasst:

- Normalklimabedingungen (R-20/65): Die Harnstoffharze behalten ihre (Ausgangs-)Festigkeit in gut ausreichendem Maße.
- Feucht-Trocken-Zykluslagerungen (BA-FT): Die Nassfestigkeit nimmt progressiv ab.
- Feucht-Heiß-Zykluslagerungen (BA-FH): Die Nassfestigkeit nimmt progressiv ab und hierbei ausgeprägter als bei den Feucht-Trocken-Zykluslagerungen.

Die Vergleichsversuche mit den PRF/RF-Klebstoffen ergaben bei allen Lagerungsbedingungen nahezu unveränderte Nassfestigkeiten. Die PRF/RF-Verklebungen erfüllten nach 3 bzw. 5 Jahren Klimaexposition die Anforderungen der Normen BS 1204-Teil 1 und -Teil 2.

6.7.4.2 Versuche mit natürlicher Alterung

6.7.4.2.1 Alterungsbedingung NA-1: ungeschütztes Außenklima

Die Versuche wurden nach 10 Jahren infolge ausgeprägter Fäulnisentwicklung in den Prüfkörpern abgebrochen. Für diesen Zeitpunkt wurden folgende Versuchsergebnisse erhalten:

- a) Alle Harnstoffharz-Verklebungen ergaben nach 10 jähriger frei bewitterter Außenklimalagerung Delaminierungsergebnisse, die weit oberhalb (= außerhalb) der Anforderungen lagen.
- b) Die Blockscherfestigkeiten und die Holzfaserbruchanteile nahmen bei allen Harnstoffharzklebstoffen (eine Ausnahme, siehe nachfolgend) im Laufe der 10jährigen Alterung mehr oder weniger stetig ab. Nach 6 Jahren erfüllte nur noch der Resorcin-modifizierte Versuchs-UF-Klebstoff Nr. 10 die „Anforderungen“ des Norwegischen Glulam Control; nach 10 Jahren Lagerung lagen jedoch auch die Werte des Klebstoffs Nr. 10 unterhalb der Anforderungen.
- c) Die Vergleichsversuche mit den PRF-Klebstoffen ergaben im Gegensatz zu den UF-Klebstoffen nach 10 Jahren ungeschützter Aussenlagerung Delaminierungsergebnisse, die die Anforderungen erfüllten; die Resultate der reinen PF-Klebstoffe lagen geringfügig unterhalb der Anforderungen. Die Blockscherergebnisse der PRF- und die RF-Verklebungen waren nach 6 Jahren Lagerung als „gut“ zu bezeichnen. Nach 10 Jahren Lagerung lag der Holzfaserbruchanteil immer noch über 80 %, wohingegen die Blockscherfestigkeit infolge Abminderung der reinen Holzfestigkeit abgenommen hatte. (Anmerkung: das Ausmaß der Festigkeitsabnahme wird in der Arbeit nicht spezifiziert und die diesbezüglichen Erläuterungen sind eher vage. Als mögliche Gründe werden in der Arbeit die Klimaeinwirkungen, Pilzbefall, Schrumpfspannungen der Klebschicht oder eine Kombination der angeführten Punkte genannt).

6.7.4.2.2 Alterungsbedingung NA-2: geschütztes Außenklima

Die Versuche wurden nach 22 Jahren bedingt durch einen Einsturz des Daches des Versuchshauses sowie Vandalismus-Einwirkungen beendet.

a) Delaminierungsversuche

Die nicht explizit angegebenen Delaminierungs-Versuchsergebnisse der Versuche nach ASTM D 1101-59 lagen nach Angaben des Autors in vergleichbarer Größenordnung wie die Ergebnisse nach Lagerung bei Normalklimabedingungen R-20/65 mit vergleichbarer Expositionszeit von 22 Jahren (siehe nachfolgend). Hierzu ist anzumerken, dass die „Normalklima-Alterungsbedingungen R-20/65 näherungsweise doppelt so hohe Delaminierungsergebnisse erbrachten, wie die Proben mit den Alterungsbedingungen NA-3 (ungeheizt, gut belüftet) und NA-4 (geheizt, relativ trocken).

b) Blockscherversuche

Die nicht quantitativ angegebenen Ergebnisse der Blockscherversuche lagen nach Angaben des Autors in gleicher Höhe wie die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Innenraum-Alterungsbedingungen R-20/65, NA-3 und NA-4 und sind in den Scherfestigkeitsmittelwerten dieser Alterungsbedingungen mit enthalten.

6.7.4.2.3 Alterungsbedingungen R-20/65, NA-3 und NA-4: unterschiedliche Innenraumklimata

a) Delaminierungsversuche

Für die klassischen UF-Klebstoffe (Nr. 5 bis Nr. 9) wurde wie in Bild 6.12 (= Neuauswertung des Bildes 2 in Raknes (1997) gezeigt, mit zunehmender Alterungsdauer durchweg ein unterschiedlich ausgeprägter Anstieg der Delaminierungsprozentsätze (Gesamtprozentsätze) erhalten. Die Zunahme der Fugendelaminierungen trat verstärkt ab einem Alterungszeitraum von rd. 15 Jahren auf. Im Vergleich dazu war bei dem Delaminierungsverhalten der PRF/RF-Klebstoffe keine Veränderung über den gesamten Alterungszeitraum von 30 Jahren festzustellen (vgl. Bild 6.12). Die Gesamtdelaminierungsprozentsätze blieben im Falle der letzteren Klebstoffe durchweg deutlich unterhalb des maximal zulässigen Wertes von 5 %. Für die in Bild 6.12 nicht angegebenen alterungsabhängigen Delaminierungsprozentsätze der beiden furfurylierten UF-Versuchsharze Nr. 3 und Nr. 4 wurden abweichend von den „klassischen“ UF-Harzen vergleichbar günstige Ergebnisse wie bei den PRF/RF-Klebstoffen erhalten.

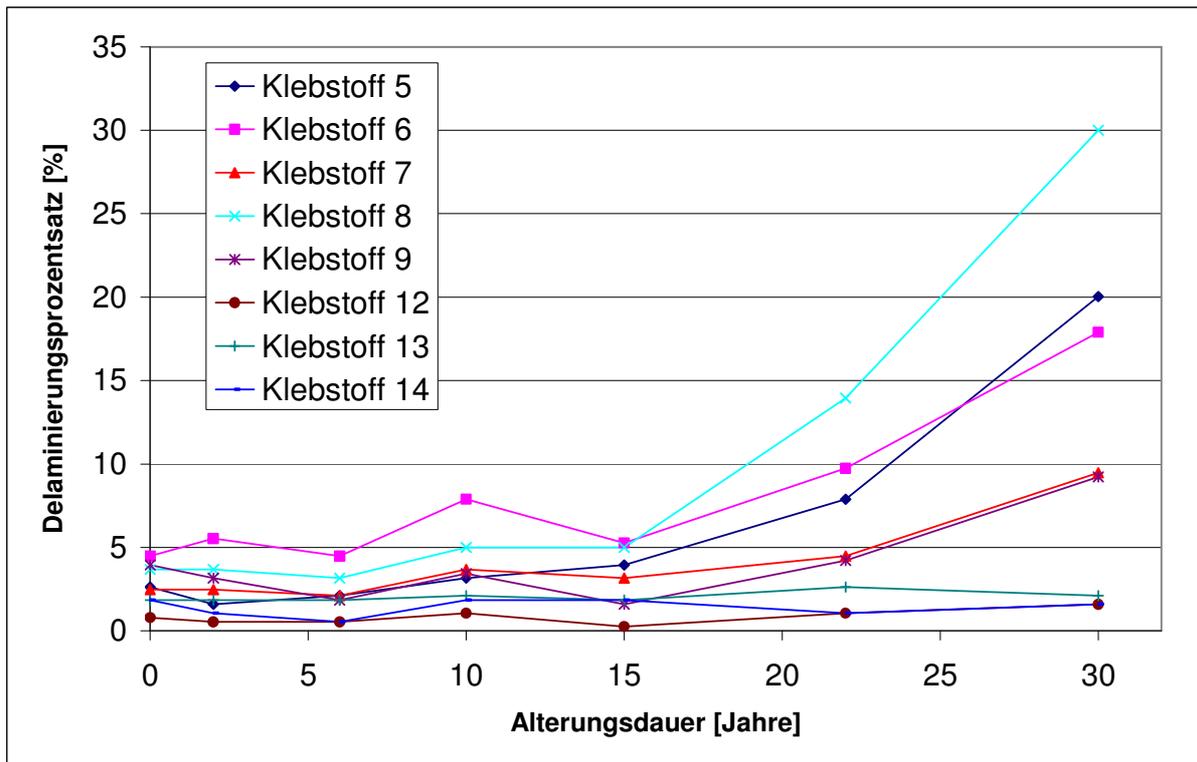


Bild 6.12 Ergebnisse der Delaminierungsversuche (Raknes, 1997) mit den „klassischen“ UF-Harzen Nr. 5 – Nr. 9 nach unterschiedlichen Lagerungsdauern bei den Alterungsbedingungen R-20/65, NA-3 und NA-4 (jeweils Innenraumklima). Zu Vergleichszwecken sind die Versuchsergebnisse mit den PRF/RF-Klebstoffen Nr. 12, 13 und 14 mit angegeben.

b) Blockscherversuche

Die Ergebnisse der Blockscherversuche sind basierend auf den Werten der Tabelle 2 bei Raknes (1997) graphisch in den Bild 6.13 a,b bis Bild 6.15 a,b dargestellt. Zu den Ergebnisdarstellungen ist anzumerken, dass diese bis zu dem Alterungszeitpunkt „22 Jahre“ in den jeweils angegebenen Mittelwerten neben den Ergebnissen der Innenraumklimata R-20/65, NA-3 und NA-4 auch das geschützte Außenklima NA-2 beinhalten. Die Versuchsergebnisse für den Alterungszeitpunkt 30 Jahre repräsentieren sodann ausschließlich die Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der drei unterschiedlichen Innenraumklimata. Bild 6.13 a,b veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der Blockscherfestigkeit und der Alterungsdauer der fünf untersuchten „klassischen“ UF-Harze (UF-Typ I) Nr. 5 – Nr. 9. Bild 6.13 a zeigt hierbei die Einzelwerte der jeweiligen Klebstoffe zu bestimmten Alterungszeitpunkten und Bild 6.13 b zeigt die Streubreite der Werte ohne Zuordnung zu einem bestimmten Klebstoff sowie den mittleren Verlauf der Blockscherfestigkeit in Abhängigkeit von der Alterungszeit. In analoger Weise geben die

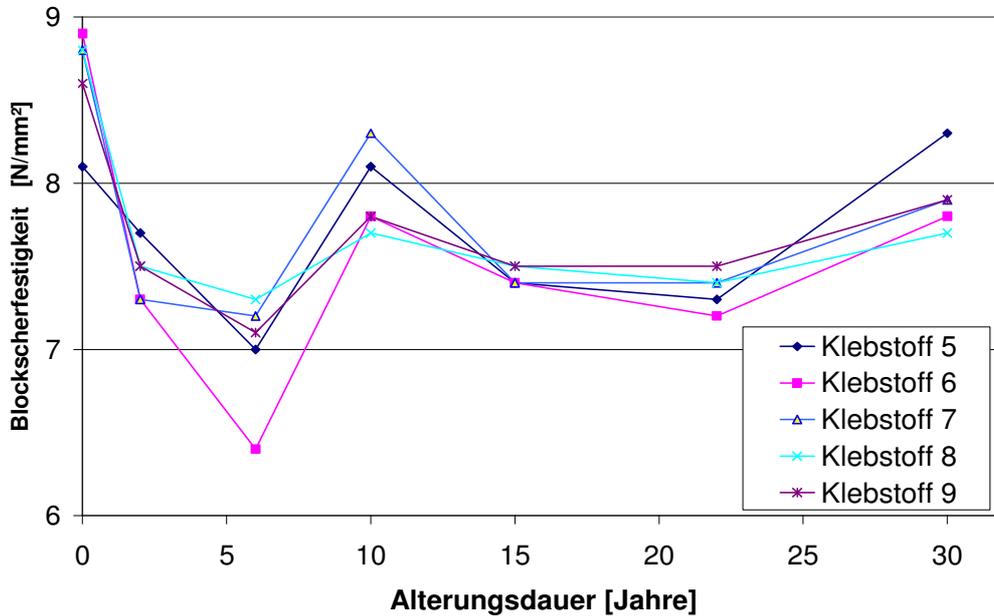
Bilder Bild 6.14 a, b für dieselben UF-Klebstoffe Nr. 5 – Nr. 9 die Zusammenhänge der Holzfaserbruchanteile und der Alterungsdauer wieder. Hierbei zeigt Bild 6.14 a die Einzelwerte aller Klebstoffe bzw. Verklebungen und Bild 6.14 b die Streubreiten (Minimal- und Maximalwerte) sowie den Mittelwertverlauf.

Wie aus den Bildern Bild 6.13 a,b ersichtlich, erfolgte bei allen UF-Klebstoffen innerhalb der ersten sechs Jahre eine vergleichsweise deutliche Abminderung der Blockscherfestigkeit in der Größenordnung von rd. 15 % - 25 %. Ein ähnlicher Sachverhalt war auch bei den unten diskutierten PRF/RF-Proben festzustellen (Bild 6.15 a) so dass die Vermutung nahe liegt, dass hier primär ein reversibler Holzfeuchteeffekt gemessen wurde. Der Ausschluss einer irreversiblen Holz- oder Klebstoffdegradation lässt sich damit begründen, dass sowohl im Falle der UF-Harze wie der PRF/RF-Harze die Festigkeiten nach 10jähriger Alterung wieder deutlich (10% - 15%) über den Sechsjahreswerten lagen.

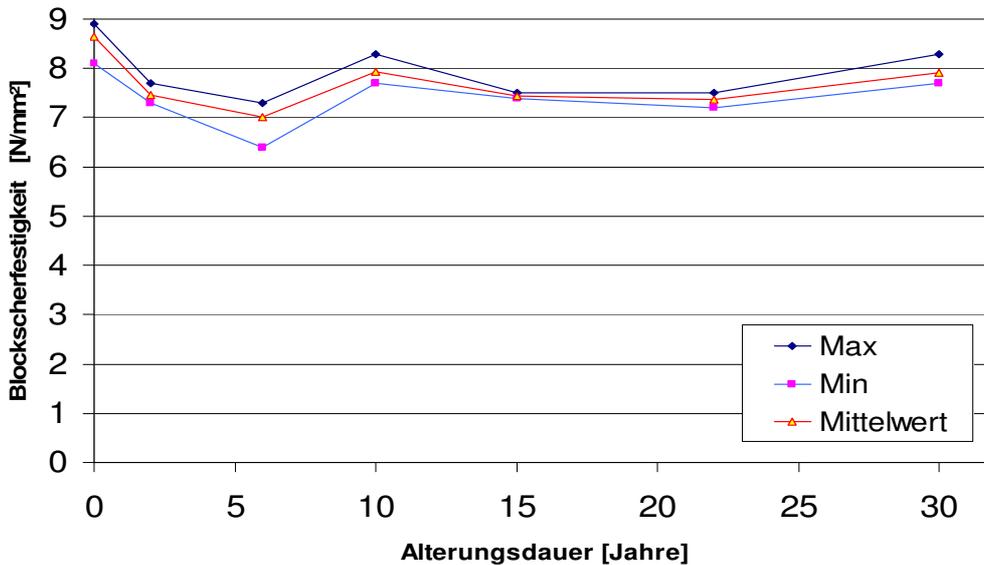
Im Alterungszeitraum von 15 bis 22 Jahren waren bei allen UF-Klebstoffen nur unwesentliche Festigkeitsveränderungen festzustellen und die Ergebnisse zum Zeitpunkt 30 Jahre lagen durchweg über dem Niveau der Festigkeitswerte nach 15 bzw. 22 Jahren und entsprachen etwa dem Festigkeitsniveau nach rd. 2jähriger Alterung. Das absolute Festigkeitsniveau nach 30jähriger Alterung lag bei allen UF-Klebstoffen im Bereich von rd. 7,5 – 8,5 N/mm², d. h. auf einem vergleichsweise hohen Level nach heutigem Stand der Technik. Im Vergleich zum skizzierten Alterungsverlauf der Scherfestigkeiten wurde bei den Holzfaserbruchanteilen eine deutlich abweichende Abhängigkeit von der Alterungsdauer erhalten. Wie aus den Kurvenverläufen der Bilder 6.14 a,b deutlich ersichtlich ist, lag bei allen UF-Harzen ab einer Alterungsdauer von 10 Jahren eine ausgeprägte Verringerung des Holzfaserbruchanteils auf eine Bandbreite von rd. 45 % bis 55 % nach 30jähriger Alterung vor, was im Vergleich zu den Höchstwerten nach rd. 2jähriger Alterung eine Abnahme von rd. 35 – 50 % darstellt.

Die in den Bildern 6.15 a,b dargestellten Ergebnisse der PRF/RF-Klebstoffe Nr. 12, 13 und 14 weisen keine qualitativen Unterschiede bei den alterungsabhängigen Verläufen der Blockscherfestigkeiten und der Holzfaserbruchanteile im Vergleich zu den UF-Harzen auf. Bezüglich der absoluten Werte liegen die PRF-Klebstoffe jedoch sowohl bei den Blockscherfestigkeiten wie bei den Holzfaserbruchanteilen durchweg höher. Die Bilder 6.16 a,b verdeutlichen diesen Sachverhalt für die jeweils zu einem Kollektiv zusammengefassten UF- bzw. PRF/RF-Klebstoffe. Der Unterschied hin zu höheren Werten bei den PRF/RF-Klebstoffen beträgt bei den Scherfestigkeiten unabhängig vom Alte-

rungszeitpunkt im Mittel rd. 1 N/mm² und bei den Holzfaserbruchanteilen rd. 10 % – 15 %.



a)

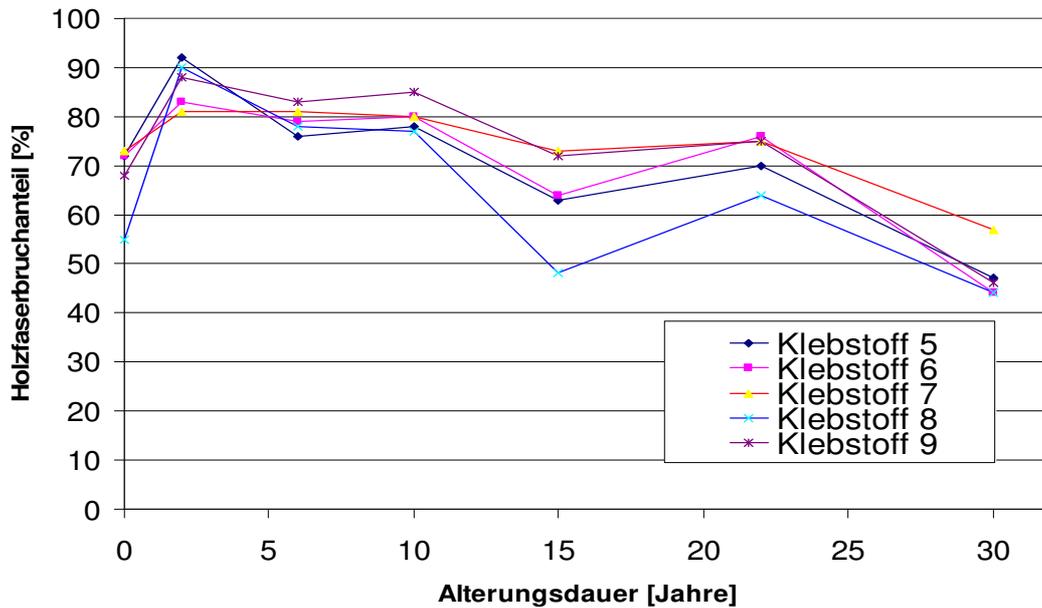


b)

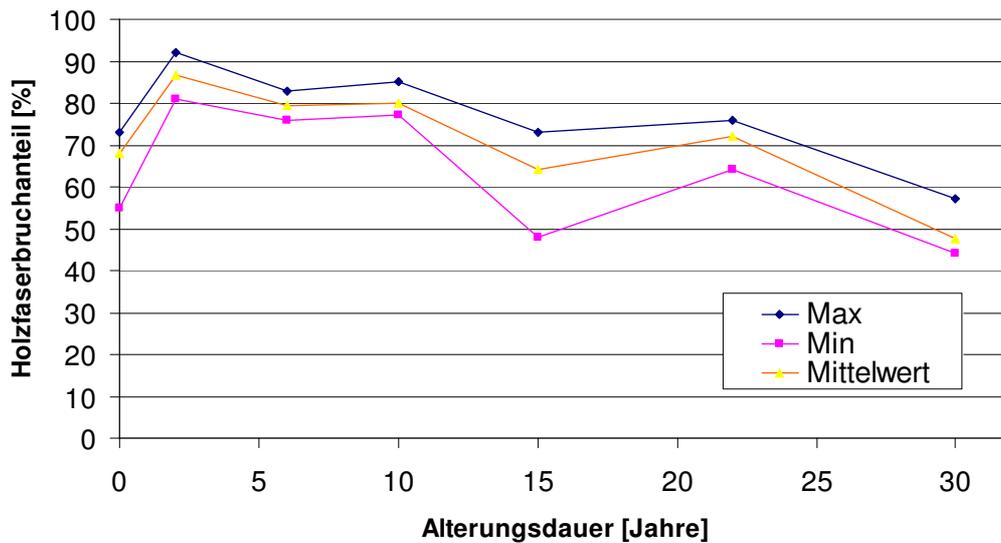
Bild 6.13 a, b Zusammenhang zwischen Blockscherfestigkeit und Alterungsdauer der Blockscherprüfkörper (nach Raknes, 1997) mit fünf „klassischen“ UF-Klebstoffen Nr. 5 – Nr. 9; die angegebenen Holzfaserbruchanteile repräsentieren die Mittelwerte der Lagerung in den drei Innenklimata R-20/65, NA-3 und NA-4 sowie bis einschließlich des Alterungszeitpunkts „22 Jahre“ des geschützten Außenklimas NA-2

a) Einzelwerte je Klebstoff

b) Extremwerte und Mittelwertsverlauf



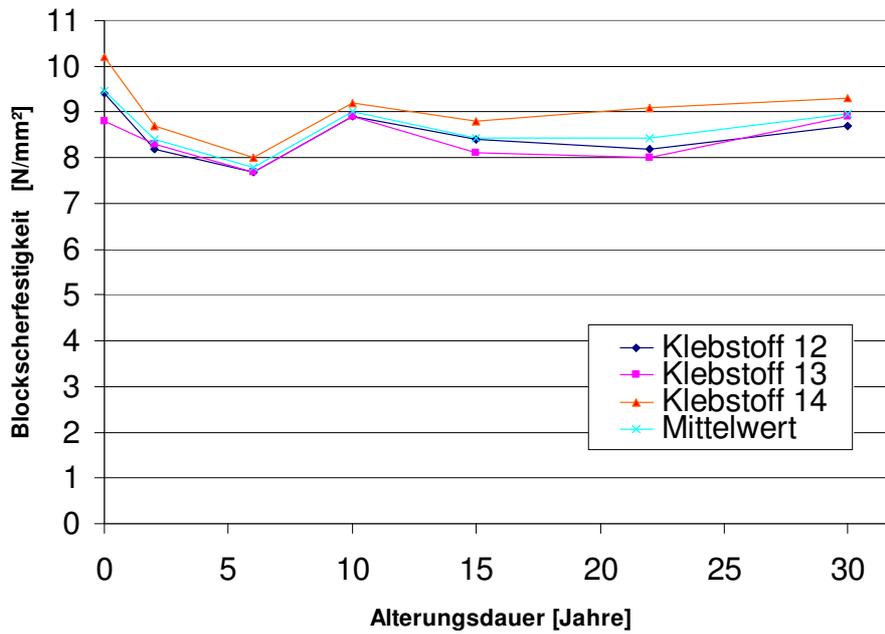
a)



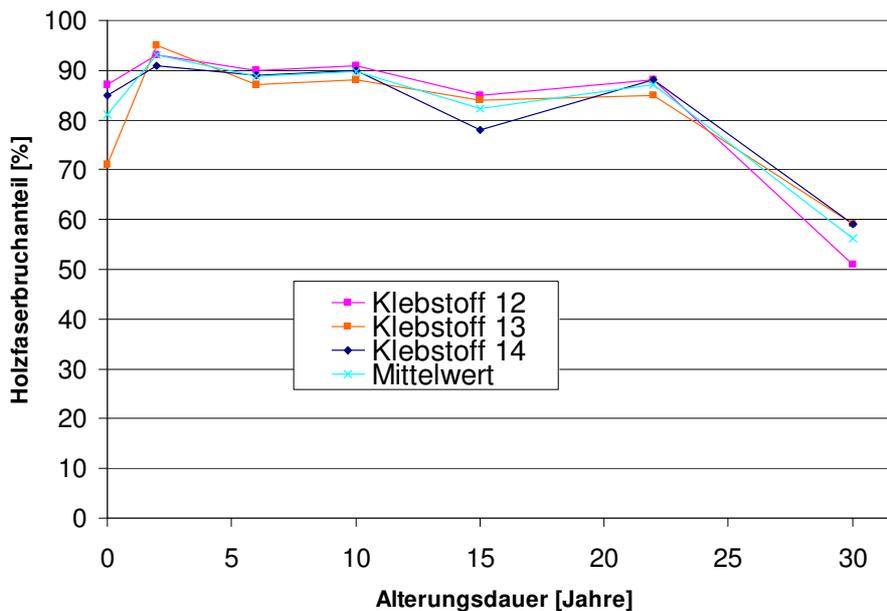
b)

Bild 6.14 a,b Zusammenhang zwischen Holzfaserbruchanteil und Alterungsdauer der Blockscherprüfkörper (nach Raknes, 1997) mit fünf „klassischen“ UF-Klebstoffen Nr. 5 – Nr. 9; die angegebenen Holzfaserbruchanteile repräsentieren die Mittelwerte der Lagerung in den drei Innenklimata R-20/65, NA-3 und NA-4 sowie bis einschließlich des Alterungszeitpunkts „22 Jahre“ des geschützten Außenklimas NA-2

- a) Einzelwerte je Klebstoff
- b) Extremwerte und Mittelwertsverlauf



a)



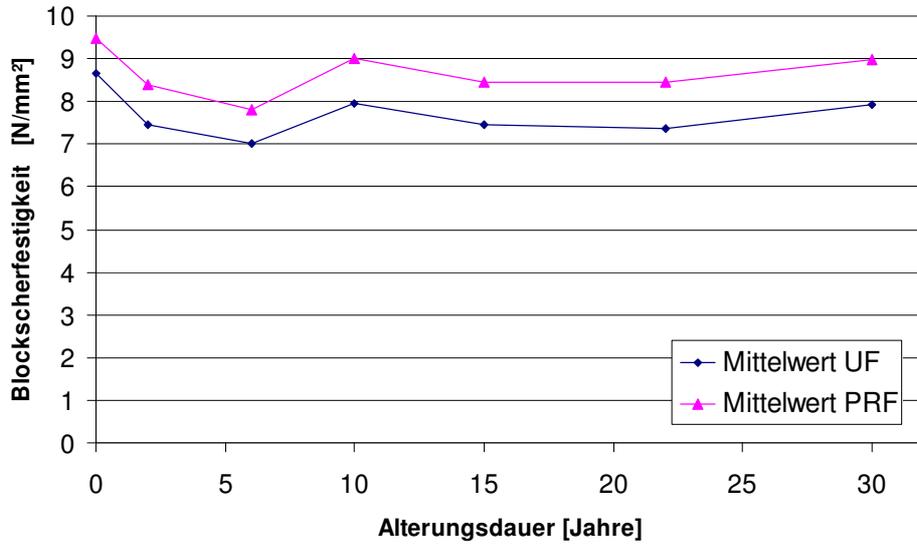
b)

Bild 6.15 a,b

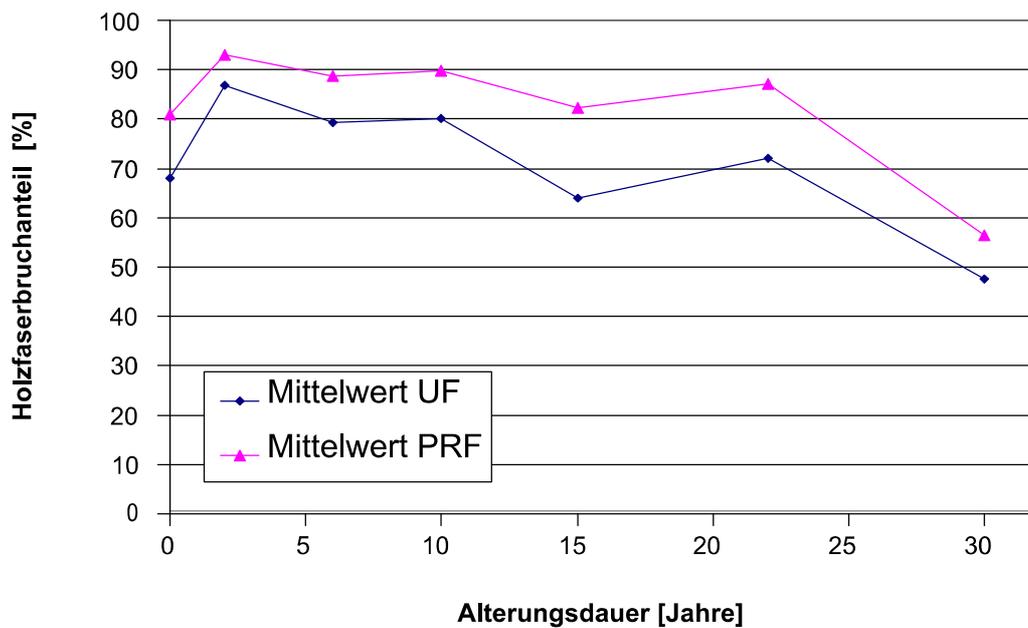
Ergebnisse der Blockscher-Alterungsversuche (Scherfestigkeit und Holzfaserbruchanteil) der drei in den Untersuchungen von Raknes (1997) verwendeten PRF/RF-Klebstoffe Nr. 12, 13 und 14. Die Ergebnisse repräsentieren die Mittelwerte der Lagerungen in den drei Innenklimata R-20/65, NA-3 und NA-4 sowie bis einschließlich des Alterungszeitpunkts „22Jahre“ des geschützten Außenklimatas NA-2.

a) Blockscherfestigkeits-Alterungsdauerzusammenhang

b) Holzfaserbruchanteil-Alterungsdauerzusammenhang



a)



b)

Bild 6.16 a,b

Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der Bockscher-
 Alterungsversuche (Blockscherfestigkeiten und Holzfaserbruchanteile)
 von Raknes (1997) mit fünf „klassischen“ UF-Klebstoffen und drei zu Re-
 ferenzzwecken geprüften PRF/RF-Klebstoffen. Die Ergebnisse repräsen-
 tieren die Mittelwerte der Lagerungen in den drei Innenklimata R-20/65,
 NA-3 und NA-4 sowie bis einschließlich des Alterungszeitpunkts
 „22Jahre“ des geschützten Außenklimatas NA-2.

a) Blockscherfestigkeits-Alterungsdauerzusammenhang

b) Holzfaserbruchanteil-Alterungsdauerzusammenhang

6.7.5 Zusammenfassende Bewertung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der von Raknes (1997) mitgeteilten Untersuchungen und die Schlussfolgerungen des Autors lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Oberflächen der Klebstoffugen von Proben der „klassischen“ UF-Harze Nr. 5 – Nr. 9, die Scher- oder Delaminierungsprüfungen unterzogen waren, zeigten nach Entfernung anhaftender Holzfaserschichten schachbrettartige Rissverläufe in der Klebstoffschicht. Dies steht in Übereinstimmung mit den in Abschnitt 6.6 vorgestellten Untersuchungen von River et al. (1994).
- Die Trockenscherfestigkeit bleibt nach geringen Veränderungen nach ca. 10 Jahren weitgehend unverändert auf ausreichend hohem Niveau.
- Die Nass-Scherfestigkeit nimmt ständig ab, was ursächlich mit den vorstehend genannten Rissmustern verbunden sein soll (siehe auch River et. al. (1994)). Der Abfall der Nass-Scherfestigkeit könnte zufolge Raknes letztlich auch eine Abminderung der Trockenscherfestigkeit der UF-Harze bewirken. Schlussfolgernd hieraus wird angeraten, diese Klebstoffgruppe unter Vorbehalten zu sehen.

Anmerkung des Autors des vorliegenden Forschungsberichtes: Die Schlussfolgerung von Raknes, dass sich der festgestellte Abfall der Nass-Scherfestigkeit auch bei der Trocken-Scherfestigkeit manifestieren sollte, lässt sich aus den Untersuchungen speziell mit den Prüfkörpern, die Nutzungsklasse 2 Bedingungen ausgesetzt waren, nicht ableiten.

7 Untersuchungen zur Klebfugenfestigkeit- und beständigkeit ausgewählter UF-Klebstoffe – Prüfungen nach europäischen Normen

7.1 *Verwendete Klebstoffe und Auftragsverfahren*

Im Rahmen des berichteten Forschungsvorhabens wurden sechs speziell ausgewählte unterschiedliche UF-Klebstoff-Härter-Auftragskonfigurationen, UF1 – UF6, mittels europäisch genormter bzw. an europäische Normen angelehnter Klebstofffugen-Prüfverfahren zur Bestimmung der Klebfugenfestigkeit- und -beständigkeit untersucht. Die Auswahl der UF-Klebstoffe bzw. der Klebstoff-Härter-Auftragskonfigurationen (siehe nachfolgend) erfolgte unter Berücksichtigung mehrerer Randbedingungen und Zielsetzungen. So konnten naheliegender nur UF-Klebstoffe und dazugehörige Härter geprüft werden, die zum Zeitpunkt der Untersuchung noch am Markt verfügbar waren. Zielsetzung war unter anderem auch, das in Abschnitt 3.4.2 beschriebene spezielle getrennte Harz-Härter-Klebstoff-Auftragsverfahren, d.h. das sogenannte Härter-Vorstrich-Verfahren mit einzubeziehen, das in den 50 – 70iger Jahren des 20igsten Jahrhunderts bei UF-Klebstoffen sehr häufig verwendet wurde, das heute jedoch seit Beginn/Mitte der 80iger Jahre nicht mehr eingesetzt wird.

Die jährlich fortgeschriebene Liste²⁰ der geprüften Klebstoffe (Klebstoffliste) der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart führt unter Punkt 5 die Harnstoffharzleime auf, die nach DIN 68141:1969-10 bzw. EN 301/302 geprüft wurden und sich zum Verkleben tragender Holzbauteile im Sinne der DIN 1052 für den Innenbereich eignen. In den Jahren 2004 bis 2010 waren in der Klebstoffliste gleichbleibend acht verschiedene UF-Harze teilweise in Verbindung mit unterschiedlichen Härtern und Streckmehlen von drei unterschiedlichen Herstellfirmen aufgeführt. Von diesen grundsätzlich in Frage kommenden UF-Harz-Konfigurationen betreffend Harz/Härter/Streckmehl wurden fünf unterschiedliche Konfigurationen ausgewählt, wobei alle Hersteller mit mindestens einem Klebstoff vertreten sind.

Im Hinblick darauf, dass die Kaurit-Leime der Fa. BASF AG in Deutschland am frühesten (ab dem Jahr 1931) und mengenmäßig am meisten verwendet wurden und, da die noch in den Leimlisten geführten und produzierten Klebstoffe Kaurit-Leim 234 bzw. 270 ebenfalls eine sehr lange Verwendungshistorie mit Erstverwendungen in den 60iger- und 70iger Jahren

²⁰ Siehe Fußnote 10, Abschnitt 6.1, Seite 33

haben, wurden die Kaurit-Leime bei der Auswahl verstärkt mit einbezogen.

Grundsätzlich wurden bei der Auswahl der UF-Klebstoffe folgende Aspekte berücksichtigt:

- a) Es gibt UF-Harze/Leime die pulverförmig sind und sodann mit Wasser zur sogenannten Stamm- oder Leimlösung angemacht werden. Daneben gibt es Leime, die bereits in flüssiger Form vorliegen und keinen Wasserzusatz benötigen. Beide Alternativen wurden bei der Auswahl berücksichtigt.
- b) Alle Härter liegen in Pulverform vor und werden mit einer Ausnahme mit Wasser zur flüssigen Härterlösung angemacht. Es wurden der überwiegende Fall und der Ausnahmefall berücksichtigt.
- c) Viele UF-Klebstoffe werden mit separat zugegebenen Streckmehlen verarbeitet. Daneben gibt es Fabrikate, bei denen keine Streckmehle zugegeben werden. Bei diesen Klebstoffen enthält jedoch entweder der Härter oder das Harz Füllstoffe zur Fugenstabilisierung. Beide Alternativen wurden in der Auswahl berücksichtigt.
- d) Viele UF-Harze können mit unterschiedlichen schneller oder langsamer reagierenden Härtern verarbeitet werden. Dieser Sachverhalt wurde berücksichtigt; ein spezielles Harz (Kaurit-Leim 234) wurde mit zwei unterschiedlich reaktiven Härtern verwendet.
- e) Viele UF-Harze sind mit verschiedenen Streckmehlen verarbeitbar. In der Klebstoffliste der MPA Universität Stuttgart sind insgesamt fünf verschiedene Streckmehle aufgeführt:
 - Bonit 10-125 und Bonit 260,
 - Walzit 250 und Walzit 520 sowie
 - EB-Mehl.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die beiden unterschiedlichen Streckmehle - Walzit 250 und Bonit 260 - berücksichtigt.

Die im Einzelnen ausgewählten UF-Klebstoffkonfigurationen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Tabelle 7.2 enthält eine Zusammenstellung der verwendeten Mischungsverhältnisse der jeweiligen Stamm/Leim- und Härterlösungen sowie die Mischungsverhältnisse der Leimflotten.

Klebstoffkonfiguration	Klebstoff			Hersteller	Streckmehl		Wasser	Verwendungs-/Aufbringungsart ²⁾
	Harz	Härter	Hersteller		Bezeichnung	Hersteller		
	Bezeichnung	Konsistenz ¹⁾						
UF1	Kaurit-Leim 234 Pulver	pulv.	Härter 70 Pulver	BASF AG	Walzit 250	Franz Walz ³⁾	ja	U
UF2	Kaurit-Leim 270 flüssig	fl.	Härter 70 Pulver	BASF AG	Walzit 250	Franz Walz ³⁾	ja	U
UF3	Synteko 1206	fl.	Härter 2747 (Pulver beinhaltet Härtersubstanz und Füllstoff)	Casco Adhesives AKZO Nobel	-	-	ja	U
UF4	Preferre 4430 frühere Bezeichnung Dynorit L-530 N	pulv.	Härter 5510 (Pulver; frühere Bezeichnung Härter H-225)	Dynea	Bonit 260	Wetzel ⁴⁾ GmbH & Co.KG	ja	U
UF5	Kaurit-Leim 234 Pulver	pulv.	Härter 30 Pulver	BASF AG	Walzit 250	Franz Walz ³⁾	ja	U
UF6	Kaurit-Leim 234 Pulver	pulv.	Härter 30 Pulver	BASF AG	Walzit 250	Franz Walz ³⁾	ja	V

1) pulv. = pulverförmig; fl. = flüssig

2) U = Untermischverfahren = Auftrag des fertig gemischten Klebstoffs auf eine oder beide Fügeiteilseiten. V = Vorstrichverfahren = getrennter Auftrag der Härterlösung auf eine Fügeiteiloberfläche; die Stammlösung gestreckt mit Streckmehl wird auf das andere Fügeiteil aufgetragen

3) Handelsname: Mühle Walz, 76448 Durmersheim 4) Handelsname: Wetzel Adhesive solutions, 32052 Herford

Tabelle 7.1 Zusammenstellung der sechs für die Klebfugenfestigkeits- und Beständigkeitsprüfungen nach europäischen Normen ausgewählten Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 betreffend UF-Harze und -Härter, Streckmehlkombinationen und Auftragsverfahren

lfd. Klebstoffbezeichnung	Stammlösung bzw. flüssiger Leim		Härterlösung		Mischungsverhältnis der Leimflotte				
	Leimpulver	Wasser	Härterpulver	Wasser	Stammlösung bzw. flüssiger Leim	Härter		Streckmehl	Wasser
						Härterlösung	Härterpulver		
	Gew.-teile	Gew.-teile	Gew.-teile	Gew.-teile	Gew.-teile	Gew.-teile	Gew.-teile	Gew.-teile	Gew.-teile
-	100	100	50	50	100	7,5	-	25	-
UF1	100	100	50	50	100	7,5	-	25	-
UF2	100 (flüssig)		50	50	100	10	-	35	25
UF3	100 (flüssig)		-	-	100	-	30	-	10
UF4	100	62	20	80	100	16	-	25	-
UF5	100	100	15	85	100	7,5	-	25	-
UF6	100	100	15	85	100 ¹⁾	7,5 ²⁾	-	25 ¹⁾	-

1) Auftrag der Stammlösung mit Streckmehlzusatz ohne Härterzumischung auf jeweils eine Fügeiteiloberfläche

2) Auftrag der Härterlösung separat auf die andere Fügeiteiloberfläche

Tabelle 7.2 Zusammenstellung der Mischungsverhältnisse der Stamm- und Härterlösung sowie der Leimflotte der sechs für die Klebfugenfestigkeits- und Beständigkeitsprüfungen nach europäischen Normen ausgewählten UF-Klebstoffkonfigurationen UF1- UF6

7.2 *Versuchsprogramm*

Das Versuchsprogramm zur Bestimmung der Klebfugenfestigkeit und –beständigkeit nach unterschiedlichen Klima- bzw. Wasser-Vorbehandlungen entsprechend relevanter europäischer Normen umfasste Längszug- und Blockscherprüfungen sowie Delaminierungsversuche. Die abhängig von der jeweiligen Prüf- und Vorbehandlungskonstellation an minimal drei und in der Regel an sechs unterschiedlichen Klebstoffkonfigurationen durchgeführten Untersuchungen umfassten im Detail:

- Längszugscherprüfungen nach EN 302-1 unter Verwendung der Lagerungsfolgen A1, A2, A3, A4 und A5 gemäß EN 301 bzw. EN 302-1
- Blockscherprüfungen nach EN 391 unter Verwendung von
 - a) trockenen Prüfstäben (Lagerung I: Konditionierung bis zur Gewichtskonstanz in 20 °C/65% rel. LF) und
 - b) kaltwassergelagerten Prüfstäben (Lagerung II: 5tägige Kaltwasserlagerung (20 °C), Prüfung im nassen Zustand). Die Vorbehandlung entspricht weitgehend der Lagerungsfolge A2 gemäß EN 302-1; dort: 4 Tage Kaltwasserlagerung, hier 5 Tage Kaltwasserlagerung.
- Delaminierungsprüfungen nach EN 302-2 unter Verwendung des
 - a) (Rücktrocknungs-)Verfahrens mit niedriger Temperatur (Klebstofftyp II-Nachweis) und des
 - b) (Rücktrocknungs-)Verfahrens mit hoher Temperatur (Klebstofftyp I-Nachweis).Bei dem Verfahren mit hoher Temperatur wurden zur Beurteilung des Nachhärteverhaltens zwei unterschiedliche Aushärtezeiten der Klebfugen in den Prüfkörpern untersucht:
 - eine Woche (gemäß EN 302-1) und
 - acht Wochen.

Tabelle 7.3 enthält eine Zusammenstellung des Versuchsprogramms und der jeweiligen Prüfkörperanzahlen bei den Festigkeits- und Beständigkeitsprüfungen mit den sechs verschiedenen Klebstoffkonfigurationen UF1 bis UF6.

durchgeführte Prüfungen und untersuchte Parameter			Anzahl der Probekörper bzw. Scherfugen je Klebstoffkonfiguration						Gesamtanzahl der Probekörper bzw. Scherfugen
	Fugendicke (mm)	Klima/Wasser/Trocknungs-Lagerungsfolgen	UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	
Längszugscherprüfungen gemäß EN 302-1	0,1	A1	--	10	10	--	10	10	400
		A2	--	10	10	--	10	10	
		A3	--	10	10	--	10	10	
		A4	--	11	10	--	10	10	
		A5	--	10	10	--	10	10	
	1,0	A1	--	10	10	--	10	10	
		A2	--	10	10	--	10	10	
		A3	--	10	10	--	10	10	
		A4	--	10	10	--	10	10	
		A5	--	10	10	--	10	10	
Blockscherprüfung gemäß EN 392	0,1	Trockenprüfung 20°C/65%	10	10	10	10	10	10	120
		Kaltwasserlagerung ähnlich A2 in EN 302-1	10	10	10	10	10	10	
Delaminierungsprüfungen gemäß bzw. in Anlehnung an EN 302-2	0,1	Verfahren mit niedriger Temperatur	4	4	4	4	4	4	60
		Verfahren mit hoher Temperatur - nach 1 wöchiger Aushärtezeit ¹⁾	4	4	4	4	4	4	
		- nach 8 wöchiger Aushärtezeit	4	--	--	--	4	4	

¹⁾ gemäß EN 302-2

Tabelle 7.3 Zusammenstellung des Versuchsprogramms der Klebfugenfestigkeits- und Beständigkeitsprüfungen mit sechs verschiedenen Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6

Die Anforderungen an die Versuchsergebnisse wurden bei den Längszugscherprüfungen nach EN 302-1 und bei den Delaminierungsprüfungen nach EN 302-2 an EN 301 orientiert. Bei den Blockscherprüfungen nach EN 392 wurden im Falle der Trockenprüfung die Anforderungen der EN 386 zu Grunde gelegt. Im Falle der Nassprüfung wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens geeignete Anforderungen definiert (siehe nachfolgend).

8 Längszugscherprüfungen nach EN 302-1

8.1 Prüfkörperherstellung und Versuchsdurchführung

Zur Herstellung der Längszugscherprüfkörper nach DIN EN 302-1 wurden die vier Harnstoffharzkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6 gemäß Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2 ausgewählt. Je Klebstoffkonfiguration wurden jeweils 60 Prüfkörper mit einer dünnen Klebstofffuge ($\leq 0,1$ mm) und mit einer dicken Klebstofffuge (1,0 mm) angefertigt (siehe Bild 8.1 a,b). Von den jeweils 60 Prüfkörpern pro Klebstoffkonfiguration und Fugendicke waren $5 \times 10 = 50$ Prüfkörper planmäßig gemäß EN 302-1 in den Lagerungsfolgen A1 – A5 erforderlich. Jeweils 10 Prüfkörper dienten als Reserve. Die Herstellung der Prüfkörper zur Untersuchung der Längszugscherfestigkeit erfolgte unter stringenter Berücksichtigung der Vorgaben der EN 302-1. Je Klebstoff-/Fugendickenkonfiguration wurden sechs Brettchenpaare aus Buchenholz mit den Seitenabmessungen 135 mm x 320 mm und Dicken von jeweils 5 mm im Falle der 0,1 mm dicken Klebefugen bzw. mit Dicken von 5 und 6 mm im Falle der 1 mm dicken Klebefugen verklebt. (Anmerkung: aus jedem verklebten Brettchenpaar wurden 10 Prüfkörper mit den Seitenabmessungen 20 mm x 150 mm geschnitten).

Die Rohdichten und Jahrringlagen (Winkel zwischen Jahrringen und Klebefläche) der Buchenholzbrettchen variierten von 704 bis 726 kg/m³ bzw. von 39° - 75°. Die Verklebungen erfolgen jeweils unter Verwendung der in Tabelle 7.2 angegebenen Mischungsverhältnisse. Die Zeiten für den Leimansatz und das Mischen, für das Reifen der Leimflotte sowie die offenen und geschlossenen Wartezeiten (Beginn des Klebstoffauftrages bis Sitz der Pressen) sind in Tabelle 8.1 angegeben.

Der Klebstoffauftrag wurde im Falle der untermischten Klebstoffflotten UF2, UF3 und UF5 jeweils beidseitig zu gleichen Teilen bei einer Gesamtmenge von 400 g/m² vorgenommen. Im Falle der Klebstoffkonfiguration UF6 (entspricht der Klebstoffkonfiguration UF5, jedoch nunmehr Auftrag im Härter-Vorstrichverfahren) wurde bei gleicher Gesamtmenge die gesamte Härterlösung auf jeweils eines der beiden Füge-teile und die gesamte Stammlösung (= Harzlösung) auf das jeweilige andere Füge-teil aufgetragen. Die Zeitspanne zwischen dem Auftrag der Härterlösung und dem Auftrag der Stammlösung und nachfolgendem Verpressen betrug 12 h, womit die Vorgaben des Technischen Datenblattes (BASF, 1988) betreffend vollständiges Abtrocknen der Härterlösung nachhaltig erfüllt wurden.

Der Pressdruck und die Presszeit betragen einheitlich bei allen Klebstoffkonfigurationen 0,8 N/mm² und 24 h. Nach dem Ausschspannen wurden die verklebten Brettchenpaare 7 Tage im Normalklima 20°C/65% relative Luftfeuchte gelagert. Im Anschluss daran erfolgte die endgültige Abrichtung der Proben.

Verklebungs- Herstellstufen	Zeiten (in min) für die unterschiedlichen Klebstoffkonfigurationen					
	UF1 ¹⁾	UF2	UF3	UF4 ¹⁾	UF5	UF6
Leimansatz und Mischen	5	5	10	5	5	5 ²⁾
Reifezeit der gemischten Leimflotte (ggf. der Stammlösung)	5	5	10	15 ⁴⁾ 5 ³⁾	5	-
Zeit von Beginn des Klebstoffauftrags bis Sitz der Pressen (= offene und geschlossene Wartezeit)	100	100	120	60	20	19,5

- 1) nur relevant für die Herstellung der BSH-Kleinträger (vgl. Abschnitte 10 und 11)
 2) nur Stammlösung
 3) nur nach Zugabe von Streckmehl
 4) anschließend Mischen nach Härter-Zugabe

Tabelle 8.1 Zusammenstellung der Zeitdauern wichtiger Verklebungsherstellstufen bei der Herstellung der Längszugscherprüfkörper nach EN 302-1 unter Verwendung der vier UF-Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6 sowie bei der Herstellung der BSH-Kleinträger für die Blockscher- und Delaminierungsprüfungen unter Verwendung der UF-Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6, vgl. Abschn. 10 und 11.

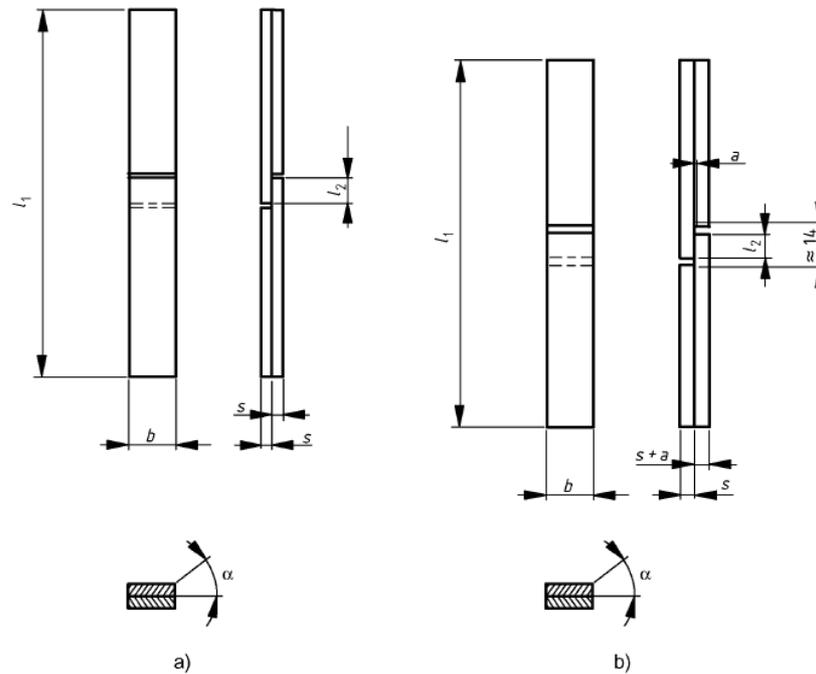


Bild 8.1 a,b Geometrie und Abmessungen der hergestellten Längszugscherprüfkörper nach EN 302-1 mit unterschiedlichen nominellen Klebfugendicken

a) Fugendicke 0,1 mm

b) Fugendicke 1 mm

Die Durchführung der einachsigen Zugversuche fand gemäß EN 302-1 in einer elektromechanischen Universalprüfmaschine mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit der Klemmbanken des Querhauptes von 3,5 mm/min statt. (Anmerkung: Die Spannköpfe waren nicht kardanisch gelagert). Der Bruch der Proben erfolgte jeweils im normativ vorgegebenen Zeitrahmen von 30 – 90 sec.

8.2 Versuchsergebnisse

8.2.1 Allgemeines

Die Einzelwerte der Versuchsergebnisse der untersuchten Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6 sind in den Tabellen A1 und A2, A4 und A5, A7 und A8, A10 und A11, Anhänge A1 bis A6, zusammengestellt. Die Tabellen A3, A6, A9 und A12, Anhänge A2, A3, A5 und A6, weisen die Streubereiche der Längszugscherfestigkeiten und der Faserbruchanteile aus. Die Bruchflächen aller Einzelproben jeder Verklebungs-/ Vorbehandlungskonfiguration sind in den Bildern A1 bis A40, Anhänge A7 bis A26, gezeigt. Typische Bruchflächenansichten unterschiedlicher Verklebungs-, Fugendicken- und Vorbehandlungskonfigurationen sind in den elektronenmikroskopischen (ESEM-) Bildern D1 bis D30, Anhänge

D1 bis D15, sowie in den auflichtmikroskopischen Bildern D-2 1 bis D-2 30, Anhänge D-2 1 bis D-2 15, gezeigt (vgl. Abschn. 9).

Die Tabellen 8.2 und 8.3 beinhalten eine komprimierte Zusammenstellung (Mittelwerte) der Längzugscherfestigkeiten und der Faserbruchanteile aller untersuchten Klebstoffkonfigurationen. Mit angegeben sind die normativen Anforderungen an die Versuchsergebnisse zufolge EN 301. Die Bilder 8.2 a,b und Bild 8.3 veranschaulichen die Zusammenstellungen der Tabellen 8.2 und 8.3 in Bezug auf die Lagerungsfolgen A1, A2 und A3 graphisch.

Fugendicke (mm)	Lagerungsfolgen (= Klima-, Wasser-, Trocknungs- vorbehandlungen nach EN 302-1)	Anforderungs- werte in N/mm ² nach EN 301	Mittelwerte der Längzugscherfestigkeiten $f_{v,0}$ [N/mm ²] für die Klebstoffkonfigurationen			
			UF2	UF3	UF5	UF6
0,1	A1 ¹⁾	10	13,2	13,2	13,4	13,4
	A2 ¹⁾	6	9,2	9,0	7,8	6,3
	A3 ¹⁾	8	13,1	12,3	12,5	13,2
	A4 ²⁾	6	0,2	0,1	0,5	0,0
	A5 ²⁾	8	1,3	0,0	2,2	0,6
1,0	A1 ¹⁾	8	10,8	11,7	10,1	6,1
	A2 ¹⁾	4	5,8	7,8	5,7	1,3
	A3 ¹⁾	6,4	8,8	10,0	8,4	5,3
	A4 ²⁾	4	0,3	0,0	0,3	0,2
	A5 ²⁾	6,4	1,5	0,0	1,4	1,1

¹⁾ nach EN 301 für den Nachweis des Klebstofftyps I und II erforderlich

²⁾ nach EN 301 nur für den Nachweis des Klebstofftyps I erforderlich

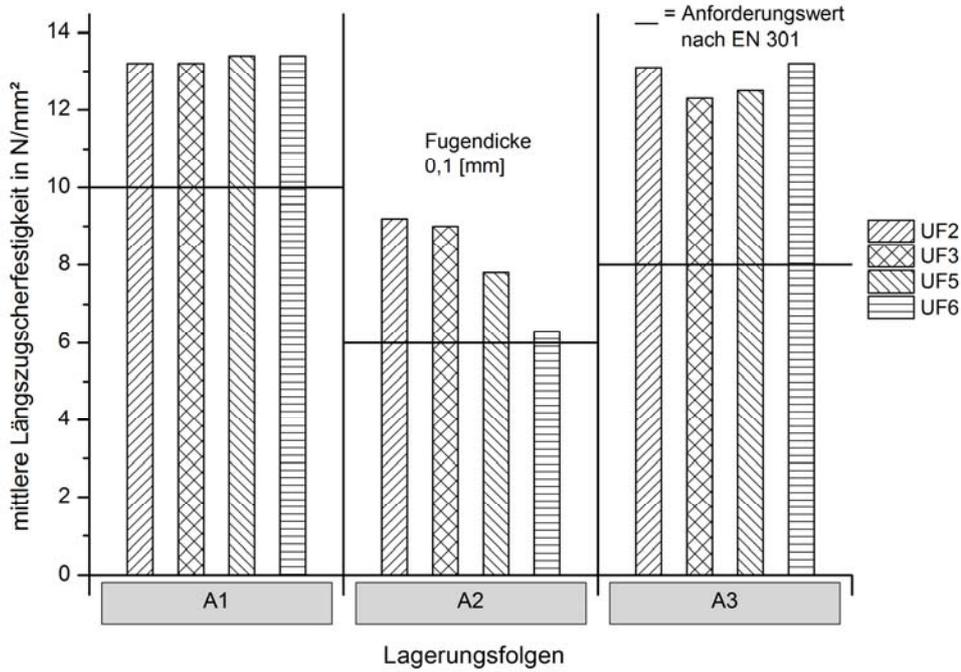
Tabelle 8.2 Zusammenstellung der Mittelwerte der Längzugscherfestigkeiten der Prüfungen nach EN 302-1 an den Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6 sowie Anforderungswerte nach EN 301

Fugendicke [mm]	Lagerungsfolgen	Mittelwert des Holzfaserbelags/Holzbruchanteils [%] für die Klebstoffkonfigurationen			
		UF2	UF3	UF5	UF6
0,1	A1 ¹⁾	100	90	100	100
	A2 ¹⁾	100	100	70	30
	A3 ¹⁾	100	100	100	100
	A4 ²⁾	0	0	0	0
	A5 ²⁾	0	0	0	0
1,0	A1 ¹⁾	15	80	30	0
	A2 ¹⁾	10	70	10	0
	A3 ¹⁾	10	45	10	5
	A4 ²⁾	0	0	0	0
	A5 ²⁾	0	0	0	0

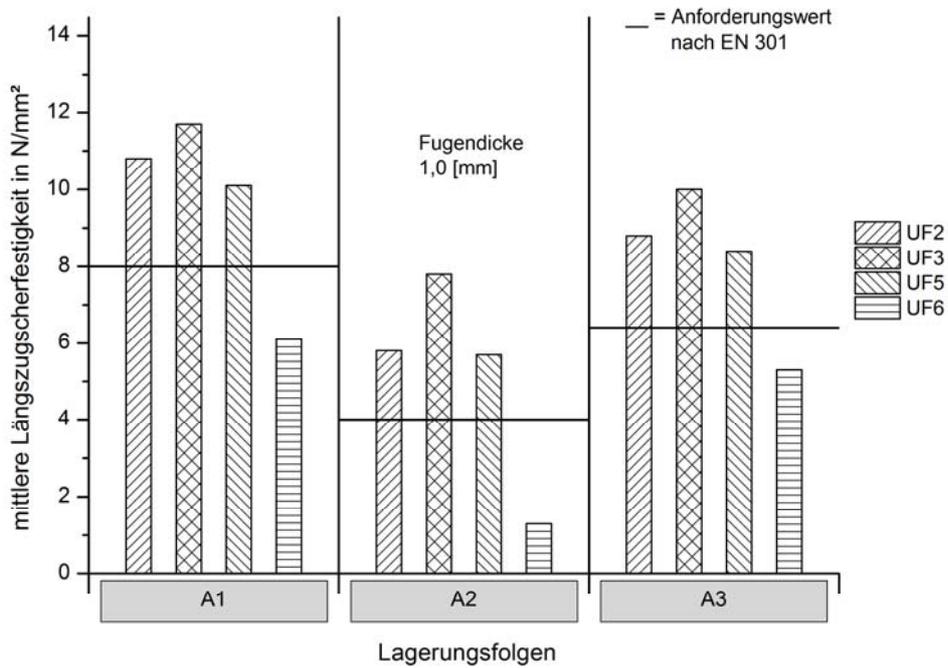
¹⁾ nach EN 301 für den Nachweis des Klebstofftyps I und II erforderlich

²⁾ nach EN 301 nur für den Nachweis des Klebstofftyps I erforderlich

Tabelle 8.3: Zusammenstellung der Mittelwerte der Holzbruchanteile (jeweils gerundet auf die nächsten 5%-Stufen) der Längszugscherprüfungen nach EN 302-1 an den Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6



a)



b)

Bild 8.2 a,b Mittlere Längszugscherfestigkeiten gemäß EN 302-1 der Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6 für unterschiedlicher Lagerungsfolgen (A1, A2 und A3) in Abhängigkeit von der Klebfugendicke. Mit angegeben sind die Anforderungswerte nach EN 301

a) Fugendicke 0,1 mm

b) Fugendicke 1,0 mm

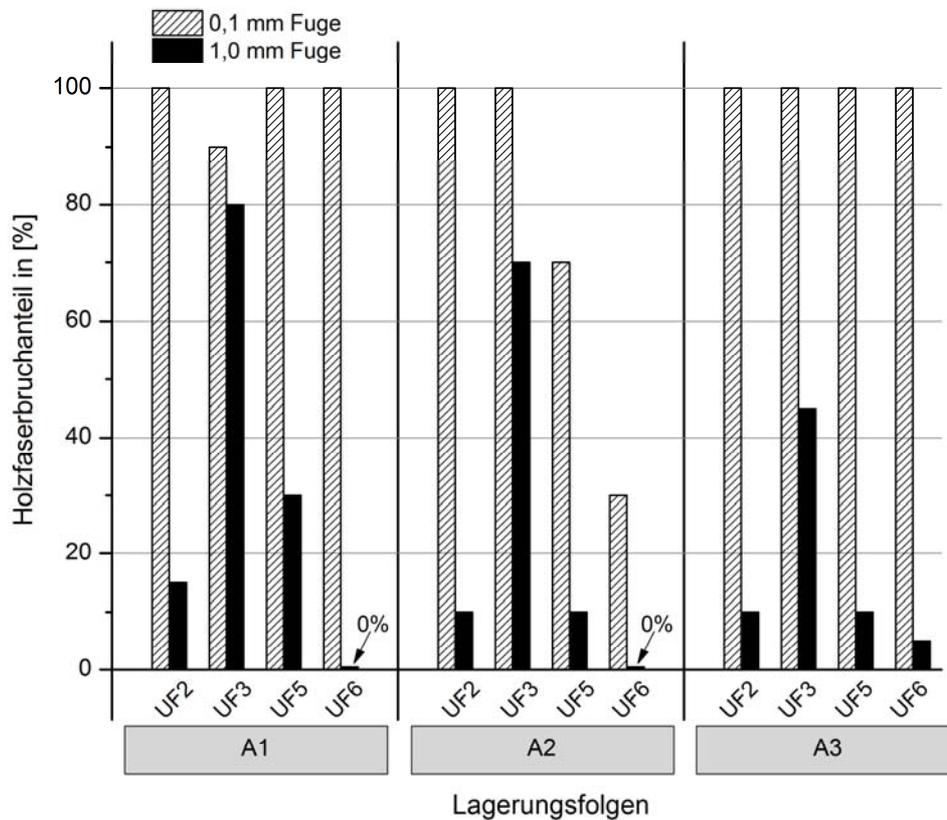


Bild 8.3 Graphische Darstellung der mittleren Holzfasbruchanteile bei den Längszugscherprüfungen nach EN 302-1 mit den Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6 für unterschiedliche Lagerungsfolgen (A1, A2, und A3) und Klebfugendicken (0,1 mm und 1,0 mm)

8.2.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

8.2.2.1 Fugendicke 0,1 mm

Wie aus Tabelle 8.2 und Bild 8.2a ersichtlich, erfüllten alle vier untersuchten Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3, UF5 und UF6 die Anforderungen der EN 301 an die mittlere Längszugscherfestigkeit bei den bezüglich des Klebstofftyps II ausschließlich zu prüfenden Lagerungsfolgen A1 (trocken), A2 (kaltwassergelagert) und A3 (kaltwassergelagert und rückgetrocknet). Die normativen Festigkeitsanforderungen wurden hierbei, abgesehen von einer Ausnahme (UF6, Lagerungsfolge A2), sehr deutlich erfüllt. (Anmerkung: Auf diese Ausnahme wird im Zusammenhang mit der Diskussion der Ergebnisse der 1 mm dicken Fugen eingegangen).

Im Hinblick auf die aus dem Forschungsvorhaben abzuleitenden Schlussfolgerungen und Praxis-Empfehlungen ist insbesondere bedeutsam, dass die Längszugscherfestigkeiten nach Rücktrocknung wieder nahezu vollständig die Ausgangsfestigkeiten der Referenz-Trockenprüfung (Lagerungsfolge A1) erreichten. Dies gilt auch für die Mittelwerte der Holzfaserberbruchanteile, wofür EN 301 jedoch keine Normanforderungen beinhaltet. Die Holzfaserberbruchanteile betragen bei allen Klebstoffkonfigurationen bei der Trockenreferenzprüfung 100 % bzw. nahezu 100 % und erreichten diese sehr hohen Werte durchgängig nach Rücktrocknung von der Kaltwasserlagerung. Auch bei den kaltwassergelagerten, nass geprüften Proben (Lagerungsfolge A2) der Klebstoffkonfigurationen UF2 und UF3 ergaben sich sehr hohe Holzfaserberbruchanteile von 100 %. Im Gegensatz dazu lagen die Holzfaserberbruchanteile der Klebstoffkonfigurationen UF5 und UF6 mit 70 % bzw. 30 % deutlich bzw. extrem unterhalb der Werte der anderen Klebstoffe (bzgl. UF6, siehe nachfolgend).

Wie erwartet, erfüllten alle untersuchten Klebstoffkonfigurationen die Anforderungen an die (mittleren) Längszugscherfestigkeiten nach Vorbehandlung mit den für den Klebstofftyp I geforderten Lagerungsfolgen A4 (Kochwasserlagerung) und A5 (Kochwasserlagerung und Rücktrocknung) in extremem Ausmaß nicht. Die Festigkeitswerte der nass geprüften Proben lagen bei nahezu Null und nach Rücktrocknung wurden abhängig von der jeweiligen Klebstoffkonfiguration nur sehr niedrige Werte von Null bis maximal $2,2 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Die Holzfaserberbruchanteile betragen bei den Lagerungsfolgen A4 und A5 durchgängig null Prozent.

Die Untersuchungen mit den Lagerungsfolgen A4 und A5 bestätigen somit voll umfänglich den prinzipiell bekannten Sachverhalt, dass bereits durch vergleichsweise kurzzeitige (6h) Einwirkung von heißem Wasser die Verklebungsbindungen von UF-Klebefugen häufig weitgehend irreversibel hydrolytisch gespalten und damit zerstört werden. (Anmerkung: Bei längerer oder mehrfach wiederholter Kochwassereinwirkung erfolgt durchgängig eine irreversible hydrolytische Zerstörung der Verklebungsbindungen.) Im Vergleich dazu wirkt sich eine Kaltwassereinwirkung über einen Zeitraum von einigen Tagen (hier: 4 Tage) im Regelfall (Ausnahme: UF6) nach Rücktrocknung der Verbindungen lediglich moderat auf den Festigkeitsabfall aus, wobei es auch zu keinen Abminderungen des Holzfaserverbruchanteils kommt.

8.2.2.2 Fugendicke 1 mm

Bei der 1 mm Fuge liegen bezüglich der Lagerungsfolgen A4 und A5 die gleichen plausiblen Sachverhalte vor wie bei der 0,1 mm Fuge, d. h. es erfolgte ein gänzlicher Verlust der Tragfähigkeit und des Holzfaserverbruchanteils (vgl. Tabellen 8.2 und 8.3); dies wird im Weiteren nicht mehr diskutiert.

Bei den im Mittelpunkt des Interesses stehenden Lagerungsfolgen A1, A2 und A3 erfüllten die mittleren Längszugscherfestigkeiten der Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3 und UF5 die Normanforderungen deutlich. Im Gegensatz dazu verfehlte die Klebstoffkonfiguration UF6 die Anforderungen bei den Lagerungsfolgen A1 und A3 deutlich und bei der Lagerungsfolge A2 (Nassprüfung) erheblich.

Bei Betrachtung der Faserbruchanteile fällt auf (Bild 8.3), dass diese bei allen Klebstoffkonfigurationen und allen Klebstofftyp II-Lagerungsfolgen (A1, A2 und A3) nunmehr weit überwiegend sehr deutlich / extrem unter den Werten liegen, die für die 0,1 mm Fuge erhalten wurden. Bei der Klebstoffkonfiguration UF6 nahmen die Faserbruchanteile nahezu durchweg auf Null ab.

Die Nichterfüllung der Festigkeitsanforderungen durch die Klebstoffkonfiguration UF6 ist insbesondere vor dem Hintergrund zu bewerten, dass die Konfigurationen UF5 und UF6 den gleichen Klebstoff-, Härter- und Füllstoffansatz umfassen und lediglich dahingehend voneinander abweichen, dass bei der Konfiguration UF5 der Klebstoff im Untermischverfahren appliziert wurde, während bei der Konfiguration UF6 der Auftrag im Härter-Vorstrichverfahren erfolgte. Wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, muss bei dem Härter-Vorstrichverfahren die einseitig auf eine Brettlamelle aufgetragene Härterlösung vollständig (hier 12 h) abgetrocknet sein, bevor der Auftrag der härterfreien Stammlösung erfolgt. Diesbezüglich liegt intuitiv die

Annahme nahe, dass sich mit zunehmender Fugendicke und damit einhergehender Entfernung der Reaktionspartner die Voraussetzungen für eine vollständige chemische Reaktion zwischen Härter und Klebstoff zunehmend verschlechtern sollten/müssen. Die unvollständige chemische Reaktion zeigt sich insbesondere in der festgestellten weitestgehend fehlenden Kaltwasserbeständigkeit (Lagerungsfolge A2), bei der die chemischen und physikalischen Verbindungen der Klebstoffschicht und des Klebstoff/Holz-Interfaces am höchsten beansprucht werden.

Die Tendenz hin zu einer unzureichenden chemischen Reaktion zwischen Härter und Harz zeichnete sich bei der Klebstoffkonfiguration UF6 bereits bei der 0,1 mm Fuge ab. Der normative Festigkeitsanforderungswert der Lagerungsfolge A2 wurde dort soeben noch erfüllt, jedoch mit deutlich größerem Abstand zu den (Referenz-)Werten der Lagerungsfolgen A1 und A3 als bei allen anderen untersuchten Klebstoffkonfigurationen.

8.2.3 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigten für drei völlig unterschiedliche Klebstoff-Harz-Härterkombinationen UF2, UF3, UF5 bzw. UF6, dass UF-Verklebungen bei Gewährleistung dünner Fugen $\leq 0,1$ mm sowohl bei Verwendung vollständiger durchmischter Klebstoffloten (=Untermischverfahren) als auch bei getrenntem Harz-Härter-Auftrag (hier: Härter-Vorstrichverfahren) sehr hohe Trockenscherfestigkeiten auch nach vorheriger mehrtägiger Kaltwasserlagerung und nachfolgender Rücktrocknung erbringen. Die diesbezüglichen, seit den 60iger Jahren unverändert bestehenden Normanforderungen (vormalig: DIN 68140-1, heute: EN 301) an die Längszugscherfestigkeit bei den Trocken- bzw. Wiedertrocken-Lagerungsfolgen A1 und A3 wurden durchgängig erfüllt. Des Weiteren zeigten die Versuchsergebnisse mit der 0,1 mm dicken Fuge, dass die Klebfugen-Nasszugscherfestigkeiten aller Klebstoff/Auftragskonfigurationen auch nach mehrtägiger Kaltwasserlagerung überwiegend auf hohem, den Normanforderungen entsprechenden Niveau liegen. Die hohen Klebfestigkeiten bei den Lagerungsfolgen A1, A2 und A3 werden durch die nahezu immer (Ausnahme: UF6, Lagerungsfolge A2) vorliegenden sehr hohen Faserbruchanteile von rd. 100 % untermauert.

Die vorstehenden Ausführungen zu den Zugscherfestigkeiten für die dünne Klebstofffuge ($\leq 0,1$ mm) treffen für drei der untersuchten Klebstoffkonfigurationen (UF2, UF3 und UF5) auch bei einer 1,0 mm dicken Fuge zu. Die gegenüber der 0,1 mm Fuge bei allen Lagerungsfolgen erhaltenen Verringerungen des Festigkeitsniveaus (mit Erfüllung aller normativen Anforderungen) liegen in der gleichen Größenordnung wie bei MUF-Klebstofffugen. Für die

1 mm Fugen wurden sodann bei allen Klebstoffkonfigurationen (UF2, UF3 und UF5) durchgängig deutlich/wesentlich niedrige Faserbruchanteile erhalten als bei der 0,1 mm dicken Fuge. Dieser Sachverhalt ist jedoch nach heutiger Normenlage nicht abträglich zu bewerten, was durchaus kritisch zu hinterfragen ist.

Die Versuche mit der 1,0 mm dicken Fuge belegten des Weiteren, dass bei Anwendung eines getrennten Harz-Härterauftrags (bei der Klebstoffkonfiguration UF6, Härter-Vorstrichverfahren) unzureichende Trocken- und Wiedertrockenscherfestigkeiten sowie extrem niedrige Nassscherfestigkeiten und gegen Null gehende Faserbruchanteile erhalten werden können, auch, wenn die nämliche Klebstoffkonfiguration bei Anwendung im Untermischverfahren (UF5) positive Verklebungsergebnisse erbringt. Die Nass-Scherfestigkeiten reduzieren sich hierbei infolge offensichtlich deutlich unzureichender chemisch/physikalischer Abbindereaktionen auf sicherheitsrelevant wesentlich zu kleine Werte.

Da sich die völlig unzureichenden Kaltwasserfestigkeiten der 1,0 mm dicken Fuge im Falle der UF6-Klebstoffkonfiguration in der Tendenz bereits sehr deutlich bei der 0,1 mm Fuge abzeichneten, wäre es wichtig zu klären, ab welchen Fugendicken die Nass-Scherfestigkeiten deutlich einbrechen. Es ist für die Praxis von erheblicher Bedeutung, ob die gravierende Nassfestigkeitsabnahme bereits im Bereich von 0,2 bis 0,5 mm dicken Fugen vorliegt oder gegebenenfalls erst bei Fugendicken von z. B. 0,7 – 1 mm. Des Weiteren ist zu klären, ob bei dicken Fugen gegebenenfalls bereits deutlich kürzere Kaltwasser-Einwirkungsdauern zu signifikanten Nass-Scherfestigkeitsabnahmen führen. Die Untersuchungsergebnisse an der speziell untersuchten Klebstoffkonfiguration UF6 mit getrenntem Harz-Härter-Auftrag in Verbindung mit 1 mm dicker Fuge legen es nahe, diesen Sachverhalt ebenfalls an anderen Klebstoff/Fugendickenkonfigurationen zu verifizieren.

Die Versuche bestätigten des Weiteren den bekannten Sachverhalt, dass UF-Klebstofffugen ungeachtet des Klebstofffabrikats und der Fugendicke nicht kochwasserfest sind und sodann auch nach Rücktrocknung, infolge irreversibler Bindungszerstörung, keine nennenswerte Restfestigkeit aufweisen.

9 Mikroskopische Untersuchungen an Klebfugen der Längszugscherprüfkörper

Das Ziel der mikroskopischen Untersuchungen an Klebfugen-Bruchflächen der Längszugscherprüfkörper bestand darin, eventuell vorliegende signifikante Unterschiede in der Klebfugenstruktur unterschiedlicher Klebstoffe bei dünnen und dicken Klebfugen in Abhängigkeit von Klima/Wasservorbehandlungen zu bestimmen. Die visualisierten Klebfugenstrukturen sollten sodann, wenn möglich, mit den Klebfugenfestigkeiten und dem Holzfaserverbruchanteil korreliert werden. In Folge der finanziellen und zeitlichen Randbedingungen des Forschungsvorhabens war der Umfang der Elektronen- bzw. Lichtmikroskopischen Untersuchungen und insbesondere deren quantitative Auswertungen, z. B. mittels Bildbearbeitungsprogrammen, letztlich jedoch deutlich einzuschränken. Anmerkung: Dies gilt insbesondere auch für die Ergebnisse der lichtmikroskopischen Aufnahmen (Auflicht- und Durchlichtmikroskopie), die im Anhang D-2 (Bilder D-2 1 bis D-2 30, Anhänge D-2 1 bis D-2 15) enthalten sind und hier im Gegensatz zu den elektronenmikroskopischen Aufnahmen nicht eingehender diskutiert werden. Die vorliegenden Erkenntnisse sollten daher im Rahmen einer separaten Studie vertieft werden.

Die im Forschungsvorhaben erstellten elektronenmikroskopischen Aufnahmen (Elektronenmikroskopie unter Atmosphärendruck (ESEM)) an drei signifikant unterschiedlichen Klebstoffkonfigurationen UF3, UF5 und UF6 sind in Tabelle 9.1 aufgeführt. Die Gesamtheit der hier besprochenen Aufnahmen ist in den Bildern D1 bis D30, Anhänge D1 bis D15, zusammengestellt.

Bei allen Klebstoffkonfigurationen sind Bruchflächen von Probekörpern mit unterschiedlichen Klima/Wasservorbehandlungen (A1, A2 und A3) und teilweise mit unterschiedlichen Fugendicken gezeigt. Für jeden einzelnen Prüfkörper liegen drei Aufnahmen der Bruchflächen mit unterschiedlich hohen Auflösungen vor. Der größte und kleinste Bildausschnitt unterscheidet sich jeweils um den Faktor 20. Die größte Vergrößerungsstufe umfasst einen Bildausschnitt von rd. 200 μm mit einer Auflösungsgenauigkeit von rd. 0,5 μm . Mitangegeben sind in Tabelle 9.1 für jeden Prüfkörper die Zugscherfestigkeit und der Holzfaserverbruchanteil.

Klebstofftyp bzw. -konfiguration	Fugendicke	Lagefolge	Prüfkörper Nr.	Bildvergrößerungs- (fokussierungs)-Nr.	Zugscherfestigkeit	Faserbruchanteil	Bild-Ausschnittsgröße (Auflösung) Maßstabsgröße	Bild-Nr. in Anhang D	Bild-Nr. im Text, Abschnitt 9
-	mm	-	-	-	N/mm ²	%	µm	-	-
UF3	0,1	A1	8	01	13,3	100	200	D1	9.1
				02			100	D2	-
				03			10	D3	-
		A2	10	01	7,63	100	200	D4	-
				02			100	D5	-
				03			10	D6	-
		A3	04	01	14,65	100	200	D7	-
				02			100	D8	-
				03			10	D9	-
		A3	06	01	10,74	100	200	D10	9.2
				02			100	D11	-
				03			10	D12	-
UF5	1,0	A1	06	01	11,13	10	200	D13	-
				02			100	D14	9.3
				03			10	D15	9.4
		A2	01	01	5,58	5	200	D16	-
				02			100	D17	-
				03			20	D18	-
UF6	0,1	A2	06	01	3,86	10	200	D22	-
				02			100	D23	-
				03			10	D24	-
	1,0	A1	08	01	2,83	0	200	D19	
				02			100	D20	
				03			10	D21	
		A2	10	01	0,97	0	200	D25	
				02			100	D26	
				03			10	D27	
		A3	08	01	5,31	0	200	D28	9.5
				02			100	D29	9.6
				03			10	D30	-

Tabelle 9.1: Zusammenstellung der elektronenmikroskopischen Aufnahmen (Elektronenmikroskopie bei Atmosphärendruck (ESEM)) an Bruchflächen von unterschiedlich verklebten und vorbehandelten Längszugscherprüfkörpern

Nachstehend sind aus der Gesamtmenge der Aufnahmen sechs Bilder unter den Bildnummern 9.1 bis 9.6 aufgeführt. Im Falle der Klebstoffkonfiguration UF3 (UF-Harz ohne separat hinzuzumischenden Füllstoff) sind Bruchflächen von Probekörpern mit der Fugendicke 0,1 mm nach Vorbehandlung mit den Lagerungsfolgen A1, A2 und A3 gezeigt. Im Falle der Vorbehandlungen A1 und A2 wurde jeweils ein repräsentativer Prüfkörper gewählt, bei der Lagerungsfolge A3 sind Aufnahmen von zwei Prüfkörpern dargestellt. Bild 9.1 (= Bild D1, Anhang D1) zeigt eine typische Bruchfläche eines mit dünner Fuge verklebten UF3-Prüfkörpers, der vor der Prüfung der Klimalagerung A1 (20%/65% rel. LF) ausgesetzt war. Da die Fügeteile der Prüfkörper nach mehrwöchiger Lagerung im selben Klima verklebt wurden, unterliegt die Klebefuge vor der Prüfung prinzipiell keinen durch die Holzfügeteile induzierten Schwind-/Quellspannungen.. Auf der Bruchfläche sind zunächst die in horizontaler Betrachtungsrichtung verlaufenden Fasern respektive die durch Zugscheren zerstörten Zellwandungen zu sehen. In vertikaler Betrachtungsrichtung und damit rechtwinklig zur Faserlängsrichtung verlaufen in der Klebstoffschicht längere Risse, die in einem regelmäßigen Muster in Abständen von rd. 300 – 600 µm auftreten. Die in den Bildern D2 und D3, Anhang D, vergrößert dargestellten Risse weisen Klaffungen (Rissöffnungen) bis zu rd. 10 µm auf. In geringem Umfang liegen auch sehr feine und kurze, faserparallel verlaufende Risse vor (vgl. Bilder D2 und D3).

Die Bilder D4 bis D6, Anhang D2 und D3, zeigen für die gleiche Klebstoff- und Fugendickenkonfiguration die Bruchfläche eines Prüfkörpers, der vor der Prüfung einer 4tägigen Kaltwasserlagerung (Lagerungsfolge A2) unterworfen war. Im Vergleich mit den Bildern D1 bis D3 ist ein etwas dichteres Rissmuster festzustellen, wobei die Risse, wie im Falle der A1-gelagerten Probe, weitgehend rechtwinklig zur Faserrichtung verlaufen.

Die Bilder D7 bis D12, Anhang D, zeigen für zwei Proben der Klebstoffkonfiguration UF3 in Verbindung mit der Fugendicke 0,1 mm Bruchflächen nach der Vorbehandlung A3 (= Wiedertrocknung nach Kaltwasserlagerung). Wie insbesondere aus den Bildern D7 und D10 ersichtlich ist, treten die Risse in der Klebstoffschicht nunmehr tendenziell in engeren Abständen von ca. 400 µm auf, verlaufen mehrfach auch schräg zur Faserlängsrichtung und klaffen i. d. R. deutlicher (rd. 20 µm) im Vergleich zu den Rissen derjenigen Proben, die mit Normalklimalagerung vorbehandelt wurden.

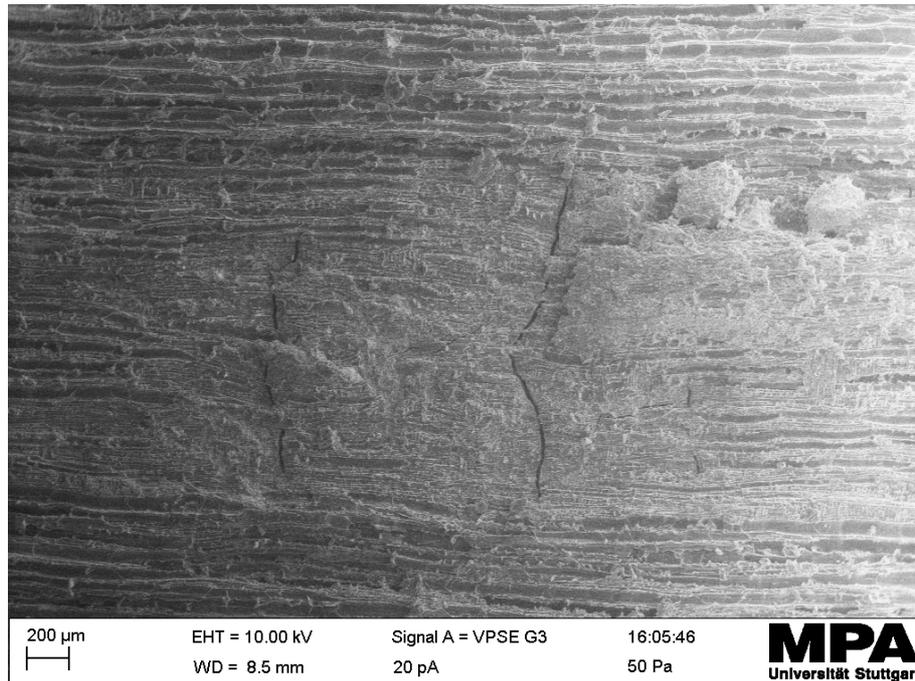


Bild 9.1 Ausschnitt der Scherfläche des Zugscherprüfkörpers UF3_01_A1_08-01; Klebstoffkonfiguration: UF3; Fugendicke: 0,1 mm; Vorbehandlung: A1; Probe Nr. 08; Vergrößerungsstufe: 01

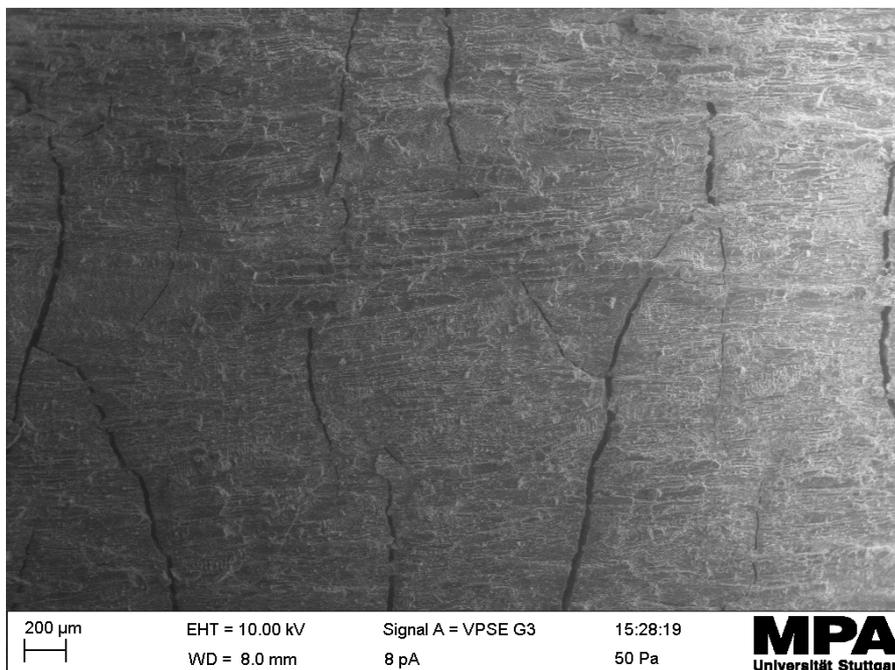


Bild 9.2 Ausschnitt der Scherfläche des Zugscherprüfkörpers UF3_01_A3_06-01; Klebstoffkonfiguration: UF3; Fugendicke: 0,1 mm; Vorbehandlung: A3; Probe Nr. 06; Vergrößerungsstufe: 01

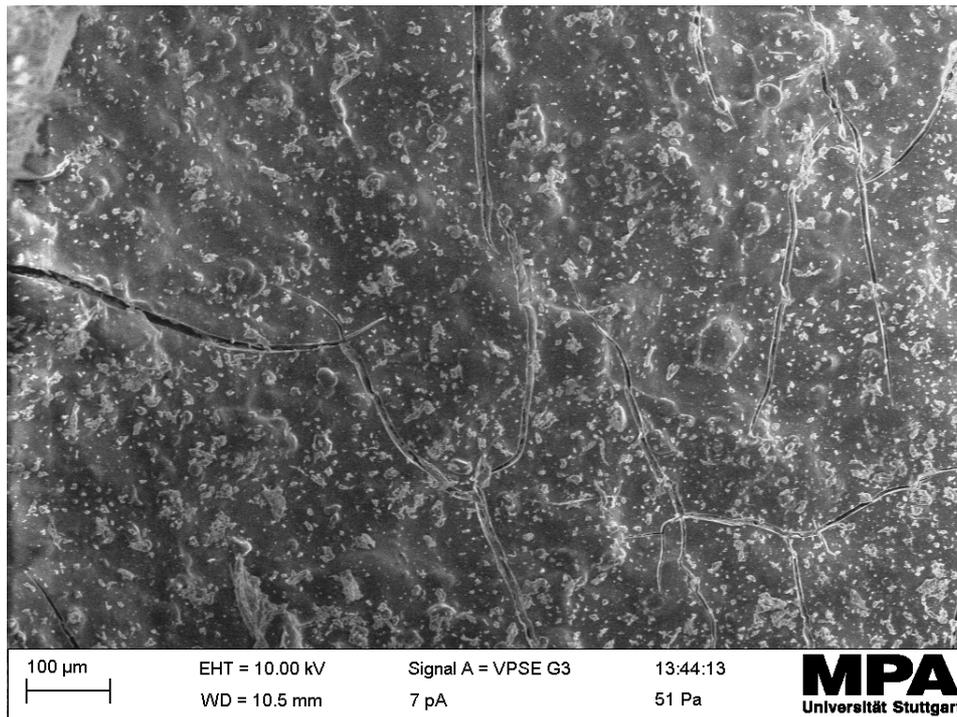


Bild 9.3 Ausschnitt der Scherfläche des Zugscherprüfkörpers UF5_1_A1_06-02; Klebstoffkonfiguration: UF5; Fugendicke: 0,1 mm; Vorbehandlung: A1; Probe Nr. 06; Vergrößerungsstufe: 02

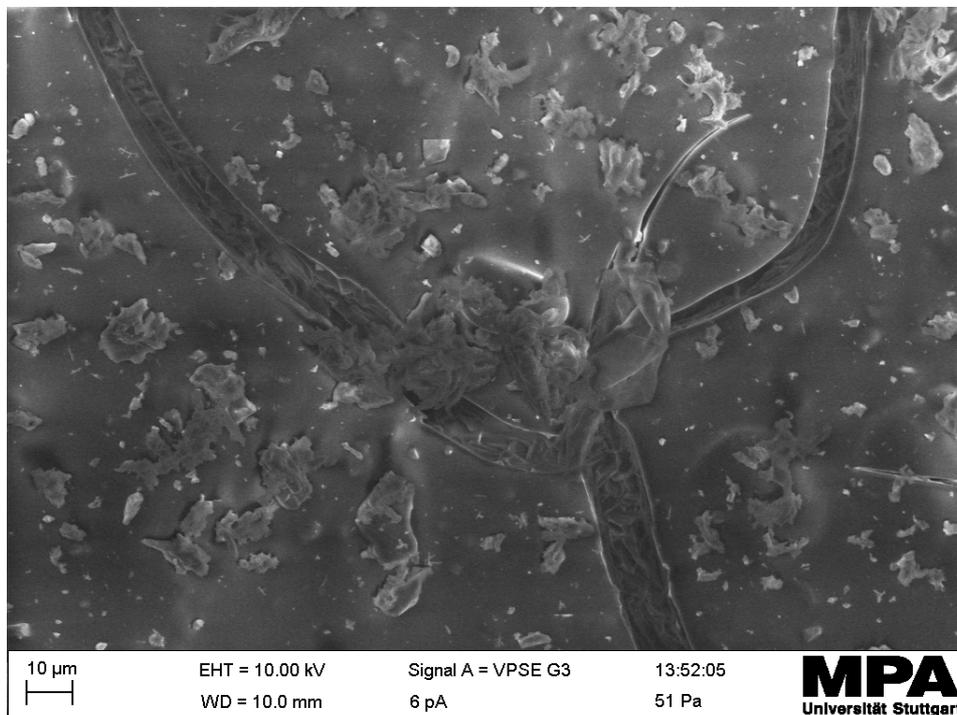


Bild 9.4 Ausschnitt der Scherfläche des Zugscherprüfkörpers UF5_1_A1_06-03; Klebstoffkonfiguration: UF5; Fugendicke: 0,1 mm; Vorbehandlung: A1; Probe Nr. 06; Vergrößerungsstufe: 03 (Detail aus Bild 9.3)

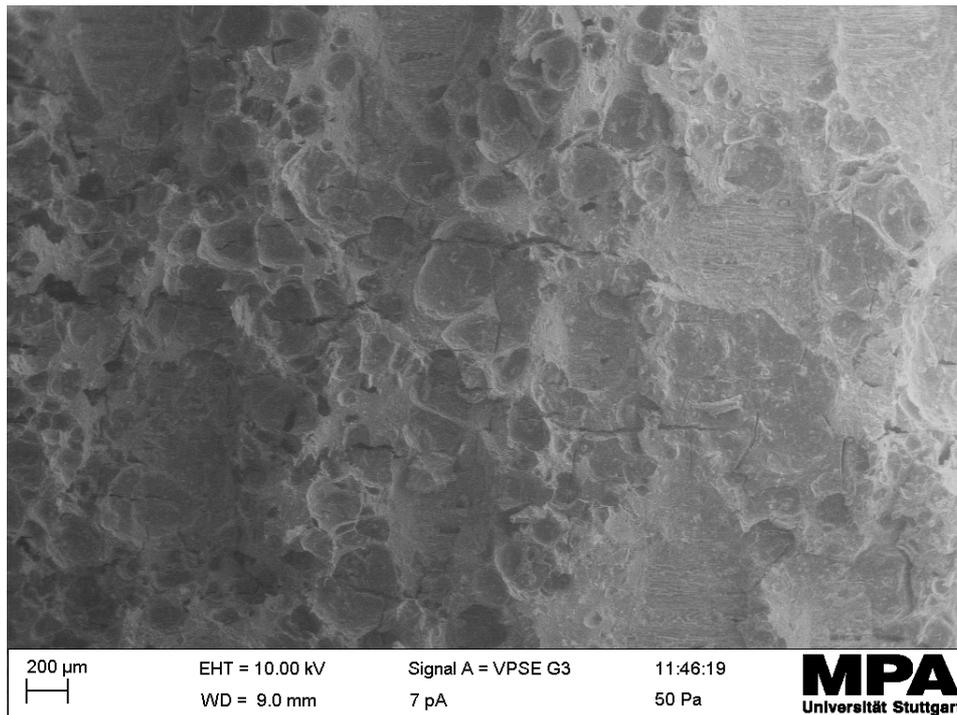


Bild 9.5 Ausschnitt der Scherfläche des Zugscherprüfkörpers UF6_1_A3_08-01; Klebstoffkonfiguration: UF6; Fugendicke: 0,1 mm; Vorbehandlung: A3; Probe Nr. 08; Vergrößerungsstufe: 01

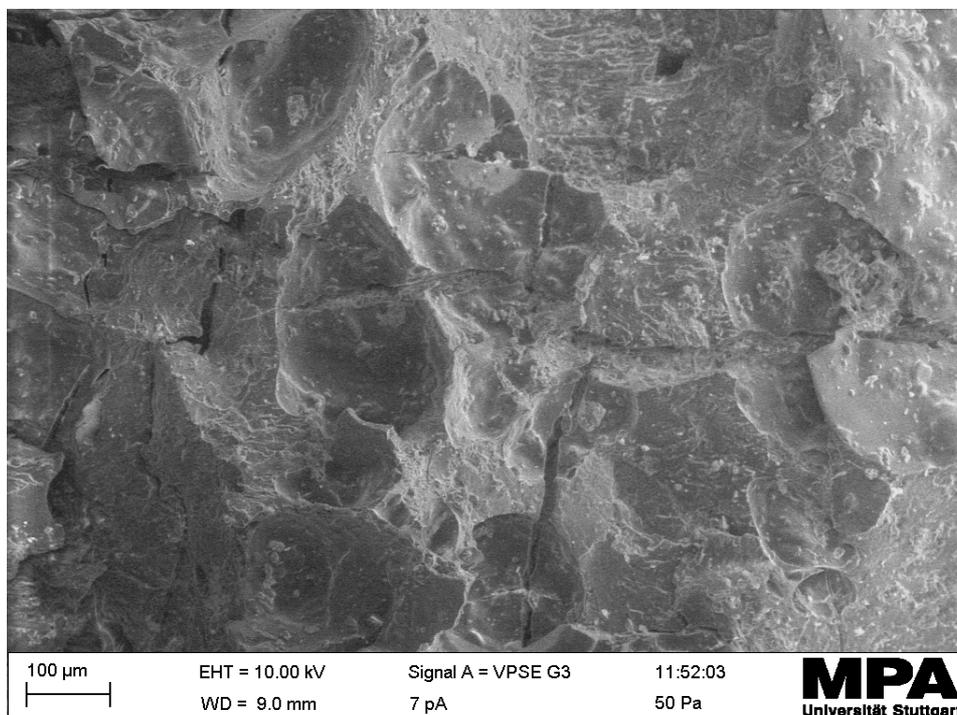


Bild 9.6 Ausschnitt der Scherfläche des Zugscherprüfkörpers UF6_1_A3_08-02; Klebstoffkonfiguration: UF6; Fugendicke: 0,1 mm; Vorbehandlung: A3; Probe Nr. 08; Vergrößerungsstufe: 02 (Detail aus Bild 9.5)

Im Vergleich zu den vorstehend diskutierten Bruchflächen der Klebstoffkonfiguration UF3 mit 0,1 mm dicker Fuge, weisen die Bruchoberflächen der nunmehr 1 mm dicken Fugen der Klebstoffkonfiguration UF5 ein wesentlich geändertes Aussehen auf. Dies gilt sowohl für die in den Bildern D13 bis D15, Anhang D, gezeigten Bruchflächen der Normalklima-gelagerten Proben, wie für die nach Kaltwasser-Lagerung (A2) geprüften Proben (Bilder D16 bis D18). Der Bruchflächenzustand nach Normalklimalagerung ist nachstehend auch in den Bildern 9.3 und 9.4 gezeigt. Man erkennt zum einen, dass auf den Bruchflächen nahezu kein Holzfaserbelag mehr vorliegt. Sofern vorhanden (Bild D13, Anhang D) ist der Belag lediglich flaumartig, eine Zellschicht dick und somit gemäß Definition der EN 302-2 (vgl. auch Abschnitt 10.2) nicht als Holzfaserbruchanteil im engeren Sinne zu werten.

Die in Tabelle 9.1 mit angegebenen Holzfaserbruchanteile gemäß Auswertung der Proben in den Zugscherversuchen (Abschnitt 8 und Anhang A) weisen übereinstimmend für die beiden Proben UF5_1_A1_06 und UF5_1_A2_01 Faserbruchanteile von lediglich 10 % bzw. 5 % auf. (Anmerkung: Bei den UF3-Proben mit 0,1 mm dicker Fuge betrug der Holzfaserbruchanteil durchweg 100 %). Von zentraler Bedeutung ist jedoch das gegenüber der 0,1 mm Fuge der UF3-Probenkonfiguration deutlich geänderte Rissmuster, welches nunmehr keine regelmäßigen Risse rechtwinklig zur Faserlängsrichtung aufweist, sondern durch schräge, sich überkreuzende und häufig sichelförmige Risse in einer monolithischen Klebstoffschicht charakterisiert ist (Bilder D14 und D15, Anhang D). Die Bruchoberfläche der nach Kaltwasserlagerung geprüften Probe A2_01, die in wesentlichen Bereichen in der Klebstoffschicht selbst gebrochen ist, hat ein kraterartiges, zerklüftetes Aussehen.

Betrachtet man nunmehr die Bruchflächen der Klebstoffkonfiguration UF6 (UF-Harz mit beigemischtem Füllstoff und Auftrag im Härter-Vorstrichverfahren), vgl. Bilder 9.5 und 9.6 sowie Bilder D19 bis D30, Anhang D, so sind gegenüber den beiden vorstehend diskutierten Klebstoffkonfigurationen UF3 und UF5, wiederum deutliche Änderungen festzustellen. Zunächst gilt, dass bei der 0,1 mm dicken Fuge noch ein geringfügiger Holzfaserbruchanteil vorliegt, während bei der 1 mm Fuge überhaupt kein Holzfaserbelag auftritt. Der Bruch ist unabhängig von der Vorbehandlungsart der Probe, als nahezu ausschließlicher Kohäsivbruch in der Klebstoffschicht zu bezeichnen. Vergleicht man die Bruchbilder der 0,1 mm dicken Fugen der Klebstoffkonfigurationen UF3 und UF6, jeweils für den Fall der Vorbehandlung A2 (Kaltwasserlagerung), d. h. die Bilder D4, D5 und D6, Anhang D, mit den Bildern D22, D23 und D24, Anhang D, so erkennt man bei der UF6–Probe die folgenden kennzeichnenden Merk-

male: a) den fehlenden Holzfaserbelag, b) das Fehlen des typischen Schrumpfrissmusters (Bilder D4 und D22, Anhang D) und c) eine mäßig zerklüftete Kohäsivbruchoberfläche.

Vergleicht man die Bruchoberflächen der 1 mm dicken UF6-Proben nach den Vorbehandlungen A1 (Bilder D19 bis D21, Anhang D), A2 (Bilder 25 bis D27, Anhang D) und A3 (Bilder D28 bis D30, Anhang D, bzw. Bilder 9.5 und 9.6), so erkennt man durchgängig Kohäsivbrüche in der Klebstoffschicht. Die Bruchflächen sind immer kraterartig zerklüftet und weisen teilweise in unregelmäßigem Muster Risse mit Klaffungen bis zu ca. 10 μm auf. Speziell bei der kaltwassergelagerten Probe UF6_1_A2_10, die eine extrem geringe Festigkeit von lediglich 0,97 N/mm² aufwies, sind die Kratermulden mit Durchmessern bis zu rd. 400 μm häufig sehr flach und völlig glatt, ohne erkennbare vormalige Bindung mit einer gegenüberliegenden Schicht.

Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen belegen in eindeutiger Weise die unterschiedliche Mikro- / Nano- Struktur der Klebfugen bzw. des Holz- Klebstoffinterfaces der verschiedenen betrachteten Klebstoffkonfigurationen. So wird einerseits die ausgeprägte Mikrorissbildung infolge schrumpfbedingter Eigenspannungen auch bei sehr dünnen Klebefugen verdeutlicht. Andererseits werden für die dicken Klebefugen der gestreckten Klebstoffe (UF5, UF6), insbesondere bei Verarbeitung nach dem Härter-Vorstrichverfahren, typische Kohäsivbruchflächentopologien evident, die aus unzureichender Vernetzung infolge innerer Oberflächen herrühren.

10 Blockscherversuche in Anlehnung an EN 392

10.1 Prüfkörperherstellung

Zur Durchführung der Blockscherprüfungen an den sechs Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 (vgl. Abschnitt 7, Tabelle 7.3) wurden insgesamt 12 kleinformatische Brettschichtholz(BSH)Träger, nachfolgend BSH-Kleinträger genannt, hergestellt. Aus denselben BSH-Kleinträgern wurden auch - in zahlenmäßig größerem Umfang - die Delaminierungsproben für die Prüfungen nach EN 302-2 entnommen. Da im europäischen Normenwerk für die gezielte Herstellung von Prüfträgern/ -querschnitten für Blockscherprüfungen keine detaillierten Prüfkörper-Herstellangaben existieren, wurden die BSH-Kleinträger in stringenter Entsprechung der Vorgaben der EN 302-2 hergestellt. Dies war umso mehr sinnhaft, da die Blockscherprüfungen mit den Delaminierungsprüfungen auf der Basis zugeordneter/vergleichbarer Prüfkörper in Bezug zu setzen waren.

Je Klebstoffkonfiguration (UF1 – UF6) wurden zwei, jeweils mit A und B bezeichnete BSH-Kleinträger mit Querschnittsabmessungen (Breite x Höhe) von 150 mm x 180 mm und einer Länge von 1100 mm hergestellt. (Anmerkung: Die Bezeichnungen A und B sind der jeweiligen Bezeichnung der Klebstoffkonfiguration nachgestellt, z. B. UF2A und UF2B). Der Querschnittsaufbau bestand jeweils aus sechs brettbreitseitig miteinander verklebten Fichtenholzlamellen mit einer einheitlichen Dicke von 30 mm. Das Rohmaß der Lamellen betrug 38 mm x 165 mm. Die Jahrringlagen waren durchweg normkonform.

Die Rohdichten und Holzfeuchten der Lamellen sind separat für die jeweiligen Klebstoffkonfigurationen und Prüfkörper in Tabelle 10.1 zusammengestellt. Die mittlere Rohdichte der Fichtenholzlamellen entsprach bei allen BSH-Kleinträgern, abgesehen von einer geringfügigen Ausnahme, den Vorgaben der EN 302-2 von 425 kg/m^3 . Die mittlere Rohdichte (\pm Standardabweichung) aller Lamellen betrug $436 \pm 8 \text{ kg/m}^3$. Bezüglich der normativ geforderten Minimal- und Maximalwerte der Rohdichten lagen tolerierbare Abweichungen vor, vgl. Tabelle 10.1.

Die bei den Verklebungen verwendeten Mischungsverhältnisse der Leimflotten bzw. der Stamm- und Härterlösungen sind in Tabelle 7.2 angegeben. Tabelle 8.1 beinhaltet eine Zusammenstellung der Zeitdauern wichtiger Verklebungsherstellstufen, d.h. die Zeiten für Leimansatz und Mischen, die Reifezeit der Leimflotten und die gesamten Wartezeiten. Die an mehreren Prüfkörpern, die mit unterschiedlichen Klebstoffkonfigurationen hergestellt waren,

mittels Lichtmikroskop ausgemessenen Fugendicken lagen im Bereich von 0,06 mm bis 0,1 mm.

Aus jedem Kleinträger wurden sechs Delaminierungsprüfkörper (siehe Abschnitt 11) sowie eine Querschnittsscheibe mit einer Dicke von 50 mm für die Blockscherprüfkörper entnommen. Die Delaminierungsprüfkörper und die Blockscher-Prüfkörperscheibe wurden von einem Trägerende beginnend aufeinanderfolgend abgeschnitten (vgl. Bild 10.1 a). Die Blockscher-Prüfkörperscheibe B lag hierbei immer rd. 350 mm von der ursprünglichen Trägerstirnfläche entfernt zwischen den Delaminierungsprüfkörpern Nr. 4 und Nr. 5.

Klebstoff-konfiguration	Prüfkörper-bezeichnung	Rohdichten ρ_{12}				Holzfeuchten u		
		x_{mean}	x_{min}	x_{max}	Δx_{max}	x_{mean}	x_{min}	x_{max}
-	-	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	%	%
UF1	UF1 A	435	397	468	71	13,1	12,7	13,5
	UF1 B	422	382	470	88	13,1	12,6	13,7
UF2	UF2 A	431	385	453	68	13,1	12,8	13,6
	UF2 B	430	388	475	87	13,5	13,2	16,3
UF3	UF3 A	444	421	471	50	13,2	12,9	13,5
	UF3 B	442	412	462	50	13,2	13	13,4
UF4	UF4 A	447	424	466	42	12	11,8	12,2
	UF4 B	438	405	447	42	12,1	11,9	12,3
UF5	UF5 A	429	371	471	100	12,6	11,1	13,5
	UF5 B	432	371	494	123	12,8	12,1	13,4
UF6	UF6 A	428	378	461	83	12,7	10,6	13,8
	UF6 B	436	369	499	130	12,8	11,6	13,7
UF1 - UF6	-	435 ± 8	369	499				
Anforderungen gemäß EN 302-2		425	400	450	50	12	11	13

Tabelle 10.1: Zusammenstellung der Rohdichten und Holzfeuchten (jeweils Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte) der Brettlamellen aller BSH-Kleinträger für die Blockscher- und Delaminierungsprüfkörper. Mit angegeben sind die Anforderungen / Richtwerte der EN 302-2.

Von den 150 mm breiten Blockscher-Prüfkörperscheiben wurden jeweils von den beiden Rändern der Querschnittsbreite her über die gesamte Querschnittshöhe $H = 180$ mm zwei 50 mm breite, mit I und II bezeichnete Prüfstäbe abgeschnitten. Jeder Prüfstab wies fünf Klebfugen 1 – 5 mit den nominellen Abmessungen von $b \times t = 50$ mm \times 50 mm auf (t = Prüfstabdicke in Faserlängsrichtung). Die Prüfstäbe wurden derart gekennzeichnet, dass die Klebfugen 1 – 5 jeweils der ursprünglichen gemeinsamen Klebfuge in der nicht aufgetrennten Querschnittsscheibe entsprachen, womit die Ergebnisse der Klebfugen 1 – 5 der Stäbe I und II, die vor der Prüfung unterschiedlichen Vorbehandlungen unterzogen wurden, direkt vergleichbar waren. Je Klebstoffkonfiguration lagen somit jeweils 2 Prüfstäbe I bzw. II aus den Trägern A und B vor. (Bezeichnung der Prüfstäbe, z. B. der Klebstoffkonfiguration UF3: UF3A-I, UF3A-II, UF3B-I, UF3B-II).

Die Prüfstäbe UF3A-I und UF3B-I (= Trockenprüfkörper) wurden vor der Prüfung im Normklima 20°C/65% rel. Luftfeuchte gelagert. Die Prüfstäbe UF3A-II und UF3B-II (= Nassprüfkörper) wurden vor der Prüfung 5 Tage untergetaucht in kaltem Wasser (rd. 20°C) gelagert. Je Klebstoffkonfiguration und Lagerungsart (Trocken- bzw. – Nasslagerung) lagen somit jeweils 10 Klebfugenscherflächen zur Prüfung vor.

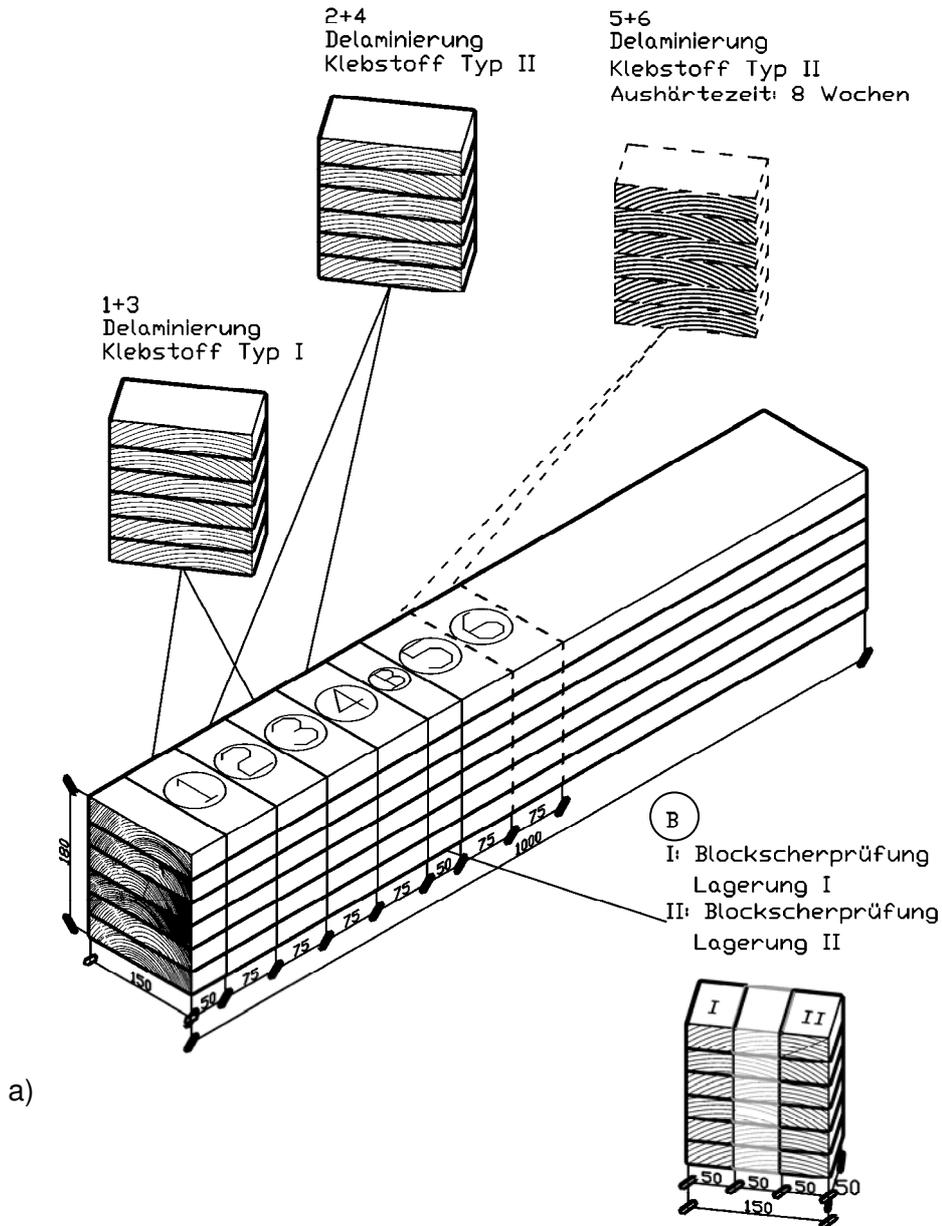


Bild 10.1 Schema der Herstellung und Auftrennung der Blockscherprüfkörper und der Delaminierungsprüfkörper ausgehend von BSH-Kleinträgern, die gemäß EN 302-2 mit den Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 hergestellt wurden.

- b) Auftrennschema der BSH-Kleinträger in Querschnittsscheiben für die Blockscher- und Delaminierungsprüfungen
- b) Auftrennschema der Blockscher-Prüfkörperscheiben in die jeweiligen Prüfstäbe I und II

10.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Versuchsdurchführung der Scherprüfungen erfolgte in enger Anlehnung an EN 392 in einer rechnergestützten elektromechanischen Prüfmaschine mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit des Prüfmaschinenquerhaupts. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 2 mm/min, womit die Höchstlast respektive das Prüfkörperversagen im Mittel nach 128 ± 11 sec erhalten wurde. Die Versuche mit den klimatisierten Prüfkörpern wurden in einem nicht klimatisierten, beheizten Prüfraum bei einer Raumtemperatur von rd. 20°C durchgeführt.

Unmittelbar nach dem Versuch wurde bei allen Prüfkörpern der Faserbruchanteil ausgewertet. Die Bestimmung ist weder in EN 392 noch in EN 386 geregelt, was zu erheblichen Fehlern und Fehlinterpretationen bei der Bewertung von sehr schwach ausgeprägtem, flaumartigen (Holz-)Faserbelag führen kann. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die an der MPA Universität Stuttgart übliche Definition/Vorgehensweise, die eng an die Bewertungen von Delaminierungen gemäß EN 391, Abschnitt 6.4.2, angelehnt ist, verwendet. Hiernach liegt ein effektiver Holzfaserverbruchanteil vor, wenn die an der Klebstoffuge anhaftende Holzschicht i.d.R. mindestens zwei Zellschichten dick ist. Das heißt, dass sehr feiner flaumartiger Faserbelag, der zudem nicht durch den Faserwinkel und die Struktur der Jahrringe beeinflusst wird, nicht als Holzfaserverbruchanteil im eigentlichen Sinne bewertet wird. (Anmerkung: Eine darartige Oberflächenstruktur wird nach EN 391 wie ein reiner Klebstoff-Kohäsions- und Interfacebruch ohne Flaumbelag als Delaminierung bewertet). Des Weiteren wurde die Holzfeuchte an jedem 5ten Prüfkörper mittels Darrverfahren gemessen. Die Berechnung der Scherfestigkeit jedes Prüfkörpers erfolgte gemäß EN 392 mittels der Beziehung

$$f_v = k \cdot \frac{F_u}{A} \quad (10.1)$$

mit

A Scherfläche

wobei

$A = b \cdot t$ Scherfläche eines Prüfstabs (aus einer BSH-Querschnittsscheibe)

oder

$A = \ell \cdot t$ Scherfläche eines Bohrkerns²¹

mit

b, ℓ Breite der Scherfläche des Prüfstabs bzw. Länge des Bohrkerns (Bohrkernabschnitts) rechtwinklig zur Lastrichtung

²¹ hier relevant für Abschnitt 15

t Länge der Scherfläche parallel zur Faser- und Lastrichtung
und
 $k = 0,78 + 0,0044 t$ Korrekturfaktor für die Scherfestigkeit des Prüfkörpers, sofern die
Länge t der Scherfläche in Faser- und Lastrichtung kleiner als 50 mm
ist (t in mm). (10.2)

10.3 Anforderungen an die Versuchsergebnisse

Die Bewertung der Scherfestigkeiten f_v und Faserbruchanteile FB erfolgte bei den trocken geprüften Versuchskörpern (Holzfeuchten im Bereich von 10,6 % - 12,7 %) in Bezug auf die Anforderungen an die Klebstofffugengüte und –festigkeit gemäß EN 386, Abschnitt 5.4. Zufolge EN 386 beträgt die Mindestanforderung des gekoppelten Scherfestigkeits- und Faserbruchkriteriums für jeden einzelnen Prüfkörper

$$f_{v,erf,min} = 4 \text{ N/mm}^2 \quad \text{und} \quad FB_{erf} = 100 \text{ \%}. \quad (10.3a,b)$$

Für Scherfestigkeitseinzelnwerte $4 \text{ N/mm}^2 < f_v < 6 \text{ N/mm}^2$ gilt sodann als mindest erforderlicher Faserbruchanteil ebenfalls $FB_{erf} = 100 \text{ \%}$. Für höhere Scherfestigkeitseinzelnwerte $f_v \geq 6 \text{ N/mm}^2$ sind bis zu einem Festigkeitsniveau von $f_v = 10 \text{ N/mm}^2$ geringere Faserbruchanteile FB_{erf} gemäß Gl. (10.5a) zulässig (vgl. auch Tabelle 10.2).

Für die Mittelwerte der Scherfestigkeit und des Faserbruchanteils eines Probekörpers mit mehreren Scherfugen (Querschnittsscheibe oder Prüfstab) gilt die Mindestanforderung

$$f_{v,mean,erf,min} = 6 \text{ N/mm}^2 \quad \text{und} \quad FB_{erf,mean} = 90 \text{ \%}. \quad (10.4a,b)$$

Für höhere Scherfestigkeitsmittelwerte $f_{v,mean} > 6 \text{ N/mm}^2$ sind bis zu $f_{v,mean} = 11 \text{ N/mm}^2$ geringere Faserbruchanteile $FB_{erf,mean}$ gemäß Gl. (10.5b) zulässig.

Zwischen den vorstehend genannten Scherfestigkeitsgrenzwerten gelten im Falle von Scherfestigkeitseinzeln- und Mittelwerten die folgenden linearen Scherfestigkeits-Faserbruchanteilsbeziehungen

$$\text{Einzelnwerte:} \quad FB_{erf} [\%] = 153,3 - 13,3 f_v [\text{N/mm}^2] \quad 6 < f_v [\text{N/mm}^2] \leq 10 \quad (10.5a)$$

$$\text{Durchschnittswerte:} \quad FB_{erf,mean} [\%] = 144 - 9 f_{v,mean} [\text{N/mm}^2] \quad 6 < f_{v,mean} [\text{N/mm}^2] \leq 11 \quad (10.5b)$$

Tabelle 10.2 gibt die Anforderungen in tabellarischer Form wieder.

	Einheit	Einzelwerte				Durchschnittswerte		
		$4 \leq f_v < 6$	6	$6 < f_v < 10$	$f_v \geq 10$	6	$6 < f_{v,mean} < 11$	$f_{v,mean} \geq 11$
Scherfestigkeit f_v bzw. $f_{v,mean}$	N/mm ²							
Mindestfaserbruchanteil FB_{erf} bzw. $FB_{erf,mean}$	%	100	74	gemäß Gl. (10.5a)	20	90	gemäß Gl. (10.5b)	45

Tabelle 10.2: Mindestfaserbruchanteile bei Scherfestigkeitseinzel- und Durchschnittswerten in Abhängigkeit vom Einzel- bzw. Durchschnittswert der (Trocken-) Scherfestigkeit gemäß EN 386

Für die nass gelagerten und nass geprüften Proben sind in der Literatur keine direkt auf Blockscherprüfkörper aus Fichtenholz anwendbare Anforderungen zu finden.

Ein realistischer Anhaltswert für einen Anforderungswert an die mittlere Nass-Scherfestigkeit lässt sich jedoch aus den Anforderungen der EN 301 an die Ergebnisse von trocken (A1) bzw. nass (A2) geprüften Längszugscherprüfkörpern aus **Buchenholz** ableiten. Zuzufolge EN 301, Abschnitt 5.2, beträgt der Anforderungswert an die mittlere Nass-Scherfestigkeit abhängig von der Klebfugendicke (0,1 mm bzw. 1,0 mm) 6 N/mm² bzw. 4 N/mm², was 60 % bzw. 50 % der Anforderungswerte bei der Trockenprüfung entspricht. In diesem Sinne wird für die Blockscherprüfkörper, die eine Fugendicke von rd. 0,1 mm aufweisen, eine Reduzierung der Nassfestigkeiten gegenüber den zugeordneten Trockenfestigkeiten auf rd. 60 % der Trockenwerte als vertretbarer Anhaltswert erachtet.

Unter Berücksichtigung des bekannten Sachverhalts, dass im Falle von Nassfestigkeitsprüfungen die Versuchsstreuungen von Blockscherprüfungen im allgemeinen deutlich niedriger als im Falle von Trockenprüfungen ausfallen, sollte die genannte Nassfestigkeitsabminderung für die Bestimmung eines Mindestanforderungswertes an die Einzel- und Durchschnittswerte bei Nassprüfung im Falle von Einzelwerten auf den Trockenscherfestigkeitswert 6 N/mm² und im Falle von Durchschnittswerten auf 7 N/mm² bezogen werden. Hiermit ergeben sich die Mindestanforderungswerte an die Nass-Blockscherfestigkeiten zu

$$f_{v,nass,erf} = 3,6 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{für Einzelwerte})$$

$$f_{v,nass,erf} = 4,2 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{für Durchschnittswerte}) \quad (10.6a,b)$$

Anforderungen an den Faserbruchanteil bei den nass geprüften Blockscherproben sind weder in der Literatur noch in Normen zu finden. Es ist jedoch bekannt, dass bei nass geprüften Verklebungsproben der Faserbruchanteil im Vergleich zu trocken geprüften Proben im Allgemeinen deutlich höher liegt und geringere Streuungen aufweist.

10.4 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Die Einzelwerte der Versuchsergebnisse der Klebstoffkonfigurationen UF1 bis UF6 sind für die trocken geprüften Proben (Lagerung I, Normalklima) in Tabelle B1, Anhang B1, zusammengestellt. Mit angegeben sind die nach EN 386 für die jeweiligen Scherfestigkeiten erforderlichen Faserbruchanteile. Die Ergebnisse der nass geprüften Proben (Lagerung II, 5tägige Kaltwasserlagerung) sind in Tabelle B2, Anhang B2, zusammengestellt.

Die Tabellen B3 bis B8, Anhänge B3 bis B8, beinhalten getrennt für jede Klebstoffkonfiguration (UF1 – UF6) eine Zusammenfassung aller Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten sowie die Verhältniswerte der jeweils zugeordneten Nass- und Trockenscherfestigkeiten. Die Tabellen B9 bis B14, Anhänge B9 bis B14, enthalten Auswertungen der Faserbruchanteile. Die Bilder B1 bis B48, Anhänge B15 bis B38, zeigen Bruchbilder der Klebefugen 1 und 2 (von insgesamt jeweils 5 Klebefugen) aller Verklebungs(UF1 bis UF5)- und Lagerungs(I und II)-Konfigurationen. (Anmerkung: die Gesamtheit der fotografischen Dokumentation aller Bruchflächen (jeweils zusätzlich die Fugen 3 bis 5) liegt bei der Forschungsstelle vor und kann auf Nachfrage erhalten werden).

Die Tabelle 10.3 beinhaltet für die sechs untersuchten Klebstoffkonfigurationen UF1 bis UF6 eine komprimierte Darstellung der Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten sowie der Verhältniswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten. Angegeben sind je Klebstoffkonfiguration die Mittelwerte, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten und die Minimalwerte der genannten Größen. Tabelle 10.4 beinhaltet in analoger Weise eine komprimierte Darstellung der Faserbruchergebnisse.

Prüfkörper- zustand/ Vorbehand- lung	statistischer Kennwert	Scherfestigkeiten (in N/mm ²) bzw. Scherfestigkeitsverhältnis [-]							
		UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	\sum UF1 – UF5	\sum UF1 – UF6
trocken	Mittelwert	7,22	8,11	8,34	8,61	7,80	8,20	8,01	8,04 (8,21) ¹⁾
	Standardabweichung	0,74	0,62	0,61	0,36	0,83	0,66	0,80	0,77
	Variationskoeffizient [%]	10,3	7,7	7,3	4,2	10,7	8,0	10,0	9,6
	Minimalwert	6,11	7,21	7,73	7,95	6,10	7,25	6,10	6,10
nass	Mittelwert	4,30	4,48	4,53	4,58	4,26	4,06	4,43	4,37
	Standardabweichung	0,33	0,35	0,21	0,13	0,38	0,35	0,31	0,35
	Variationskoeffizient [%]	7,8	7,9	4,7	2,8	9,0	8,7	7,9	7,9
	Minimalwert	3,68	3,98	4,34	4,38	3,78	3,47	3,68	3,47
Verhältnis Nasswerte zu Trocken- werten	Mittelwert	0,60	0,55	0,55	0,53	0,55	0,50	0,56	0,54
	Standardabweichung	0,04	0,04	0,03	0,02	0,07	0,07	0,05	0,06
	Variationskoeffizient [%]	7,4	7,4	5,4	4,2	12,2	13,4	8,7	10,2
	Minimalwert	0,54	0,49	0,49	0,50	0,45	0,44	0,45	0,44

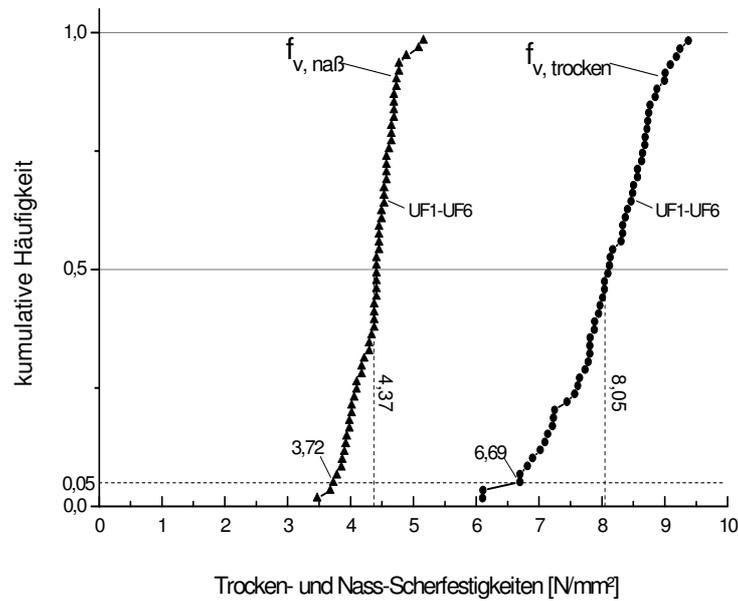
¹⁾ UF2 – UF6

Tabelle 10.3: Zusammenfassung der Scherfestigkeitsergebnisse (Mittelwerte, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten und Minimalwerte) der Blockscherversuche nach EN 391 an sechs unterschiedlichen Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6. Mit angegeben sind die Verhältniswerte der Nassscherfestigkeiten bezüglich der Trockenscherfestigkeit sowie Auswertungen für die zusammengefassten Kollektive UF1 – UF5 sowie UF1 – UF6.

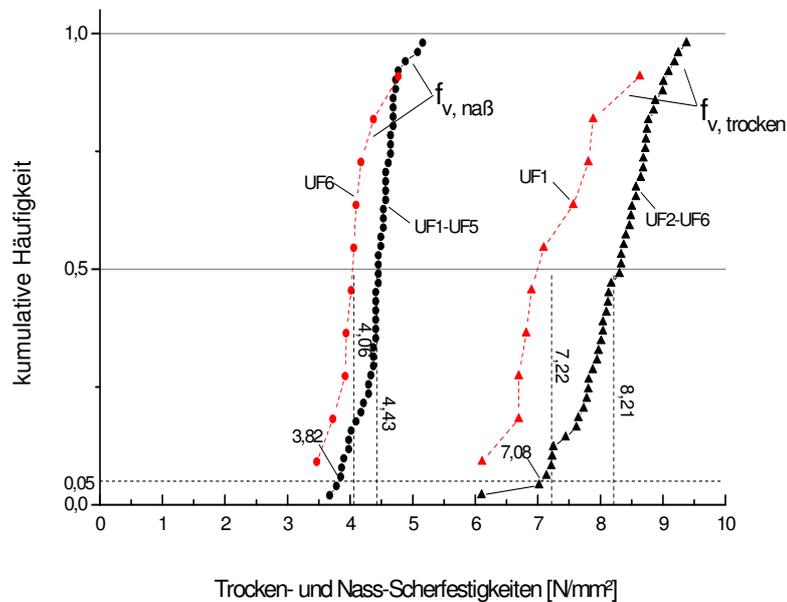
Prüfkörper- zustand/ Vorbehand- lung	statistischer Kennwert	Faserbruchanteile (in %) bzw. Faserbruchanteilsverhältniswerte							
		UF1	UF2	UF3	UF4	UF5	UF6	Σ UF1 – UF5	Σ UF1 – UF6
trocken	Mittel- wert	65	79	78	81	84	96	77	80 (84) ¹
	Standardab- weichung	20	23	14	19	21	10	20	20
	Variations- koeffizient [%]	30	29	18	24	25	10	25	25
	Minimal- wert	40	30	60	50	40	70	30	30
nass	Mittel- wert	91	98	89	95	90	79	93	90
	Standardab- weichung	11	4	7	5	14	20	9,4	13
	Variations- koeffizient [%]	12	4	8	6	16	26	10	14
	Minimal- wert	70	90	80	90	60	40	60	40
Verhältnis Nasswerte zu Trocken- werten	Mittel- wert	1,40	1,24	1,14	1,17	1,07	0,82	1,20	1,13
	Standardab- weichung	0,48	0,75	0,23	0,42	0,49	0,27	0,47	0,65
	Variations- koeffizient [%]	31	52	20	33	41	32	39	57
	Minimal- wert	1,75	3,00	1,33	1,80	1,50	0,57	2,06	1,33

¹⁾ UF2 – UF6

Tabelle 10.4: Zusammenfassung der Faserbruchanteile (Mittelwerte, Standardabweichungen, Variationskoeffizienten und Minimalwerte) der Blockscherversuche nach EN 391 an sechs unterschiedlichen Klebstoffkonfigurationen (UF1 – UF6). Mit angegeben sind die Verhältnisswerte der Faserbruchanteile der nass geprüften Proben bezüglich der trocken geprüften Proben. Des Weiteren sind Auswertungen für die zusammengefassten Kollektive UF1 – UF5 sowie UF1 – UF6 angegeben.



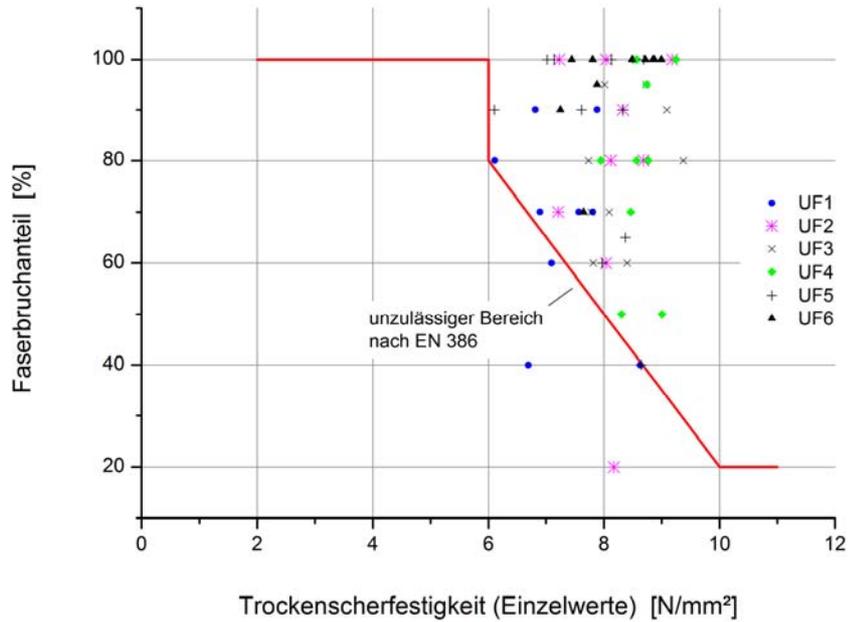
a)



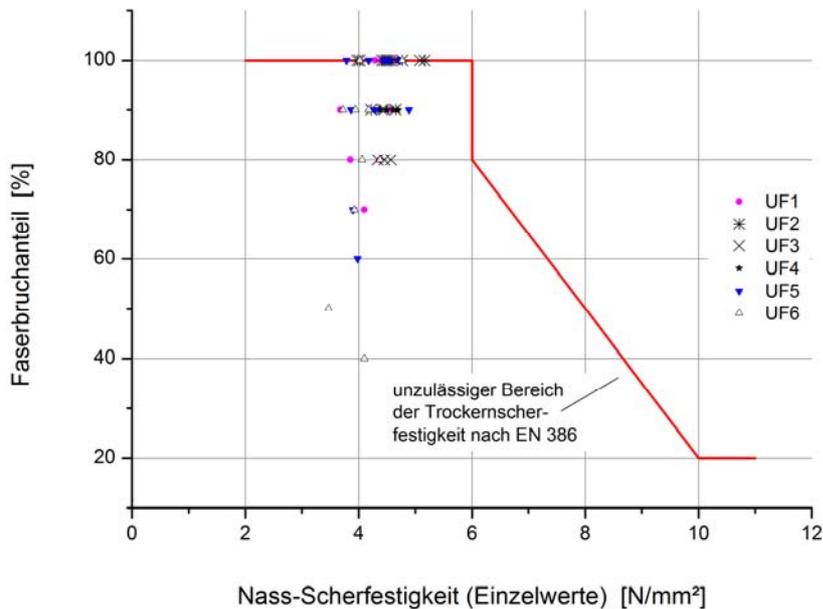
b)

Bild 10.2a,b: Kumulative Verteilungen der Scherfestigkeiten der Blockscherversuche an trockenen und kaltwassergelagerten Prüfkörpern, hergestellt mit sechs unterschiedlichen Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6

- a) alle trocken bzw. nass geprüften Prüfkörper der Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 zu jeweils einem Trocken- bzw. Nass-Kollektiv zusammengefasst
- b) Trockenscherfestigkeiten der Konfigurationen/Kollektive UF1 bzw. UF2 – UF6 sowie Nass-Scherfestigkeiten der Konfigurationen/Kollektive UF6 bzw. UF1 – UF5



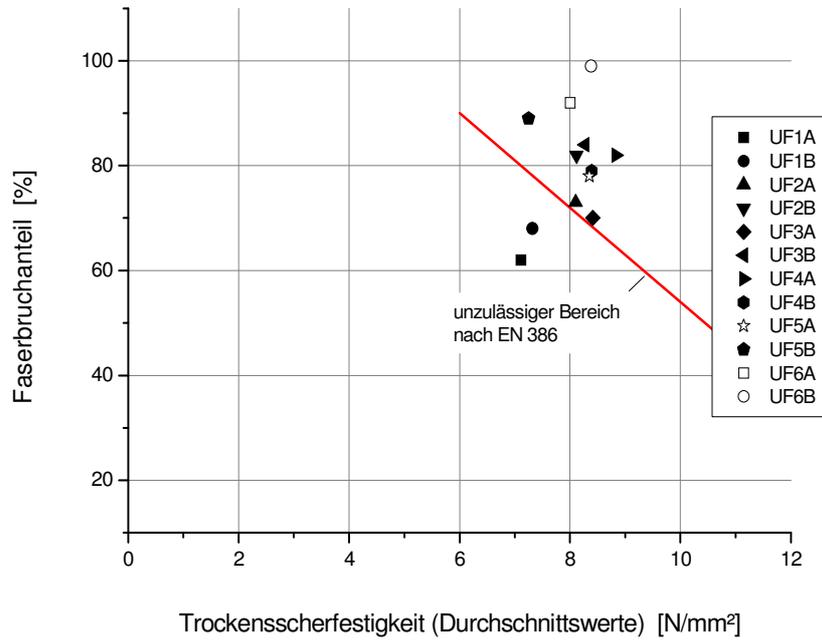
a)



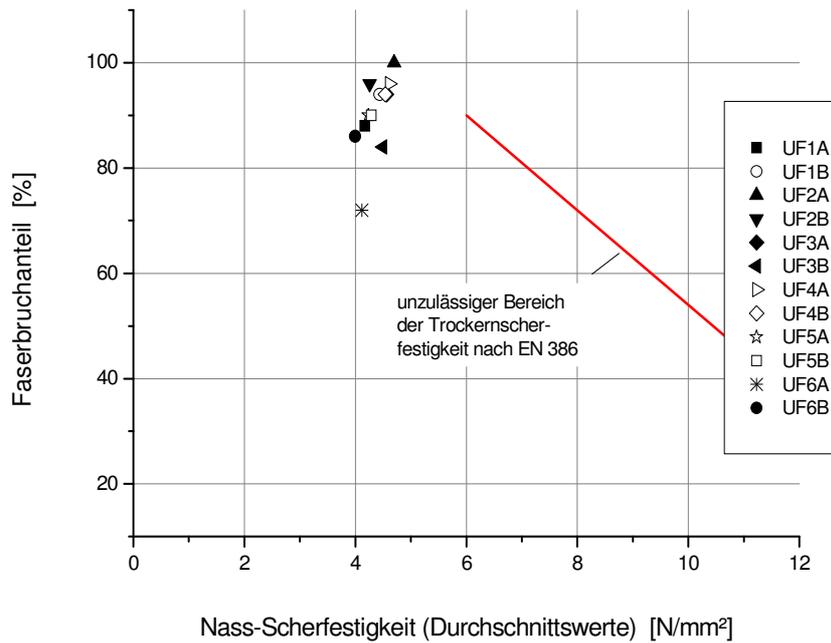
b)

Bild 10.3a,b: Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Scherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Einzelprüfkörper der Blockscherprüfungen nach EN 392 mit den Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 nach unterschiedlichen Prüfkörperlagerungen. Mit angegeben sind die Anforderungswerte an die Trockenscherfestigkeit gemäß EN 386.

- a) Trockenscherfestigkeit (Lagerung in 20%/65% rel. LF)
- b) Nass-Scherfestigkeit (4tägige Kaltwasserlagerung)



a)



b)

Bild 10.4a,b: Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den mittleren Scherfestigkeits- und Faserbruchanteilen der Blockscherprüfungen nach EN 392 mit den Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 nach unterschiedlichen Prüfkörperlagerungen.

- a) Trockenscherfestigkeit (Lagerung in 20%/65% rel. LF)
- b) Nass-Scherfestigkeit (4tägige Kaltwasserlagerung)

Die Bilder 10.2a,b veranschaulichen die erhaltenen Blockscherfestigkeits-Ergebnisse (Einzelwerte) graphisch. Bild 10.2a zeigt die kumulativen Scherfestigkeitsverteilungen aller trocken und nass geprüften Prüfkörper der Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6, wobei alle trocken geprüften Versuchskörper zu einem Trocken-Kollektiv zusammengefasst wurden. Analog sind die nass geprüften Prüfkörper in einem Nass-Kollektiv repräsentiert. In der kumulativen Häufigkeitsdarstellung des Bildes 10.2b sind bei den Trockenscherfestigkeiten die Klebstoffkonfiguration UF1 sowie das zusammengefasste Kollektiv UF2 – UF6 getrennt angegeben (siehe nachfolgend). Bei den Nass-Scherfestigkeiten sind sodann die Ergebnisse der Klebstoffkonfiguration UF6 und des zusammengefassten Kollektivs UF1 – UF5 getrennt angegeben.

Die Bilder 10.3a,b geben getrennt für die trocken (a) bzw. nass (b) geprüften Proben die Scherfestigkeits-Faserbruchanteil-Zusammenhänge aller Einzelprüfkörper wieder. In beiden Bildern ist die kombinierte Scherfestigkeits-Faserbruchsanforderung der EN 386 an trocken geprüfte Proben mit angegeben. In vergleichbarer Weise zeigen die Bilder 10.4a,b die Scherfestigkeits-Faserbruchsanteilsbeziehungen für die Durchschnittswerte jeder Klebstoffkonfiguration. Die Durchschnittswerte sind hierbei getrennt für die jeweils beiden Träger A und B einer Klebstoffkonfiguration angegeben. Mit eingezeichnet ist die mittelwertsbezogene Anforderungsgrenze an die Trockenscherfestigkeits-Faserbruchbeziehung gemäß EN 386.

10.5 Diskussion der Versuchsergebnisse

10.5.1 Trockene Prüfkörper (Lagerung I)

Bei allen Klebstoffkonfigurationen lagen die Scherfestigkeitseinzelwerte über 6 N/mm^2 , d. h. die Festigkeits-Mindestanforderungen von 4 N/mm^2 wurden deutlich erfüllt.

Bezüglich der Höhe der Trockenscherfestigkeiten und der Streuungsmaße der Scherfestigkeiten liegen bei den Klebstoffkonfigurationen UF2 – UF6 weitgehend vergleichbare Werte vor ($7,8 \leq f_{v,\text{mean}} [\text{N/mm}^2] \leq 8,6$). Im Gegensatz dazu liegt das mittlere Festigkeitsniveau der Konfiguration UF1 mit $f_{v,\text{mean}} = 7,2 \text{ N/mm}^2$ merklich unterhalb desjenigen der Konfigurationen UF2 – UF6.

Dieser Sachverhalt geht auch anschaulich aus dem Vergleich der kumulativen $f_{v,\text{Trocken}}$ -Verteilungen in Bild 10.2b hervor.

Der Faserbruchanteil lag im Mittel aller Klebstoffkonfigurationen bei 80 %; die Minimalwerte innerhalb der einzelnen Konfigurationen variierten im Bereich von 30 % bis 70 %. Wie bei den Scherfestigkeiten, so liegen auch die Faserbruchanteile der Konfiguration UF1 im Mittel deutlich unter (-23 %) den Werten der Konfigurationen UF2 – UF6.

Mit Bezug auf das kombinierte Scherfestigkeits-Faserbruchkriterium wurden die Anforderungen an die Einzelwerte überwiegend ($55/58 = 95 \%$) und hierbei im Allgemeinen deutlich erfüllt. Eine Ausnahme stellt die Klebstoffkonfiguration UF1 dar, bei der zwei Scherfestigkeits-Faserbruch-Dupel die Anforderungen deutlich nicht erfüllten und drei weitere f_v – FB-Dupel die Einzelwertanforderungen soeben erfüllten (vgl. Bild 10.3a)

Die genannten Einzelwert-Sachverhalte führen sodann bei Betrachtung der f_v - FB-Durchschnittswerte je Klebstoffkonfiguration (getrennt für beide Träger A und B jeder Klebstoffkonfiguration) dazu, dass alle Konfigurationen UF2 (UF2A und UF2B) bis UF6 (UF6A und UF6B) die Anforderungen an die Durchschnittswerte überwiegend deutlich erfüllten (Ausnahmen UF2A und UF3A), während beide UF1-Kollektive (UF1A und UF2B) die Anforderungen an die Durchschnittswerte nicht erfüllten.

In qualitativer, nicht stringent an die normativen Vorgaben angelegter Bewertung sind die Versuchsergebnisse der Klebstoffkonfigurationen UF2 bis UF6 als gut und die Ergebnisse der Konfiguration UF1 als soeben noch ausreichend zu bewerten.

Nasse Prüfkörper (Lagerung II), Nass-Trocken-Scherfestigkeitsverhältnis

Wie aus den Werten der Tabelle 10.2 und den kumulativen Scherfestigkeitsverteilungen in den Bildern 10.2a,b ersichtlich, lagen die Nass-Scherfestigkeiten erwartungsgemäß durchweg wesentlich unter den Trockenscherfestigkeiten. Die Mittelwerte der Nass-Scherfestigkeiten der einzelnen Konfigurationen variierten von $4,1 \text{ N/mm}^2$ bis $4,6 \text{ N/mm}^2$ und die Minimalwerte streuten innerhalb der Versuchskollektive UF1 bis UF6 von $3,5 \text{ N/mm}^2$ bis $4,4 \text{ N/mm}^2$. Alle Einzel- und Mittelwerte der Verklebungskonfigurationen UF1 – UF5 erfüllten die in den Gleichungen (10.6 a, b) definierten Mindestanforderungen. Im Gegensatz hierzu lagen die Ergebnisse der Konfiguration UF6 unter den Anforderungen (vgl. nachfolgend).

Das Verhältnis von Nass- zu Trockenscherfestigkeit beträgt im Mittel aller Klebstoffkonfigurationen 0,54 und auf dem Niveau der 5 %-Quantilwerte ergibt sich ein nahezu übereinstimmender Verhältniswert von 0,56. Die bei den Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF5 erhaltenen

mittleren Nass-Trocken-Verhältnisse variierten mit Werten von 0,53 bis 0,6 im erwartungsgemäßen Bereich (bzgl. UF6, siehe nachfolgend).

Der Faserbruchanteil der Nass-Scherproben lag im Mittel aller Klebstoffkonfigurationen bei 90 % und damit um rd. 13 % über dem Faserbruch-Mittelwert der Trockenscherfestigkeitsproben (vgl. Tabelle 10.4). Das Verhältnis von Nass- zu Trockenfaserbruchanteilen der jeweils einander zugeordneten Einzelwerte beträgt 1,26.

Betrachtet man die Unterschiede zwischen den einzelnen Klebstoffkonfigurationen im Detail, so ist festzustellen, dass die Konfiguration UF6 bei allen Nasswerten (Festigkeiten und Faserbruchanteile) vergleichsweise deutlich von den Konfigurationen UF1 – UF5 abweicht. Dies deckt sich mit den Feststellungen aus den in Abschnitt 8 mitgeteilten Längszugscherprüfungen. Für die Blockscherfestigkeiten ist dieser Sachverhalt in Bild 10.2b anhand der kumulativen Festigkeitsverteilungen der Versuchsgruppe UF6 im Vergleich zu dem zusammengefassten Kollektiv UF1 – UF5 gezeigt. Auf dem Niveau der Mittelwerte und der 5%-Quantilwerte liegt die UF6 – Nassscherfestigkeit einheitlich um rd. 8 % unter dem Niveau des zusammengefassten UF1 – UF5 - Kollektivs. Gut vergleichbar liegt das mittlere Verhältnis von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten der UF6-Konfiguration mit 0,50 um rd. 9 % unter dem mittleren Wert von 0,56 des UF1 – UF5 - Kollektivs.

Am deutlichsten wird das bereits bei dünner Klebefuge vorliegende Nassverklebungsdefizit der Konfiguration UF6 bei Betrachtung der Faserbruchanteile offensichtlich und hier speziell bei dem Vergleich der Verhältniswerte der Faserbruchanteile von Nass- zu Trockenprüfung:

- Bei jeder der Verklebungskonfigurationen UF1 bis UF5 liegt der mittlere Quotient des Faserbruchanteils von Nass- zu Trockenprüfung unterschiedlich ausgeprägt im Bereich von 1,07 bis 1,40, d. h. über 1,0 und beträgt im Mittel 1,20.
- Im Gegensatz dazu liegt das Verhältnis $FB_{\text{nass,mean}}/FB_{\text{trocken,mean}}$ bei der Konfiguration UF6 mit 0,82 deutlich unter Eins, d. h. der Faserbruchanteil der nass geprüften Proben war im Mittel und bei 70 % der Einzelproben (vgl. Tabellen B1 und B2, Anhänge B1 und B2) kleiner als bei den trocken geprüften Fugen. Dieser Sachverhalt weicht wesentlich von den vorstehend angeführten Erfahrungen zum Faserbruchanteil bei Nassverklebungen ab, der auch bei anderen Klebstofffamilien überwiegend höher ist, als bei trocken geprüften Klebefugen.

11 Delaminierungsversuche nach EN 302-2

11.1 Prüfkörperherstellung und Versuchsdurchführung

Die Prüfkörperherstellung, d. h. im Speziellen die Herstellung der BSH-Kleinträger für die Entnahme der Delaminierungsprüfkörper ist ausführlich in Abschnitt 10 im Zusammenhang mit der Herstellung der Blockscherprüfkörper ausgeführt. Die Durchführung der Delaminierungsversuche mit den Verfahren mit niedriger Temperatur (Klebstofftyp II) bzw. mit hoher Temperatur (Klebstofftyp I) sowie die Versuchsauswertung erfolgte jeweils in stringenter Anwendung der Vorgaben der EN 302-2. Die Bewertung der Versuchsergebnisse erfolgte nach den Vorgaben der EN 301 für die Klebstofftypen I und II.

11.2 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Die Einzelwerte der Versuchsergebnisse der Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 sind in den Tabellen C1 bis C3, Anhang C1 bis C3, angegeben.

Die Tabelle 11.1 beinhaltet eine komprimierte Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse aller Delaminierungsversuche. Bild 11.1 und die Bilder 11.2a,b veranschaulichen die experimentellen Resultate graphisch und beinhalten auch die Anforderungswerte gemäß EN 301 an den Gesamtprozentsatz der Delaminierung abhängig vom Behandlungsverfahren. Die Bilder C1 bis C60, Anhang C4 bis C33, zeigen die beiden Hirnholzflächen ausgewählter Prüfkörper nach dem Delaminierungsversuch mit den kenntlich gemachten Delaminierungen (= Fugenöffnungen).

11.3 Diskussion der Versuchsergebnisse

11.3.1 Verfahren mit niedriger Temperatur (Klebstofftyp II)

Die Delaminierungsversuche mit niedriger (Rücktrocknung-)Temperatur (30°C) zum Nachweis des Klebstofftyps II ergaben für alle sechs Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 Ergebnisse, die dem Anforderungswert (Maximalwert) der EN 301 genügten. Mit Ausnahme der Klebstoffkonfiguration UF6 wurde der Anforderungswert durchweg sehr deutlich erfüllt.

Die Klebstoffkonfigurationen UF1 bis UF5 wiesen bei den einzelnen Proben Gesamtprozentsätze der Delaminierung von 0% bis maximal 1,5 % auf, die damit wesentlich unter dem

normativ zulässigen Maximalwert von 10 % lagen. Die Mittelwerte der Delaminierung aller vier Proben jeder Klebstoffkonfiguration UF1 – UF5 lagen im Bereich von 0,4 % bis 0,9 %.

Im Gegensatz zu den Versuchsergebnissen der Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF5 waren die Delaminierungsergebnisse der Klebstoffkonfiguration UF6 mit Einzelwerten von 0,5 % bis 8,6 % und einem Mittelwert von 4,6 % deutlich höher. Dieser deutliche Unterschied zwischen der Klebstoffkonfiguration UF6 und den meisten anderen Klebstoffkonfigurationen (ausgenommen UF5) zeigte sich sodann in verstärkter Weise bei den Ergebnissen der Delaminierungsversuche mit hoher Rücktrocknungstemperatur von 60 °C.

Klebstoffkonfiguration	Gesamtprozentsatz der Delaminierung (in %) bei Behandlung mit niedriger Temperatur (Klebstofftyp II) einwöchige Probenaushärtung		Anforderungswert ¹⁾ (in %) der EN 301 betreffend den Klebstofftyp II	Gesamtprozentsatz der Delaminierung bei Behandlung mit hoher Temperatur (Klebstofftyp I)				Anforderungswert ¹⁾ (in %) der DIN 301 betreffend den Klebstofftyp I
	Maximalwert	Mittelwert		einwöchige Probenaushärtung		achtwöchige Probenaushärtung		
				Maximalwert	Mittelwert	Maximalwert	Mittelwert	
UF1	0,7	0,4	10	6,7	3,3	3,5	2,1	5
UF2	0,7	0,4		0,6	0,4	--	--	
UF3	1,5	0,8		2,1	1,3	--	--	
UF4	1,4	0,9		3,1	1,8	--	--	
UF5	0,7	0,4		8,3	6,9	4	2	
UF6	8,6	4,6		14,4	9,2	10,3	6,5	

¹⁾ maximal zulässiger Wert

Tabelle 11.1 Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse (Maximalwerte und Mittelwerte des Gesamtprozentsatzes der Delaminierung) der Delaminierungsversuche gemäß EN 302-2 (Verfahren/Behandlung mit hoher und niedriger Temperatur) an sechs unterschiedlichen UF-Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6 (vier Prüfkörper je Klebstoff- und Behandlungskonfiguration)

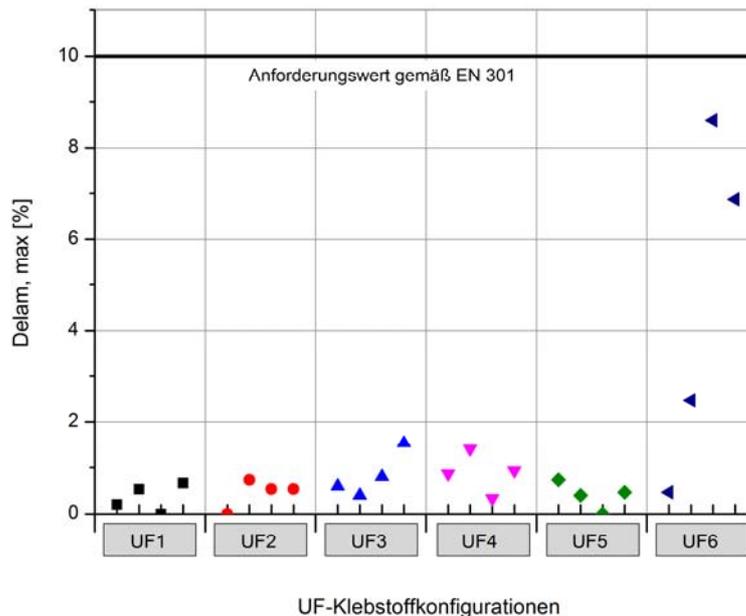


Bild 11.1 Graphische Darstellung der Ergebnisse der Delaminierungsuntersuchungen gemäß EN 302-2 zum Nachweis des Klebstofftyps II (= Behandlungszyklus mit niedriger Temperatur) an sechs unterschiedlichen UF-Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6

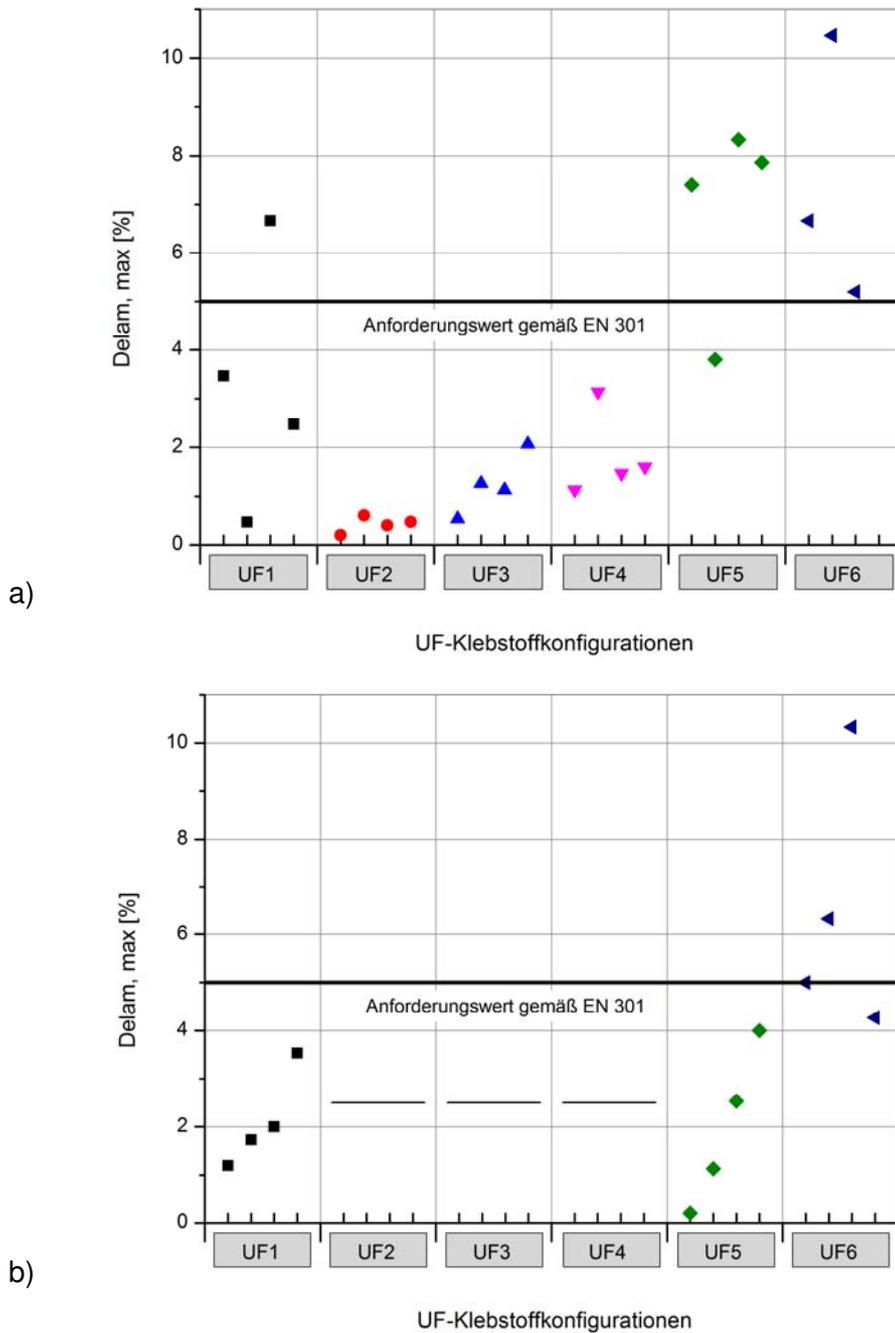


Bild 11.2a,b: Graphische Darstellung der Ergebnisse der Delaminierungsuntersuchungen gemäß EN 302-2 zum Nachweis des Klebstofftyps I (Behandlungszyklus mit hoher Temperatur) an sechs unterschiedlichen UF-Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF6.

- a) Versuche nach einem Aushärtezeitraum von 7 Tagen im Klima 20°C/65% rel. LF gemäß EN 302-2
- b) Versuche nach 8 Wochen Lagerung/Aushärtung im Klima 20°C/65% rel. LF

11.3.2 Verfahren mit hoher Temperatur (Klebstofftyp I)

11.3.2.1 Aushärtung gemäß EN 302-2

Betrachtet man zunächst die Versuchsergebnisse der Proben mit einwöchiger Aushärtezeit (Bild 11.2 a) so ist – eher unerwartet – festzustellen, dass die Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3 und UF4 den Anforderungswert der EN 301 an den Gesamtprozentsatz der Delaminierung für den Klebstofftyp I durchweg deutlich und im Falle der Konfiguration UF2 sehr deutlich erfüllten. Die Mittelwerte des Gesamtprozentsatzes der Delaminierung wiesen bei den Konfigurationen UF2, UF3 und UF4 Werte von 0,4 %, 1,3 % und 1,8 % auf.

Vergleichbar mit den Klebstoffkonfigurationen UF2, UF3 und UF4 sind auch die Delaminierungs-Ergebnisse der Klebstoffkonfiguration UF1 vor dem Hintergrund der im Allgemeinen für einen Klebstoff mit Typ II-Eignungsprofil als zu anfordernd erachteten Delaminierungsprüfung/Behandlung mit hoher Temperatur als sehr gut zu bewerten. Im Einzelnen genügten hier drei Prüfkörper den Anforderungen und ein Prüfkörper lag mit einem Delaminierungsprozentsatz von 6,7 % vergleichsweise gering über dem Anforderungsniveau an den Gesamtprozentsatz der Delaminierung von 5% (vgl. Tabelle C2, Anhang C2). Der mittlere Delaminierungsprozentsatz der Klebstoffkonfiguration UF1 betrug 3,3 %.

Im Gegensatz zu den Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF4 lagen die Delaminierungsergebnisse der Konfigurationen UF5 und UF6 weit überwiegend (UF5) bzw. durchgängig (UF6) deutlich über dem Anforderungsniveau. Im Falle der Klebstoffkonfiguration UF5 variierten die Einzelwerte der Delaminierung (jeweils Gesamtprozentsatz der Delaminierung) von 3,8 % bis 8,3 %; vgl. auch Tabelle C2, Anhang C2. Der Mittelwert betrug 6,9%. Bei der Klebstoffkonfiguration UF6 lagen die Delaminierungswerte im Bereich von 5,2 % bis 14,4 % und betragen im Mittel 9,2 %.

11.3.2.2 Achtwöchige Aushärtung im Klima 20 °C/65 % rel. LF

Die Delaminierungsversuche nach 8wöchiger Prüfkörperlagerung bzw. –aushärtung wurden ausschließlich mit den drei Konfigurationen UF1, UF5 und UF6, die bei den Versuchen mit einwöchiger Lagerung am ungünstigsten abgeschnitten hatten, durchgeführt. Hierbei zeigte sich bei allen untersuchten Klebstoffkonfigurationen ein deutlicher Nachhärte-/Vergütungseffekt der Klebstofffuge, der aus der längeren Aushärtezeit und der längeren Relaxationszeit der Klebfugen-Eigenspannungen resultiert.

Bei allen drei Klebstoffkonfigurationen reduzierten sich die Maximal- und Mittelwerte der Delaminierung deutlich, vgl. Tabelle 11.1, wobei nunmehr auch die Konfigurationen UF1 und UF5 die EN 301-Normanforderungen an den Gesamtprozentsatz der Delaminierung für den Klebstofftyp I erfüllten. Ungeachtet der gegenüber einwöchiger Probenaushärtung teilweise deutlich reduzierten Delaminierungswerte lagen bei der Klebstoffkonfiguration UF6 weiterhin zwei Ergebnisse, in einem Fall sehr deutlich, oberhalb des Anforderungswertes.

11.4 Schlussfolgerungen

Die an unterschiedlichen UF-Klebstoffkonfigurationen durchgeführten Delaminierungsversuche mit hoher und niedriger Rücktrocknungstemperatur gemäß EN 302-2, die normativ (EN 301) neben den Längszugscherprüfungen nach 302-1 zum Nachweis des Klebstofftyps I oder II dienen, zeigten, dass alle untersuchten Klebstoffkonfigurationen den Anforderungen an den Klebstofftyp II genügen. Hierbei wies jedoch die Konfiguration UF6 wesentlich ungünstigere Ergebnisse auf, als die übrigen Klebstoffkonfigurationen UF1 – UF5.

Die Versuche mit hoher Rücktrocknungstemperatur (60 °C) zeigten – eher unerwartet – dass drei UF-Klebstoffkonfigurationen mit (sehr) guten Delaminierungsergebnissen im Rahmen vollständig normgemäßer Versuche (d. h. hier: einwöchige Aushärtungszeit) die Anforderungen an den Klebstofftyp I erfüllten. Bei verlängerter Aushärtezeit (acht Wochen) erfüllten fünf der sechs untersuchten UF-Klebstoffkonfigurationen (UF1 bis UF5) die normativen Klebstofftyp I - Anforderungen.

Die Klebstoffkonfiguration UF6 zeigte bei allen drei Delaminierungs-Versuchsserien (hohe Rücktrocknungstemperatur mit ein- und achtwöchiger Aushärtungszeit sowie niedrige Rücktrocknungstemperatur mit einwöchiger Aushärtungszeit) jeweils die mit deutlichem Abstand ungünstigsten Ergebnisse. Der Vergleich der Versuchsergebnisse der Konfiguration UF6 speziell mit UF5, sowie mit den Konfigurationen UF1 bis UF4 belegt eindeutig, dass UF-Verklebungen, die nach dem früher häufig üblichen sogenannten Härter-Vorstrichverfahren durchgeführt werden, bei unterschiedlichen Delaminierungsverfahren wesentlich ungünstigere Ergebnisse im Vergleich zu Verklebungen mit untermischter Klebstoffflotte liefern.

Diese Schlussfolgerung bezüglich der Nachteiligkeit des Vorstrichverfahrens geht unmittelbar aus dem Vergleich der Delaminierungsergebnisse der Klebstoffkonfigurationen U5 und U6 hervor. In beiden Fällen gelangte derselbe Klebstoff (gleiche Härter-, Füllstofftypen sowie -mengen) zum Einsatz, wobei im Rahmen der Konfiguration UF5 der Klebstoffauftrag im Untermischverfahren und bei der Konfiguration UF6 im Vorstrichverfahren erfolgte. (Anmer-

kung: Der Vergleich der Konfiguration UF6 mit den Konfigurationen UF1 bis UF4 belegt zwar die deutliche Nachteiligkeit der Konfiguration UF6, ist jedoch kein hinreichender Beleg für die Nachteiligkeit des Vorstrichverfahrens; dies resultiert erst aus dem Vergleich der Konfigurationen UF5 und UF6).

Die durchgeführten Delaminierungsversuche belegen des Weiteren am Beispiel der Konfiguration UF5 im Vergleich zu den Konfigurationen UF1 – UF4, dass ein spezieller Klebstoff durchaus gute Niedrigtemperatur-Delaminierungsergebnisse erbringen kann, dass jedoch andererseits das Hochtemperatur-Delaminierungsverhalten hierdurch keinesfalls kausal festgelegt ist.

12 Recherchen zu relevanten Harnstoffharz-verklebten Bauwerken, Datenbank

12.1 Auswertung der Leimgenehmigungsakten

Eine vollständige Sichtung der an der MPA Universität Stuttgart vorliegenden Leimgenehmigungsakten erbrachte rd. 1200 Bauwerke, bei denen neben Bauort, Baujahr und erstem Verwendungszweck teilweise auch das statische System, die Trägerform und -größe und das im speziellen eingesetzte Harnstoffharzfabrikat bekannt ist. Bezüglich der Erfassung und Erfassungsmerkmale der relevanten Bauwerke, siehe Abschn. 12.3.

12.2 Recherchen bei Holzleimbaubetrieben, in Institutsgutachten und Veröffentlichungen

Gezielte Recherchen bei Holzleimbaubetrieben und hierbei insbesondere bei Mitgliedsfirmen der Studiengemeinschaft Holzleimbau, e. V., erbrachten rd. 230 Bauwerke. Aus Institutsgutachten wurden rd. 260 Bauwerke ermittelt, die Auswertung von Veröffentlichungen ergab lediglich rd. 10 eindeutig UF-verklebte Bauwerke.

12.3 Erstellung einer Gebäude-/Bauteildatenbank

Es wurde eine umfassende Datenbank mit dem Microsoft Datenbanksystem Access erstellt, in der alle rd. 1700 Bauwerke mit harnstoffharzverklebten Bauteilen, im wesentlichen Brett-schichtholz, mit einer fortlaufenden Bauwerkskennzahl nach insgesamt 10 kennzeichnenden Merkmalen (=Rubriken) erfasst wurden. Die Datenbank enthält die nachstehend aufgeführten Rubriken I – X, die teilweise in Untergruppen (siehe Tabellen 12.1 und 12.2) gegliedert sind:

- I Bauherr
- II Standort
- III Nutzung
- IV Baujahr
- V Hersteller
- VI Statisches System (mit Untergruppen 1 – 9)
- VII Trägerbauweise (mit Untergruppen 1 – 8)

- VIII Trägerform (mit Untergruppen 1 – 6)
- IX Binderhöhe
- X Harnstoff (UF-)Klebstofffabrikat (mit Untergruppen 1 – 20)

In Tabelle 12.1 sind die Untergruppen der Rubriken VI, VII und VIII aufgeführt; die Untergruppen der Rubrik X „Harnstoff (UF-) Klebstofffabrikat“ sind in Tabelle 12.2 benannt.

Untergruppen Nr.	Rubriken		
	VI Statisches System	VII Trägerbauweise	VIII Trägerform
1	Einfeldträger	Hetzerträger	Parallelträger
2	Ein- / Mehrfeldträger	Kämpfstegträger	Bogenträger
3	Rahmen	BSH-Vollwand	Satteldachträger
4	Dreigelenkrahen	Wolfstegträger	Trapezbinder
5	Kragarmträger	Trigonit	Fischbauchträger
6	Durchlaufträger	Stegbinder (z.B. Wellstegträger)	Dreiecksbinder
7	Räumliches Tragwerk	Fachwerkträger	-
8	Gerberträger	DSB-Träger	-
9	Bogen	-	-

Tabelle 12.1: Untergruppen der Datenbank-Rubriken VI, VII und VIII

Untergruppen Nr.	Klebstoffbezeichnung	Untergruppen Nr.	Klebstoffbezeichnung
1	Kaurit 270/70	11	Kaurit WHF/70
2	Kaurit 270	12	Kaurit WHK220
3	Kaurit 220	13	Kaurit-Leim W 234
4	Harnstoffharz (=kein Fabrikat bekannt)	14	Kaurit 270/70/331
5	Kaurit WKH	15	Aerolite FFD
6	Kaurit	16	Kaurit W
7	Kaurit 234	17	UF/RJ
8	Aerolite	18	Kaurit WHK 270
9	Aerolite 306	19	W-Leim
10	Kaurit 220/70	20	W-Leim 62

Tabelle 12.2: Untergruppen der Datenbank-Rubrik X

Bezüglich der Rubrik X „Harnstoff (UF-) Klebstofffabrikat“ ist anzumerken, dass es sich hierbei im Sinne des vorliegenden Forschungsvorhabens zur Sicherheit von UF-Harz-verklebten Bauteilen/Gebäuden um ein Kriterium handelt, innerhalb dessen in Untergruppen nach un-

terschiedlichen UF-Klebstofftypen differenziert wird. Grundsätzlich ist die Datenbank jedoch so angelegt, dass die Klebstofffamilie – Harnstoffharze – bereits eine Untergruppe neben anderen Klebstofffamilien – z. B. Phenol-Resorcin(PRF-)harze, Melamin-Harnstoff(MUF-)harze sowie Einkomponenten- PU-Klebstoffe – darstellt. In späteren Vergleichen von „Klebstoff-Auswirkungen“ können somit auch Produkte unterschiedlicher Klebstofffamilien bewertet werden. Die Untergruppen – PRF-Harze, MUF-Harze, PU-Klebstoffe – werden außerhalb des Rahmens des Forschungsprojektes gepflegt. So enthält z. B. die Untergruppe PRF-Harze bislang 820 Bauwerke, die nach den gleichen Datenbank-Kriterien wie die UF-verklebten Bauwerke analysiert werden können.

Die skizzierte Datenbank wurde zu Beginn des Forschungsvorhabens im Rahmen einer Diplomarbeit erstellt, d. h. zu einem Zeitpunkt, da die Bedeutung einiger Parameter noch nicht in der Weise evident war, wie sie sich im weiteren Verlauf des Vorhabens herausstellten. So wurden z.B. die beiden wichtigen Parameter „Klebstoffauftrag“ mit den Untergruppen – Untermischverfahren bzw. Auftrag im Vorstrichverfahren – sowie „Füllstofffabrikat“ ursprünglich nicht als Rubriken eingeführt. Entsprechend der im Verlauf der Untersuchungen erkannten Bedeutung dieser Parameter wird die Datenbank im Rahmen einer Fortschreibung des Forschungsvorhabens dahingehend erweitert. Im Anhang Z-1 bis Z-32 sind alle Datenbankeinträge zu Bauwerken mit harnstoffharzverleimten Trägern aufgeführt.

Die Datenbank kann datenbanküblich nach allen Rubriken, Untergruppen sowie nach beliebigen diskreten Namen / Werten innerhalb der Kriterien gegliedert bzw. durchsucht werden. So können z. B. aus allen erfassten Bauwerken diejenigen ermittelt werden, die vor 1960 mit dem Klebstoff Kaurit WHK verleimt wurden, hierbei z.B. eine gekrümmte Trägerkonstruktion, eine Spannweite von über 20 m aufweisen und als Versammlungsraum (Turnhalle / Schwimmbad / Kirche) konzipiert waren.

Die Auswertungen der Datenbank lieferten u. a. die folgenden Ergebnisse:

- Anzahl und Summenhäufigkeit der erfassten UF-verklebten Bauwerke in Abhängigkeit vom Baujahr. Bild 12.1 zeigt die zeitliche Entwicklung der (Summen-)Häufigkeit aller erfassten rd. 1700 UF-verklebten Bauvorhaben.
- Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen UF-Klebstofffabrikate. Bild 12.2 zeigt die Verteilung der 20 erfassten UF-Klebstofffabrikate innerhalb der Gesamtmenge der

Bauwerke im Erstellungszeitraum vom Jahr 1952 bis zum Jahr 2006. Im genannten Zeitraum wurde am häufigsten das Klebstofffabrikat Kaurit WHK eingesetzt.

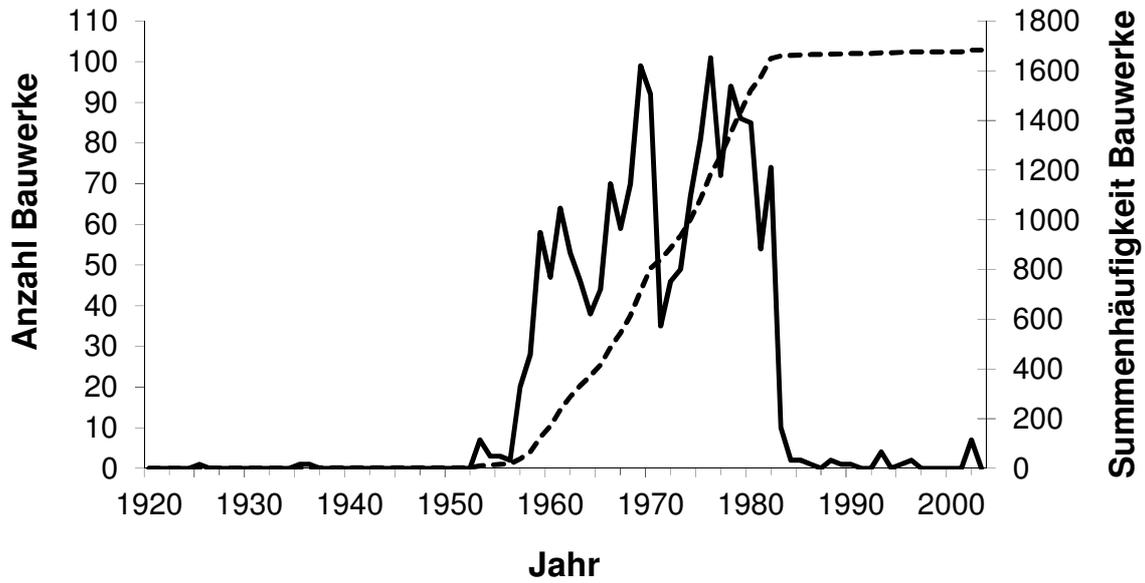


Bild 12.1 Anzahl und Summenhäufigkeit der erfassten Harnstoffharz-verklebten Bauwerke über den Zeitraum von 1925 - 2002

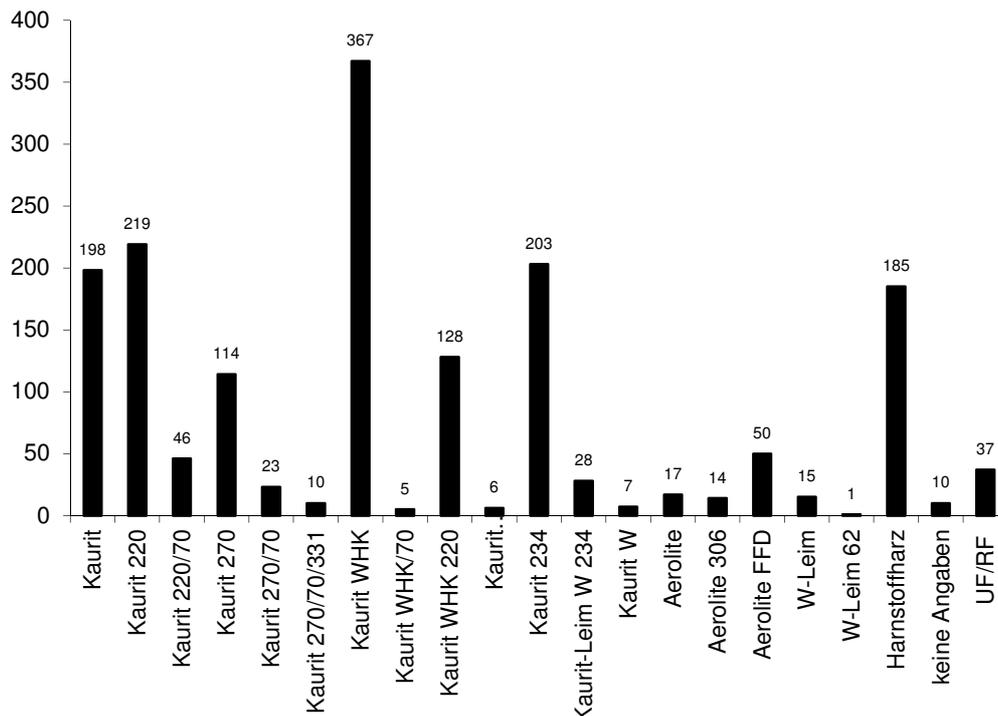


Bild 12.2 Anzahl der Bauwerke je erfassten UF-Klebstoff-Untergruppentyps

13 Auswahl der begutachteten Bauwerke

13.1 Allgemeines

Die Festlegung der prioritär zu begutachtenden Bauwerke erfolgte nach einer Reihe nachstehend genannter Kriterien:

1. Bauwerksalter – überwiegend hohe Bauwerksalter (rd. 30 – 50 Jahre) und zu Vergleichszwecken auch einige Gebäude mit mittlerem bzw. jüngerem Bauwerksalter von rd. 10 – 20 Jahren bzw. von rd. 3 – 10 Jahren.
2. Bauteilgröße – überwiegend große Bauteile mit Querschnittsabmessungen von i.d.R. mindestens 120 x 500 mm und Trägerlängen > 10 m.
3. (Klima-)Nutzungsklassen – Nutzungsklassen 1 und 2 und sofern möglich Nutzungsklasse 3

Die wesentlichsten einschränkenden Randbedingungen bei der Auswahl der Gebäude insbesondere mit größerem Bauwerksalter bestanden in den folgenden Punkten:

1. Ist das Gebäude noch vorhanden?
2. Wie kann der heutige Inhaber/Besitzer bzw. Nutzer kontaktiert werden?
3. Ist der Inhaber mit der Begutachtung und ggf. mit Probenahmen einverstanden?
4. Ist die Begutachtung/Probenahme technisch mit vertretbarem Aufwand möglich (z. B. mit Hubarbeitsbühne oder Rollgerüst ohne Behinderung durch ggf. abgehängte Decken).

Neben den Forschungsvorhaben-bezogenen Zielsetzungen stand die Auswahl der begutachteten Bauwerke teilweise im Zusammenhang mit Zustandsbewertungen der Konstruktionen aus gegebenem Anlass. Die anlassbezogenen Begutachtungen resultieren:

- i) aus der Umsetzung der Gebäuderichtlinie (N.N. 2006) resultierend aus dem Tragwerkseinsturz in Bad Reichenhall,
- ii) beabsichtigten Nutzungsänderungen bzw. Umbauten oder in Verbindung mit akuten bzw. vermuteten Schadensfällen.

Anmerkung: Bei einigen Bauwerken werden infolge z. T. laufender Gerichts-Verfahren oder auf Wunsch des Gebäudeinhabers keine detaillierten Angaben zum Standort mitgeteilt.

Insgesamt wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens 68 Bauwerke mit 680 Harnstoffharz-verklebten Brettschichtholz-Bauteilen sowie Kämpf- oder Wolff-Stegträgern begutachtet, davon die überwiegende Anzahl eingehend handnah mit Rissaufnahmen und mit Bohrkernentnahmen. Des Weiteren wurden in die Auswertungen sieben Gebäudebegutachtungen von externen Prüfern/Gutachtern einbezogen. Die begutachteten Gebäude befanden sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen überwiegend in klimatischen Verwendungsbereichen, die den Nutzungsklassen 1 und 2 entsprachen. In sehr wenigen Fällen waren die Bauwerke respektive deren Bauteile der Nutzungsklasse 3 zuzuordnen. Das Alter der Bauwerke lag im Bereich von 5 bis 81 Jahren. In der abschließenden Auswertung insbesondere der Scherfestigkeitsergebnisse werden die untersuchten Bauwerke zwei Gebäudealtersgruppen G₂₀ und G₄₅ mit mittleren Bauwerksaltern von 23 bzw. 46 Jahren zugeordnet. Die untersuchten Bauwerke mit BSH-Vollwandträgern wurden abhängig von der Untersuchungsvorgeschichte (siehe nachfolgend) und abhängig davon, ob die Bohrkern nach Trocken-, Nass- und Wiedertrocknungslagerung geprüft wurden, vier Gebäudegruppen mit den Bezeichnungen KF, B, C und D zugeordnet. Die Gebäudegruppe E umfasst vier Bauwerke mit Kämpf-Trägern bzw. Kastenträger mit Kämpf- oder Wolff-Stegplatten.

13.2 Gebäudegruppe KF (BSH-Vollwandträger)

Im Rahmen der Gebäudeauswahl spielten die in der Untersuchung von Kolb und Frech (1977) erstmalig begutachteten UF-verklebten BSH-Bauwerke, aus denen seinerzeit umfangreiche Proben entnommen wurden, eine wichtige Rolle (vgl. Abschn. 6.4). Die Gesamtheit der Gebäude die im Jahr 1977 erstmalig von Kolb und Frech untersucht wurden, wird nachfolgend als Gebäudegruppe KF bezeichnet. Die besondere Bedeutung dieser Gebäudegruppe besteht darin, dass in der Literatur keine anderweitigen Bauwerke zu eruieren waren, bei denen vergleichbar umfangreiche und belastbare experimentelle Untersuchungen zur Scherfestigkeit von UF-Klebefugen nach unterschiedlichen Vorbehandlungen (Trockenlagerung (= Normalklimalagerung), Nasslagerung sowie Feucht-Trocken-Wechsel Lagerung) durchgeführt worden sind. Die in der genannten Forschungsarbeit untersuchten Gebäude wiesen Herstellungsjahre von 1956 – 1969 auf und hatten somit zum Zeitpunkt der erstmaligen Begutachtung und Proben -Entnahmen bzw. -Prüfungen im Jahr 1977 Bauwerksalter von 8 bis 21 Jahren. Es war daher naheliegend von höchstem Interesse, festzustellen, ob und in welchem Umfang sich der Zustand der BSH-Bauteile und speziell deren Klebfugenfestigkeiten und -beständigkeiten 31 Jahre nach den Erstuntersuchungen bei nunmehrigen absoluten Bauwerkslebensaltern von 39 bis 52 Jahren verändert haben.

Mittels Quellenrecherchen konnten aus der Gesamtheit der neun bei Kolb und Frech (1977) anonymisiert genannten Bauwerke A bis I, vgl. Tabelle 13.1, sechs Bauwerke als noch existent ermittelt werden. Bei allen Bauwerken erklärten die Inhaber ihr Einverständnis für neuerliche Bauwerksbegutachtungen einschließlich Probenahmen. Alle sechs Gebäude A = 1627, B = 1619, C = 1681, D = 1682, F = 1630 und I = 1631 wurden im Laufe der Jahre 2008 und 2009 eingehend begutachtet und es wurden umfangreiche Probenahmen durchgeführt.

Das Bauwerksalter der sechs neuerlich untersuchten „Kolb und Frech“-Gebäude (Gebäudegruppe KF im engeren Sinne) betrug bei den „alten“ Untersuchungen im Jahr 1977 im Mittel 16 Jahre (minimal 13 Jahre und maximal 19 Jahre). Im Vergleich dazu variierten die Lebensalter der Bauwerke bei den „neuen“ Untersuchungen in den Jahren 2008/2009 von 44 bis 51 Jahren und lagen im Mittel bei 47 Jahren.

Detaillierte Angaben zu den Bauwerken finden sich in den Gebäudedatenblättern in den Anhängen X und Y.

Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr./Bezeichnung		Herstelljahr	Alter des Bauwerks		Ort	Art des Bauwerks	klimatische Bedingungen	Nutzungs-kategorie nach DIN 1052	Verwendetes Klebstoff-fabrikat	mittlerer Holzfeuchtegehalt in % bei der Probenahme	
	lfd. Nr. in Forschungs-datenbank	Bezeichnung bei Kolb und Frech (1977)		im Jahr 1977	im Jahr 2008						1977	2008 Messtiefe 4 cm
KF	1627	A	1956	21	52	Stuttgart	Lagerhalle	alleseitig offen, unbeheizt	2	Kaurit-Leim 220 Piv.	19	18
	1619	B	1962	15	46	Stade	Salzlagerrhalle	geschlossen, unbeheizt	2/3	Kaurit-Leim 220 Piv.	20	20
	1681	C	1958	19	50	Westerkotten	Mehrzweck-halle/Schule	geschlossen, ab und zu beheizt	1/2	Kaurit-Leim 220 Piv.	16	15
	1682	D	1959	18	49	Soest	Turnhalle	geschlossen, beheizt	1	Kaurit-Leim 234 Piv.	9,5	12,5
	1629	E	1962	15	abgerissen	Köln	Eisstadion	offen, unbeheizt	2/3	Aerolite FFD	15	-
	1630	F	1964	13	44	Bergisch-Gladbach	Produktions-/Lagerhalle	geschlossen, beheizt	1	Kaurit-Leim 234 Piv.	12	8,5
	1622	G	1963	14	-	Krefeld	Lagerhalle	geschlossen, unbeheizt	2	Kaurit-Leim 234 Piv.	15	-
	1614	H	1969	8	vermutl. abgerissen	Hamm	Lagerhalle	geschlossen, beheizt	2	Kaurit-Leim 220 Piv.	15	-
	1631	I	1964	13	44	Hamm	Holzlagerrhalle Baumarkt	offen, unbeheizt	1 / 2	Kaurit-Leim 220 Piv.	17	8

Tabelle 13.1 Zusammenstellung der Bauwerke A – I und der relevanten Bauwerksangaben der Gebäudegruppe KF, die erstmalig 1977 von Kolb und Frech und sodann 2008/2009 im Rahmen des berichteten Forschungsvorhabens (ohne Gebäude E und H) jeweils mit eingehenden Probennahmen untersucht wurden.

13.3 Gebäudegruppe B (BSH-Vollwandträger)

Die Gebäudegruppe B umfasst insgesamt 13 eingehend begutachtete große Bauwerke mit UF-verklebten BSH-Bauteilen. Tabelle 13.2 beinhaltet eine Zusammenstellung wichtiger Angaben zu den Bauwerken, u. a. das Herstelljahr, die Art des Bauwerks, die klimatischen Bedingungen/Nutzungsklassen. Die wesentliche Unterscheidung zwischen der Gebäudegruppe B und der nachfolgend in Abschnitt 13.4 aufgeführten Gebäudegruppe C betrifft den Sachverhalt, dass bei allen Bohrkernen der Gebäudegruppe B immer vergleichend Bohrkernabschnitte nach Trocken- und Nasslagerung (Lagerungsart I und II) geprüft wurden. Bei der überwiegenden Mehrzahl der Gebäude (10 von 13) der Gebäudegruppe B wurden aus den Bohrkernen des Weiteren auch Bohrkernabschnitte zur Bestimmung der Wiedertrockenscherfestigkeit (Lagerungsart III) entnommen und geprüft. Detaillierte Angaben zu den Bauwerken finden sich in den Gebäudedatenblättern in den Anhängen X und Y.

Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr./Bezeichnung	Herstelljahr	Alter des Bauwerks bei der Begutachtung	Ort	Art des Bauwerks	klimatische Bedingungen	Nutzungs-klasse nach DIN 1052	Verwendetes Klebstoff-fabrikat	mittlerer Holzfeuchte-gehalt in % bei der Probenahme
B	1633	1968	41	Rosenheim	Supermarkt	geschlossen, beheizt	1	Harnstoffharz (UF)	9
	1580	1979	30	Rosenheim	Produktionshalle	geschlossen	1	Aerolite FFD	9
	1587	1979	30	Rott am Inn	Lagerhalle	geschlossen	1 / 2	Harnstoffharz (UF)	11,5
	1605	2002	7	-	Lagerhallen	geschl. unbeheizt	2	Harnstoffharz (UF)	16,5
	1606	2002	7	-	Lagerhallen	geschl. unbeheizt	2	Harnstoffharz (UF)	16,5
	1669	2002	7	-	Lagerhallen	geschl. unbeheizt	2	Harnstoffharz (UF)	14
	1670	2002	7	-	Lagerhallen	geschl. unbeheizt	2	Harnstoffharz (UF)	14,5
	1671	2002	7	-	Lagerhallen	geschl. unbeheizt	2	Harnstoffharz (UF)	14
	1356	1973	36	Hannover - Wennigsen	ehem. Tennishalle, Umbau zur Schwimmhalle	geschl. beheizt, teilw. Träger mit Abdeckung im Freien	1 / 2	Kaurit Leim 220 mit Härter 70	15
	800	1975	34	Rottweil	Tennishalle	geschlossen, beheizt	1	Kaurit 270	9,5
	1640	1985	24	Herrischried	Sägewerkshalle	geschlossen, nicht beheizt	2	Bester FIT: Syntheko 1206	14
	1641	1989	20	Wehr	Lagerhalle Wohnung	geschlossen, tw. beheizt	1 / 2	Bester FIT: Syntheko 1206	13,5
	1642	1983	26	Wehr	Lagerhalle bzw. Holzbaubetrieb	geschlossen, unbeheizt, aber gedämmt	1	Bester FIT: Syntheko 1206	14

Tabelle 13.2 Zusammenstellung der begutachteten Bauwerke mit Bohrkernentnahmen der Gebäudegruppe B mit relevanten Bauwerksangaben; bzgl. weiterer Details siehe relevante Gebäudedatenblätter in den Anhängen X und Y

13.4 Gebäudegruppe C (BSH-Vollwandträger)

Die Gebäudegruppe C umfasst insgesamt 38 eingehend begutachtete, große UF-verklebte Bauwerke, die in Tabelle 13.3 aufgeführt sind. Aus allen Bauwerken wurden Bohrkernentnahmen entnommen und sodann bezüglich der Trockenscherfestigkeit und der jeweiligen Faserbruchanteile geprüft. Detaillierte Angaben zu den Bauwerken finden sich in den Gebäudedatenblättern in den Anhängen X und Y.

Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr./Bezeichnung	Herstellungsjahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Ort	Bauwerksnutzung	klimatische Bedingungen	Nutzungs-kategorie nach DIN 1052	mittlerer Holzfeuchtegehalt der Bauteile in %
C	253	1982	26	Ravensburg	Reithalle	geschlossen, unbeheizt	2	15
	1643	1964	45	Nagold	Turnhalle	geschlossen, unbeheiztes Kaldach	2	12,5
	658	1974	33	Ochsenfurt	Dreifachturnhalle	geschlossen, beheizt	1	10
	1634	1973	33	Mellrichstadt	Dreifachturnhalle	geschlossen, beheizt	1	10
	1635	1975/1976	31	Bad Neustadt an der Saale	Mehrzweckhalle	geschlossen, beheizt	1	10
	1636	2002/2003	3	Mertingen	Produktionshalle	geschlossen, beheizt	1	9,5
	1639	1981	26	Unterpleichfeld	Mehrzweckhalle	geschlossen, beheizt	1	9
	1644	1969	37	Hollstadt	Kirche	geschlossen, beheizt	1	11,5
	1645	1972	34	Wargolshausen	Kirche	geschlossen, beheizt	1	11,5
	428	1978	30	Waldenbuch	Tennishalle	geschlossen, beheizt	1	12
	1646	1965	42	Neustadt an der Weinstr.	Schulaula	geschlossen, beheizt	1	9,5
	1663	1972 / 1973	33	Steinatel	Schule	geschlossen	2	13
	1648	1973	35	Ehningen	Produktionshalle	geschlossen	2	21
	1649	1973	33	Gärtringen	Sporthalle	geschlossen, beheizt	1	10
	1650	1976	30	Schwerte	Supermarkt	geschlossen, beheizt	1	11
	1651	n.b.	n.b.	Essen	Produktionshalle	geschlossen, beheizt	1	7,5
	1678	1996	10	Essen	Produktionshalle	geschlossen, beheizt	1	8
	1653	1993	13	Burgbernheim	Produktionshallen	geschlossen, beheizt	1	9,5
	1656	1970	36	Würzburg	Schule	geschlossen, beheizt	1	9,5
	1657	1920	86	Ludwigshafen	Produktionshalle	geschlossen	2	30
	1658	1990	16	Lohr am Main	Sporthalle	geschlossen, beheizt	1	9,5
	1664	1980	27	Weidenthal	Mehrzweckhalle	geschlossen, beheizt	1	10
	1661	1988	19	Mutterstadt	Sporthalle	geschlossen, beheizt	1	9,5
	1662	1930	76	Idar Oberstein	Turnhalle	geschlossen	2	12
	1678	1972	37	Ludwigsburg	Reithalle	geschlossen	2	18
	1680	1975	35	Duisburg	Sporthalle	geschlossen, beheizt	1	10,5
	1681	1988	22	Frankfurt	Fitnesscenter	geschlossen, beheizt	1	10
	189	1959	49	Bremen	Turnhalle	geschlossen, beheizt	1	-
	1666	1964	44	Wiesbaden-Bierstadt	Kirche	geschlossen	2	-
	1667	1964	45	Breisach	Sporthalle	geschlossen	2	-
	1665	1982	24	Feldmoching	Mehrzweckhalle	geschlossen	2	13
	1659	1982	25	Buxtehude	Sporthalle	geschlossen	2	-
	1128	1967	42	Pfullendorf	Kartoffellagerhalle	geschlossen	2	17
	162	1980	29	Butjadingen	Sporthalle	geschlossen	2	-
	1685	1971	41	Rosenheim	ehemals Lagerhalle, derzeit Einzelhandel	geschlossen, unbeheiztes Kaldach	2	-
	1686	1972	40	Blomberg	Sporthalle	geschlossen, beheizt	2	12
	1687	1966	46	Porta Westfalica	Lager- / Versandhalle	geschlossen, beheizt	1	9,5
	1688	1986	26	Porta Westfalica	Produktionshalle	geschlossen, beheizt	1	9,5

Tabelle 13.3 Zusammenstellung der begutachteten Bauwerke mit Bohrkernentnahmen der Gebäudegruppe C mit relevanten Bauwerksangaben ²²; bzgl. weiterer Details siehe relevante Gebäudedatenblätter in den Anhängen X und Y

²² Die Bohrkernprüfungen und –auswertungen der eingehend handnah mit Rissaufnahmen untersuchten Bauwerke Nr. 1686, 1687 und 1688 waren bis zum Zeitpunkt der Berichtsabfassung noch nicht vollständig abgeschlossen und sind nicht in den Ergebnisauswertungen enthalten.

13.5 Gebäudegruppe D (BSH-Vollwandträger)

Die Gebäudegruppe D umfasst insgesamt 14 Gebäude, bei denen weit überwiegend auf Wunsch der Gebäudeinhaber bzw. –betreiber keine Bohrkernproben entnommen wurden. Eine Teilmenge von 10 Bauwerken waren vollständig baugleiche Bauwerke (Tennishallen), von denen alle besichtigt wurden; fünf Tennishallen wurden eingehend handnah bis zu 2 m Höhe begutachtet. Vier weitere Bauwerke repräsentieren große Produktions- und Lagerhallen, bei denen meist umfangreiche Begutachtungen und Rissaufnahmen stattfanden.

13.6 Gebäudegruppe E (Kämpf-Träger bzw. Kastenträger mit Kämpf- oder Wolff-Stegplatten)

Die Gebäudegruppe E umfasst vier eingehend begutachtete Bauwerke mit I-förmigen Kämpf-Trägern bzw. mit Kastenträgern unter Verwendung von Kämpf- oder Wolff-Stegplatten.

Bei dem Kämpf-Träger (N. N. 1948; 1952), häufig auch Kämpf-Stegträger genannt, handelt es sich um einen geleimten I-Träger mit einem mindestens aus zwei Brettlagen zusammengefügt Steg über die gesamte Querschnittshöhe (max. 1,2 m) und daran seitlich mittels Nagelpressklebung angeschlossenen Gurthölzern. Die Faserrichtungen der Stegbretter sind gegenüber der Trägerachse um 4 bis 6° geneigt und nebeneinander liegende Brettlagen müssen einen Winkel von 8 bis 12° einschließen (N. N. 1952; 1955; 1961; 1962). Bei ungerader Anzahl von Brettlagen müssen die Fasern der mittleren Lage unter einem Winkel von etwa 10° zur Trägerlängsrichtung liegen. Die Fasern der daran anschließenden Lagen laufen dann parallel zur Trägerlängsrichtung. Stöße der Gurthölzer und der Stege müssen entweder durch Schäftungen oder unter Verwendung von Keilzinkungen ausgeführt werden.

Abweichend von Kämpf-Trägern sind Wolff-Stegträger (N. N. 1958) bzw. Stegträger „System Wolff K (N. N. 1962) geleimte I-förmige Träger bei denen sowohl der Steg wie die Gurte aus jeweils drei miteinander verleimten Lagen von Brettern bestehen. Die außenliegenden Brettlagen verlaufen parallel zur Trägerlängsachse und die innenliegenden Lage jeweils senkrecht dazu.

Bei allen Trägern wurden Bohrkerne aus den Steg- und Gurtbereichen entnommen. Tabelle 13.4 beinhaltet Angaben zu den Bauwerken. Detailliertere Angaben zu den Bauwerken finden sich in Abschnitt 14.4.2 sowie in den Anhängen X und Y.

Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr./Bezeichnung	Herstelljahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Ort	Art des Bauwerks	klimatische Bedingungen	Nutzungs-klasse nach DIN 1052	Verwendetes Klebstoff-fabrikat	mittlerer Holzfeuchtegehalt in % bei der Probenahme
E	1576	1963	48	Ditzingen	Kirche	geschlossen	2	Harnstoffharz (UF)	10
	1679	1971	39	Baunach	Kirche	geschlossen, beheizt	1	Harnstoffharz (UF)	15
	1682	1970	41	Würzburg	Sporthalle	geschlossen, beheizt	1	Harnstoffharz (UF)	12
	1683	1969	41	Waiblingen Neustadt	Kirche	geschlossen, beheizt	1	Harnstoffharz (UF)	11,5

Tabelle 13.4 Zusammenstellung der begutachteten Bauwerke mit Bohrkernentnahmen der Gebäudegruppe E (Kämpf- und Wolfstegträger) mit relevanten Bauwerksangaben; bzgl. weiterer Details siehe Abschnitt 14.4.2 sowie Anhänge X und Y

14 Begutachtungen und Untersuchungen der ausgewählten Harnstoffharz-verklebten Holzbauwerke

14.1 Allgemeines, Untersuchungsinhalte

Die Begutachtungen umfassten die generelle Bestandsaufnahme der Gebäude einschließlich einer Dokumentation der Klima-, Wasserschadens- und Nutzungshistorien sofern dem Gebäudeeigentümer / -nutzer bekannt. Im Einzelnen erfolgten sodann eingehende handnahe Begutachtungen der Träger im Hinblick auf Schäden, insbesondere Rissbildungen und Fugendelaminierungen. In jedem Bauwerk wurden sodann an einer repräsentativen Anzahl von Bauteilen Holzfeuchtemessungen mittels hierfür seitens der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart anerkannter und kalibrierter elektrischer Holzfeuchtemessgeräte durchgeführt. Ein zentraler Punkt der Gebäudebegutachtungen bestand in der Festlegung repräsentativer Bohrkern-Entnahmestellen und sodann in der Entnahme der Bohrkern (Größen siehe Abschnitt 15). Aus jedem Gebäude wurden je nach Anzahl der BSH-Träger zwischen 5 – 50 Bohrkern entnommen. Die Bohrkern wurden nach der Entnahme jeweils luft- und diffusionsdicht verpackt. An den Bohrkern respektive an den hieraus hergestellten Bohrkernabschnitten (siehe nachfolgend) wurden die folgenden Prüfungen und Beurteilungen vorgenommen:

- Visuelle Zustandsbegutachtungen
- Scherprüfungen nach unterschiedlichen Klima- / Wasservorbehandlungen
- Faserbruchanteilbestimmungen
- Bestimmung der Klebfugendicken (teilweise)
- Chemische Analysen der verwendeten Klebstoffe (teilweise)

14.2 Bewertungskriterien für Rissbildungen

Rissbildungen in bestimmtem Ausmaß sind in Holzbauteilen nicht ungewöhnlich und per se oftmals weder notwendige noch hinreichende Anhaltspunkte für größere Schäden. Dies gilt insbesondere auch für Rissbildungen in Klebefugen bzw. in Klebfugeninterfaces, da hier infolge von Rohdichteunterschieden der jeweils beidseitig angrenzenden Holzlamellen Steifigkeitsunstetigkeiten vorliegen. Letztere sind auch bei einer gleichförmig einwirkenden Beanspruchung aus Lasten und insbesondere Klima letztlich Ausgangspunkte für Rissbildungen und keinesfalls ursächlich mit Klebfugen(vor)schädigungen verbunden.

Die quantitative Bewertung einer eventuellen Standsicherheitsbeeinträchtigung oder -gefährdung eines Bauteils oder Tragwerks infolge von Holz- und Klebfugenrissen erfolgte

zunächst in Anlehnung an den heutigen Stand der Technik bei der Begutachtung und Bewertung der Integrität von Holz-/ Brettschichtholzbauteilen. Hiernach sind faserparallele Risse im Holz- und Klebfugenbereich in primär schubbeanspruchten Bereichen als vergleichsweise unbedenklich anzusehen, sofern die Tiefe b_{cr} des einzelnen Risses in Richtung der Querschnittsbreite b der Beziehung $b_{cr}/b \leq 1/6$ genügt. Diese Bewertung gilt zufolge vorherrschender Auffassung auch, wenn auf den beiden gegenüberliegenden Querschnittsseiten Risse mit der maximal zulässigen Tiefe von $b/6$ in der gleichen Querschnittshöhenlage auftreten, d. h. wenn die ungerissene Restquerschnittsbreite b_n bei weitgehend symmetrischer Rissbildung der Beziehung $b_n \geq 2b/3$ genügt.

Bei einseitigen Risstiefen $b/6 \leq b_{cr} \leq b/3$ sind in jedem Falle Einzelbetrachtungen erforderlich und im Regelfall sind sodann Ertüchtigungsmaßnahmen insbesondere durch Rissverguß angeraten. Bei ein oder beidseitigen aufaddierten Risstiefen $b_{cr} \geq b/3$ sind Ertüchtigungsmaßnahmen unumgänglich, da in Abhängigkeit von der jeweiligen Restquerschnittsbreite b_n , der Höhe der einwirkenden Schnittgrößen und den spezifischen konstruktiven Bedingungen ein unterschiedlich ausgeprägtes Standsicherheitsrisiko vorliegt.

Bei faserparallelen Rissen in querzugbeanspruchten Bereichen (Firstbereiche satteldachförmiger Träger und gekrümmte Träger) sind die Grenzen für vertretbare Risstiefen infolge geringerer Lastumlagerungsmöglichkeiten enger zu setzen. Im Allgemeinen kann von einer Unbedenklichkeit der Risse bei Verhältnissen von $b_{cr} \leq b/8$ (einseitige Risstiefen) bzw. $b_n \geq 3b/4$ ausgegangen werden.

Für die Bewertung der Längen faserparalleler Risse liegen nach heutigem Stand der Bewertungspraxis von Rissbildungen in BSH-Bauteilen keine Grenzwerte vor. Dies bedeutet jedoch keinesfalls, dass die Risslänge ein völlig irrelevanter Schadensindikator ist. Dies gilt insbesondere für Risse in Klebefugen. In diesen Fällen kann die Tatsache einer sehr großen Länge eines Risses von ca. 3 – 20 m mit soeben noch vertretbarer Risstiefe $b_{cr} \leq b/6$ auf ein spezifisches Verklebungsproblem bei dieser Fuge hinweisen. In allen Fällen, in denen Unsicherheiten in der Bewertung von Rissen auftreten, sind Bohrkernentnahmen unumgänglich.

14.3 Zusammenstellung der Begutachtungsergebnisse der Einzelbauwerke

Die Ergebnisse der Bestandsaufnahmen und die Bewertung des Gebäude- / Bauteilzustandes sind für jedes einzelne Gebäude in einheitlich tabellarisch strukturierten Gebäudedatenblättern in den Anhängen X-1 bis X-123 enthalten. Weiterhin sind im Anhang Y-1 bis Y-213 für jedes einzelne Gebäude eine Grundrisssskizze mit Kennzeichnung der Bohrkernentnahmestellen sowie ausgewählte Ansichten des Bauwerks und Details zu den Entnahmestellen der Bohrkernentnahmen und zu den begleitenden Feuchtemessungen abgebildet. Die Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen werden detailliert in den Abschnitten 18 - 21 vorgestellt und diskutiert.

14.4 Zusammenfassende Bewertung der visuellen Begutachtungen und Rissaufnahmen

14.4.1 Bauwerke mit BSH-Vollwandträgern

Die summarische Auswertung der Zustandsbegutachtungen aller untersuchten Gebäude mit BSH-Vollwandträgern ergab, dass rd. 55 % aller Gebäude teilweise nicht unerhebliche Schäden mit unterschiedlich ausgeprägten Rissbildungen aufwiesen. Dieser extrem hohe Prozentsatz geschädigter Bauten ist keinesfalls als repräsentativ für den baulichen Zustand aller UF-Harz-verklebter Bestandsbauten anzusehen, da in der vorliegenden Untersuchung sehr viele Gebäude enthalten sind, die aus gegebenem Anlass (Schadensvermutung, vorliegende Schadensfeststellung) begutachtet wurden. Dies heißt, dass die Bestandsaufnahme einen deutlich überproportionalen Anteil von Gebäuden mit Erhaltungszuständen im unteren Verteilungsbereich der Güten des UF-verklebten Bauwerksbestandes repräsentiert.

Eine Vielzahl der festgestellten Schäden in Form faserparalleler Risse im Holz und in den Klebfugen steht ursächlich mit Querkraft erzeugenden Umlenkkräften in größeren Träger(First-)bereichen oder / und mit unzulänglichen konstruktiven (Anschluß-) Detailausbildungen in Verbindung; diese Feststellung deckt sich mit Ergebnissen und Schlussfolgerungen von Blaß und Frese (2010).

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass speziell die Problematik zusätzlicher überlagerter klimainduzierter Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung und deren Abhängigkeit von der zylindrischen Steifigkeits/Festigkeits-Anisotropie des Holzes bei Entwurf, Bemessung und Konstruktion der frühen UF-Bestandsbauten (50iger bis 70iger Jahre) weitgehend unbekannt

war und daher im Regelfall unberücksichtigt blieb (vgl. hierzu u.a. Aicher et al., 1998; Aicher und Dill-Langer, 1999; Dill-Langer, 2004; Aicher und Dill-Langer, 2011; Aicher, 2012; Aicher et al., 2012). Im Bereich der Detailausbildungen war die extreme Schadensrelevanz abgehangter querzugerzeugender Lasten in unteren Bereichen der Trägerquerschnittshöhe sowie von großflächigen Stahlblech/Stabdübelanschlüssen auch speziell im Hinblick auf zwangsbedingte Schwindrisse wesentlich geringer im Bewusstsein der Tragwerksplaner als heute. Unzureichende Detailausbildungen von Auflagerungsbereichen mit Behinderung von Schwindverformungen führen häufig zu (Schub-)Rissen, bei denen der Rissfortschritt nach Querkzug-zwangsbedingtem erstem Aufreißen der Fuge meist durch das Schubfeld an der Rissspitze getrieben wird.

Bei der Bewertung von Schäden in Klebefugen bzw. Klebstoff-Holz-Interfaces und der Beantwortung der Fragestellung, ob die Klebfugen/Klebstoff-Degradation die primäre Ursache des Schadens darstellt, ist zu berücksichtigen, dass der Schaden immer auch in Verbindung mit einwirkenden Spannungen aus Lasten und Klima auftritt. Bei einigen Schadensszenarios, insbesondere solchen der Schadensgruppe Schad-1 (hohe Feuchten, siehe unten), ist das Ausmaß der Fugendegradation visuell und festigkeitsmäßig derart evident (z. B. Schäden der Gebäude Nr. 1657 und Nr. 1648, siehe unten), dass die Festlegung der primären Schadensursache nahezu unabhängig von den Einwirkungen getroffen werden kann.

Bei der Mehrzahl der Fugenschäden sind jedoch die Einwirkungen (Spannungen infolge Lasten und Klima) kausal mitbeteiligt und es stellt sich sodann die Frage, ab welchem Grenzwert des Fugenwiderstandes betreffend Scher- und Querkzugfestigkeit bzw. betreffend die Fugenbeständigkeit (Delaminierungsverhalten) von einer qualitativ eher schlechten Verklebung bzw. von einer eindeutig unzureichenden Verklebung auszugehen ist. Im letzteren Falle ist sodann noch zu differenzieren, ob die Verklebung infolge unzureichender Verklebungsrandbedingungen (z. B. nicht ausreichender Pressdruck, Überschreitung der Wartezeit, etc.) oder durch inhärente Schwächen des Klebstoffs selbst unzureichend ist.

Die normativ festgelegten Grenzwerte für die Längszugscherfestigkeit, für die Block-Druckscherfestigkeit einschließlich Faserbruchanteil und für die Delaminierungsbeständigkeit in den Normen EN 301, EN 386 und EN 391 bzw. EN 302-2 sind für die ingenieurmäßige Bewertung der Güte der Klebefugen vergleichsweise gute Indikatoren. Eine Unterschreitung der Anforderungen, die sodann häufig nur partiell auftritt, ist in jedem Einzelfall zu bewerten. Man erhält hierbei im Allgemeinen jedoch keine unmittelbare Antwort auf die Fragestellung, ob die Nichterfüllung der Anforderungen eindeutig aus ungünstigen Verklebungsrandbedin-

gungen, effektiven Klebstoffdefiziten oder aus ungünstigen Holzeigenschaften (Alterung, Rohdichte, Jahrringlage) herrührt.

Um diesbezüglich dennoch zu quantitativen Aussagen im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens zu kommen, wurden die visuellen und haptischen Bauwerksbefunde und insbesondere die Rissvermessungen mit den in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich besprochenen Scherfugenergebnissen an den entnommenen Bohrkernen korreliert. Hieraus folgt, dass unabhängig von der jeweils erforderlichen Einzelfallbetrachtung mit großer Wahrscheinlichkeit von einer erheblichen Klebfugendegradation auszugehen ist, wenn bei trocken geprüften Bohrkernen mehrere Scherfestigkeitseinzeltwerte und der 5%-Quantilwert der Scherfestigkeit unterhalb von 4 N/mm^2 liegen und des Weiteren der Mittelwert der Proben unterhalb oder nur unwesentlich über 6 N/mm^2 liegt. Auffällig niedrige Faserbruchanteile sind im Falle der genannten niedrigen Scherfestigkeiten Indikatoren für Klebfugendegradationen. Eine rigorose Anwendung des kombinierten Scherfestigkeits-Faserbruchanteilkriteriums der EN 386 für Einzel- und Mittelwerte ist hingegen häufiger nicht für die Bewertung von Klebfugenzuständen geeignet.

Eindeutig festzustellen ist, dass die weitaus überwiegende Anzahl der festgestellten Schäden bei solchen Holzbauteilen vorgefunden wurde, deren Feuchtegehalt zwischen rd. 6 % bis rd. 10 % lag, d.h. bei BSH-Bauteilen, die nach Ihrer Herstellung mit Feuchten im Bereich von rd. 11 % bis 14 % überwiegend deutlich nachgetrocknet sind.

Beschränkt man sich bei der Bewertung der Gebäude- / Bauteilschäden auf sehr gravierende, unmittelbar standsicherheitsrelevante Schäden sowie auf erhebliche bis gravierende Schäden mit dringlichem Handlungsbedarf, jeweils mit Rissbildungen in Holzklebfugen-Interfaces, so reduziert sich der festgestellte Schadensumfang auf insgesamt zehn Gebäude²³. Einige wesentliche Details zu diesen Gebäuden sind in den Tabellen 14.1 und 14.2 aufgeführt. Neben Angaben zum jeweiligen Gebäude und den Schäden sind in den Tabellen auch die Scherfestigkeiten der entnommenen Bohrkerns und die Holzfeuchten enthalten.

Die sehr gravierenden sowie die erheblichen Schäden lassen sich zwei hauptsächlichen Schadensgruppen /-ursachen – Schad-1 und Schad-2 – zuordnen:

²³ Die Bewertung bezieht sich auf alle zum Zeitpunkt der Berichtsabfassung vollständig abgeschlossenen Untersuchungsauswertungen, die bei drei Gebäuden (Gebäudegruppe C) noch andauern (vgl. Abschn. 13.4). Absehbar wird hierbei zumindest noch ein Bauwerk der Gruppe der gravierend geschädigten Gebäude hinzuzurechnen sein.

- i) Die Schadensgruppe Schad-1 umfasst Schäden infolge sehr hoher Feuchteeinwirkungen auf die Bauteile. Diese resultieren zum einen aus direkten Befeuchtungen infolge Dachundichtigkeiten oder Kondensationswasser bei bauphysikalisch unzureichend / falsch ausgeführten Dächern. Zum anderen können sich sehr hohe Holzfeuchten im Bereich von rd. 20 – 30 % auch durch die planmäßige Verwendung der Bauteile in Umgebungsklimata mit andauernd sehr hohen Luftfeuchtigkeiten ergeben (z.B. Abdeckungen über Kläranlagen, schlecht belüftete Kompostierhallen).
- ii) Die Schadensgruppe Schad-2 umfasst Klebfugenschäden, die wesentlich aus der Versprödung der Klebefugen durch langanhaltende oder zyklisch wiederkehrend hohe Temperaturen im Bereich von 40 °C – 60 °C verursacht werden. Besonders beschleunigend wirken sich hierbei überlagerte hohe Luftfeuchtigkeiten oder direkte Wassereinwirkungen infolge Kondensatbildung aus. Das Schädigungsszenario – sehr hohe Temperaturen – tritt insbesondere an Bauteiloberflächen im Bereich von (schlecht belüfteten) Oberlichtern und häufig bei Kaltdächern auf. Im letzteren Falle liegt sodann auch häufig eine Überlagerung der beiden Schadensszenarios – hohe Oberflächen-Feuchten und hohe Temperaturen – vor.

In beiden Schadensursachengruppen Schad-1 und -2 wirken sich – wie aus vorherigen Kapiteln evident – dicke Fugen beginnend ab ca. 0,3 mm und insbesondere solche mit Dicken von rd. 0,4 - 1 mm – verstärkt auf die Fugendegradation aus. Dicke Fugen, die nach dem Härter-Vorstrichverfahren hergestellt wurden, weisen, wie in den Klebstoffversuchen nachgewiesen, besonders ausgeprägte Abnahmen der Festigkeiten, speziell der Nass- und Wiedertrockenscherfestigkeiten auf.

Im Rahmen der durchgeführten Bauwerksbegutachtungen wurden drei Gebäude mit sehr gravierenden Holzbauteilschäden eruiert, bei denen die Holz / Klebfugenschäden eindeutig aus den sehr hohen Feuchteeinwirkungen respektive Feuchtegehalten der Bauteile resultieren. Dies sind die Gebäude Nr. 1657, Nr. 1643 und Nr. 1648. Bei einem weiteren Gebäude mit der Bauwerksnummer 1662 lagen zum Zeitpunkt der Begutachtung keine hohen Holzfeuchten vor. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit sind jedoch im Laufe der 78jährigen Nutzungsgeschichte des Bauwerks erhebliche Feuchteeinwirkungen aufgetreten, was auch aus alten Wasserlaufspuren ersichtlich ist. Nachfolgend werden die in Tabelle 14.1 aufgeführten schwer geschädigten Gebäude / Holztragwerke der Schadensgruppe Schad-1 im Einzelnen knapp dargestellt:

- Bei dem Gebäude Nr. 1657 mit einem Gebäudealter von 86 Jahren, handelt es sich um das älteste überhaupt begutachtete UF-verklebte Dachtragwerk, das mehrere Jahrzehnte über offenen Klärbecken im Einsatz war. Hier waren gehäuft meterlange Fugendurchrisse mit weitgehend degradierten Klebfugenbereichen festzustellen. Die naheliegend sehr niedrigen Scherfestigkeitsergebnisse werden unten angesprochen. Eine Instandsetzung der Träger war nicht möglich; das Dachtragwerk wurde abgerissen.
- Bei dem Gebäude Nr. 1648 handelt es sich um eine 35 Jahre alte, geschlossene, beheizte Lagerhalle mit Satteldachträgern mit geradem Untergurt. Infolge Dachundichtigkeiten wurden die Träger „bereichsweise“ mehrjährig stark befeuchtet. In diesen Bereichen wurden bei den Untersuchungen Holzfeuchten von 23 % bis 32 % gemessen. Infolge der langanhaltenden Wassereinwirkung waren viele Klebfugen in mehreren Trägern hydrolytisch teilweise extrem degradiert, so dass häufig tiefe und lange Risse, sowie an zwei Trägern Querschnittsdurchrisse über mehrere Meter festzustellen waren. Eine Instandsetzung der Träger war nicht möglich; die Bauteile wurden ersetzt.
- Das Gebäude Nr. 1662 war mit einem Gebäudealter von 78 Jahren das zweitälteste überhaupt begutachtete Bauwerk. Das Tragwerk besteht aus Zweigelenkbögen mit I-Querschnitt, der durchgängig mittels Nagelpressklebung verklebt wurde. Das Gebäude diente während der vormaligen Nutzung über rd. acht Jahrzehnte unterschiedlichen Verwendungen, u. a. als Reitstall und Turnhalle und war in der Vergangenheit bereichsweise nachweislich hohen Feuchtebeanspruchungen ausgesetzt. Die Träger wiesen nahezu durchgängig eine Vielzahl von klaffenden, mehrere Meter langen Rissen in den Klebfugen auf. Die Risstiefen variierten von 20 % bis 100 % der Stegdicke. Das denkmalgeschützte Gebäude wurde aufwändigst instandgesetzt (Rissverpressung und aufgeklebte Beplankungen).
- Das Gebäude Nr. 1643 mit einem Gebäudealter von 45 Jahren, diente als Sporthalle. Das Dachtragwerk bestand aus Satteldachträgern mit geradem Untergurt. Der Dachaufbau repräsentierte ein Kaltdach mit zur Trägerunterkante hin bündiger, schwach isolierter Sichtdecke. Die Träger wurden bereichsweise infolge Dachundichtigkeiten, insbesondere jedoch durch Kondensatbildung in erhöhtem Maße feuchtebeansprucht. An mehreren Trägern waren gehäuft Rissbildungen mit Risstie-

fen bis zu 50 % der Querschnittsbreite festzustellen; an einem Träger lag ein Querschnittsdurchriss über ca. 2/3 der Trägerlänge vor. Infolge der festgestellten ausgeprägten Fugendegradationen wurde das gesamte Dachtragwerk ersetzt.

Die in Tabelle 14.2 aufgeführten Gebäude Nr. 658, Nr.1634, Nr. 1635, Nr. 1636, Nr. 1678 und Nr. 1684 repräsentieren Turnhallen sowie beheizte Produktions- bzw. Verkaufshallen. Bei zwei Bauwerken sind die Träger innerhalb der beheizten Hülle angeordnet, überwiegend (vier Bauwerke) ragen die Träger jedoch bereichsweise in den Kaltdachbereich hinein. In allen sechs Bauwerken wiesen die BSH-Träger (Satteldachträger, parallel berandete Träger und Träger mit variabler Querschnittshöhe) gravierende tiefe Risse bis hin zu Querschnittsdurchrissen und in Trägerlängsrichtung weit ausgedehnte Rissbildungen auf. Die Holzfeuchten der Träger lagen überwiegend im Bereich von 7 % bis 10 % und höchstens bei 11,5 %. Exemplarisch wird nachfolgend kurz auf die Bauwerke Nr. 1684 und Nr. 1678 eingegangen; bezüglich der übrigen Bauwerke der Tabelle 14.2 wird auf die Ausführungen im Anhang X verwiesen.

Bei allen genannten Bauwerken mit sicherheitsrelevant stark geschädigten Trägern wurden umgehende Sanierungsmaßnahmen (i.d.R. Rissverpressungen teilweise in Kombination mit anderen Verstärkungsmaßnahmen wie aufgeklebten Platten, Vollholzbrettern und teilweise Schraubenverstärkungen) angeraten, umgehend durchgeführt sowie teilweise von der MPA Universität Stuttgart kontrolliert.

- Das Gebäude Nr. 1684 mit einem Gebäudealter von 40 Jahren ist eine umgenutzte, vormalig unbeheizte Lagerhalle. Das Dachtragwerk besteht aus kastenförmigen Satteldachträgern mit rd. 34 m Spannweite. Der Dachaufbau repräsentiert ein Kaltdach mit an den Pfetten abgehängter, schwach/unzureichend gedämmter Schall- und Sichtschutzdecke über beheizten Räumen. Die Stege der Kastenträger wiesen bei einigen Trägern, ausgehend von den Auflagern und im Firstbereich Querschnittsdurchrisse mit Risslängen von rd. 5 m bis 15 m auf. Die Klebefugen der Gurt-Stegverbindungen waren häufig erheblichst degradiert. Das Dachtragwerk wurde aufwändig instandgesetzt (Gurtaufdoppelungen, Plattenverstärkungen und aufgeklebte Diagonalverbretterung, Vollgewindeschrauben für die Gurt-Steg-Sicherung).
- Das Gebäude Nr. 1678 mit einem vergleichsweise geringen Gebäudealter von 12 Jahren repräsentiert eine geheizte Produktionshalle. Das Dachtragwerk (Kaltdach mit abgehängter Unterdecke) besteht aus Satteldachträgern mit gekrümmtem Un-

tergurt. An mehreren Trägern wurden lange Risse mit Tiefen bis zu 50 % der Querschnittsbreite vorgefunden. An einem Träger lag der Querschnittsdurchriss über mehrere Meter im Firstbereich vor. Die Holzfeuchte der Träger war durchgängig sehr niedrig; viele Messwerte lagen im Bereich von 7 %.

Gebäude Nr.	Baujahr	Alter bei Erstbelegung	Ort	Hallennutzung	Trägertyp (stat. System)	Querschnitt	Holzfeuchte (Ursache)	Risse	Maßnahme	Anzahl der Bohrkernab-schnitte	Scherfestigkeiten			mittlerer Faserbruch-anteil
											Kleinst-werte	$x_{0,5}$	x_{mean}	
-	-	-	-	-	-	cm x cm	%	-	-	-	-	-	-	%
1657	1920	86	Ludwigs-hafen	Halle über offenem Klärbecken	I-Träger (Zweifeld-Träger)	Steg 9 x 43	25 - 35 (spezielle Nutzung)	Durchrisse über mehrere Meter	Abriss der Halle	3	1,73	-	3,12	97
1662	1930	78	Idar-Oberstein	Reithalle Versammlungshalle Turnhalle	gekrümmter I-Träger, 2-Gelenkbogen	Steg 8 x 69	11 - 13 (vormalig hohe Feuchten)	Durchrisse über mehrere Meter	Totalsanierung Rissverpressung aufgeklebte BFU-Platten	31 (40)	1,66	2,16	6	58
1643	1964	45	Nagold	Sporthalle	Satteldachträger mit geradem Untergurt (Einfeldträger)	12 x (80-108)	8 - 17 (Dach undicht, Kondensatbildung, Kaldach)	Durchriss an einem Träger mehrfach $b_{cr} \geq b/2$	Abriss der Halle	11 (16)	2,78 3,67 3,68	3,45	6,14	95
1648	1973	35	Ehningen	Lagerhalle	Satteldachträger mit geradem Untergurt (Einfeldträger)	17x (86-105)	10 - 32 (Dachundichtigkeit)	Durchriss an zwei Trägern mehrfach $b_{cr} \geq b/6$	Austausch der Träger	4 (5)	3,68	-	6,19	76

Tabelle 14.1: Zusammenstellung von Bauwerken mit BSH-Vollwand- bzw. BSH-Kasten-Trägern mit festgestellten sehr gravierenden Klebfugenschäden (Schadensgruppe Schad-1)

Gebäude Nr.	Baujahr	Alter bei Erstbelegung	Ort	Hallennutzung	Trägertyp (stat. System)	Querschnitt	Holzfeuchte	Risse	Maßnahme	Anzahl der Bohrkernab-schnitte	Scherfestigkeiten			mittlerer Faserbruch-anteil
											Kleinst-werte	$x_{0,5}$	x_{mean}	
-	-	-	-	-	-	cm x cm	%	-	-	-	-	-	-	%
658	1974	34	Ochsenfurt	Sporthalle	Vollwand-Träger, parallel berandet (Einfeld-Träger)	16 x 170	8,5 - 11,0	Risslängen bis 5 m, Risstiefen bis 8 cm	Instandsetzung mittels Rissverpressung	22 (39)	3,07 3,14 3,25	3,24	8,37	89
1634	1973	33	Mellrichstadt	Sporthalle	Vollwand-Träger, variable Höhe (Einfeld-Träger)	14 x 160 - 14 x 210	9,0 - 11,5	Risslängen bis 8 m, Risstiefen bis 5 cm	Instandsetzung mittels Rissverpressung	16 (37)	2,79 5,32 5,33	5,32	8,29	77
1635	1975	31	Bad Neustadt a.d.S.	Sporthalle	Vollwand-Träger, parallel berandet (Einfeld-Träger)	22 x 200 14 x 200	9,0 - 11,0	Risslängen bis 8 m, Risstiefen bis 7 cm	Instandsetzung mittels Rissverpressung	29 (37)	1,77 3,91 4,05	4,04	7,48	80
1636	2002	6	Mertingen	Produktionshalle (beheizt)	Satteldachträger mit geradem Untergurt (Einfeldträger)	22 x 130 - 22 x 190	8,5 - 10,5	Risslängen bis 6 m, Risstiefen bis 8 cm	Instandsetzung mittels Rissverpressung	21 (40)	3,91 4,03 4,06	4,04	6,44	53
1684	1971	40	Rosenheim	Verkaufshalle (Kaldach)	Satteldachträger mit gekrümmten Untergurt	Kastenquerschnitt Stege 8x(100-220)	7 - 9	Durchrisse in First- und Auflagerbereichen	Ertüchtigung	14	1,37 3,21 3,80	2,57	5,24	26
1678	1996	12	Essen	Produktionshalle (beheizt)	Satteldachträger mit gekrümmtem Untergurt	20x (100-123)	7 - 9	Durchriss im First eines Trägers, extreme Rissbildungen $b_{cr} \geq b/2$	Ertüchtigung	14 (22)	3,16 3,51 3,84	3,53	6,03	86

Tabelle 14.2: Zusammenstellung von Bauwerken mit BSH-Vollwandträgern mit festgestellten gravierenden Rissbildungen in den Klebfugen bzw. Klebfugenschäden (Schadensgruppe Schad-2)

14.4.2 Bauwerke mit Kämpf-Trägern bzw. mit Kastenträgern mit Kämpf- bzw. Wolff-Stegplatten

Infolge der sehr unterschiedlichen Bauarten, -geometrien, Bauzustände und Schadensbilder ist eine summarische Diskussion der in Rede stehenden Bauwerke nicht angezeigt. Es werden die Befunde der Einzelbauwerke in knapper Form mitgeteilt.

- i) Bauwerk 1576 (vgl. Bauwerks-Datenblatt, Anhänge X-115 und X-116): Das Dachtragwerk des 48 Jahre alten, als Kirche genutzten Bauwerks besteht aus Kämpf-Stegträgern (I-Trägern) mit unterschiedlichen Querschnittsabmessungen und variablen Stegdicken und -aufbauten. In den 112 cm bis 125 cm hohen Stegplatten der Kämpf-Stegträger sind auch Durchbrüche mit Abmessungen von rd. 60 cm x 60 cm als Durchstiege im begehbaren trägerhohen Zwischenraum der Kaltdachkonstruktion vorhanden. Die Stegplatten außerhalb der Durchbruchbereiche wiesen bereichsweise Risse/Öffnungen in den Schmalkantenfugen der Brettlagen bzw. in den Stegbrettern auf. Die festgestellten Klaffungen in den Schmalkanten-Stoßbereichen der Stegbretter waren an allen untersuchten Stellen jeweils nur in einer der drei über die Querschnittsbreite angeordneten Brettlagen vorhanden, d. h. es waren in keinem Fall Stegplattendurchrisse festzustellen. Auf Grund der in Breitenrichtung versetzten und mit unterschiedlichen Winkeln angeordneten Brettlagen wurde ungeachtet der vorgefundenen Risse die Schubtragfähigkeit der Stege an keiner der begutachteten Stellen als akut bedenklich angesehen. In den handnah begutachteten Bereichen konnten keine Risstiefen festgestellt werden, die $\frac{1}{3}$ der Dicke der Stegplatten überschritten. Dies betrifft insbesondere auch die Holzrisse in den Stegbrettern. Im Hinblick auf die Sicherstellung einer vollständig ungerissenen Stegbreite wurden seitens des involvierten Tragwerksplaners Ertüchtigungen der Schmalkantenverklebungen mittels Rissverpressungen veranlasst.

In den Durchbruchbereichen waren gravierende Rissbildungen bzw. Stegplatten-Durchrisse ausgehend von den querzugbeanspruchten Eckbereichen der extrem großen Stegdurchbrüche vorhanden. Diese resultieren jedoch ausschließlich aus den in dieser Größe unzulässigen Steg-Durchbrüchen in Verbindung mit einer nahezu wirkungslosen aufgenagelten, nicht verklebten Durchbruchrandverstärkung. Die Rissbildungen in Verbindung mit den Durchbrüchen sind in keinem Falle auf eine unzureichende Herstellung (Verklebung) der Stegplatten zurückzuführen. Eine umfas-

sende großflächige Sanierung der Durchbruchbereiche wurde mittels aufgeklebter Baufurniersperrholzplatten durchgeführt.

Zur Beulaussteifung des sehr schlanken plattenartigen Steges sind in regelmäßigen Abständen von rd. 2,5 m Bretter (Querschnittsabmessungen: 30 mm / 125 mm) über die gesamte Steghöhe mittels Nagelpressklebung aufgeklebt. Die Klebefugen dieser Stegsteifen wiesen an vielen Stellen große Klaffungen oder Klebstoffversprödungen in Folge zu dicker UF-Harz-Fugen auf und waren damit als weitgehend wirkungslos zu bewerten. Die Stegsteifen wurden durch Bretter erneuert, die jeweils unmittelbar neben den vorhandenen Steifen mittels Schraubenpressklebung aufgeklebt wurden.

- ii) Bauwerk 1679 (vgl. Bauwerks-Datenblatt, Anhänge X-117 und X-118): Es handelt sich um ein Dachtragwerk mit rd. 17 m weit gespannten Kastenträgern mit beidseitigen Stegplatten in Kämpf-Steg-Bauart (40 mm dicke 3-Schichtplatten). Die Querschnittsaußenabmessungen der Kastenträger betragen (Breite x Höhe) 18 cm x 105 cm. Seitlich waren die deckend mit grauer Farbe gestrichenen Trägeroberflächen über eine Trägerhöhe von ca. 70 cm von der Trägerunterkante bis zur abgehängten Decke einsehbar. An den Oberflächen der Stegplatten waren lediglich wenige Risse mit sodann nur unwesentlichen Risstiefen (< 5mm) erkennbar. An der Unterseite des Trägers waren an den Klebstofffugen zwischen dem Untergurt und den seitlichen Stegplatten keine Risse oder Fehlstellen erkennbar. Am oberen Trägerbereich hinter der bereichsweise geöffneten Deckenschalung waren in keinem der begutachteten, jedoch nur begrenzt einsehbaren Bereiche Rissbildungen an den Stegoberflächen festzustellen.

Die Träger wurden bereichsweise durch Dachundichtigkeiten feuchtebeansprucht. Die Holzfeuchten waren in diesen Bereichen ausschließlich oberflächennah (bis rd. 1 cm Tiefe) erhöht (über 20 %) ansonsten betragen die Holzfeuchten 13,7 % bis 16,5 %.

An den Stellen mit sichtbaren abgetrockneten Wasserlaufspuren waren keine Anzeichen betreffend einer Degradation des Holzes und der Klebstofffugen durch die vielfach aufgetretenen Feuchtigkeitseinwirkungen feststellbar, was durch eine Bohrkernentnahme respektive durch die Ergebnisse der Scherfestigkeitsversuche verifiziert wurde. Durch die Neueindeckung/abdichtung des Daches sind weitere Feuchtigkeitseinträge in Verbindung mit einem angeratenen Monitoring ausgeschlossen.

- iii) Bauwerk 1682 (vgl. Bauwerks-Datenblatt, Anhänge X-119 bis X-121): Es handelt sich um ein Dachtragwerk mit rd. 21 m weit gespannten Kastenträgern (zweifach geknickt) mit beidseitigen Stegplatten in Wolff-Steg-Bauart (62 mm dicke 3-Schichtplatten mit orthogonal angeordneten Faserverläufen der Einzelschichten).

An den begutachteten Kastenträgern war in allen begutachteten Bereichen eine Vielzahl von Rissen (siehe nachfolgend) festzustellen. Die Stegplatten der Kastenträger, sowohl der Nebenträger als auch der Hauptträger, wiesen in weiten Bereichen gerissene Schmalkantenverklebungen zwischen den einzelnen Brettlamellen auf. Die Risstiefen erstreckten sich hierbei häufig über die gesamte Dicke der äußeren Brettlagen (26 mm). Die Risslängen variierten von rd. 1 m bis rd. 4,5 m. (Anmerkung: An den in das Freie reichenden Enden der Kastenträger sind an den seitlich frei bewitterten Trägerflächen stark ausgeprägte Verwitterungserscheinungen vorhanden. Hier waren zusätzlich zu den Delaminierungen der Schmalkantenverklebungen auch sehr ausgeprägte Rissbildungen innerhalb der einzelnen Brettlamellen (Schwindrisse) feststellbar.) An den Kastenträgern waren im Gebäudeinneren mehrfache Wassereintritte im Bereich der Nebenträger und der Hauptträger feststellbar. Das an den Trägern herunter laufende Wasser führte zu ausgeprägten Wasserlaufspuren an den Trägerseitenflächen. Die an den Stegplatten der Kastenträger gemessenen Holzfeuchtigkeiten variierten bei den Messungen im Halleninneren von 9,2 % bis 11,8 % und bei den Messungen im Außenbereich von 12,9 % bis 21,6 %.

Die Sanierung der Kastenträger erfolgte entsprechend gutachtlicher Empfehlung der MPA Universität Stuttgart mittels aufgeklebter BFU-Platten (Schraubenpressklebung) über die komplette Steghöhe sowie teilweise mittels Rissverfüllung durch Epoxidharz im Knickbereich. In den Abknickbereichen der Kastenträger wurde eine Rissverpressung der Fugenrisse durchgeführt.

- iv) Bauwerk 1683 (vgl. Bauwerks-Datenblatt, Anhänge X-122 und X-123): Es handelt sich um ein Dachtragwerk mit I-förmigen Kämpf-Trägern mit unterschiedlichen Querschnittsabmessungen. Die Hauptträger des 1963 errichteten Dachtragwerks bestehen aus zwei rd. 38 m langen in der Längsachse geneigten Kämpf-Trägern mit einer Spannweite von rd. 29 m. Der Querschnittsaufbau und die Querschnittshöhe der rd. 136 cm hohen und 28 cm breiten Hauptträger weichen teilweise von den Bestimmungen des Zulassungsbescheides Nr. IVB5-9151/2-56 des Bayerischen Staatsministeri-

ums des Innern (N.N.1961) ab. Auf die planmäßig hochkant angeordneten Gurtbretter sind als Aufdoppelung flachkant zwei Brettlagen mit jeweils 3 cm Dicke am Ober- und am Untergurt mittels Nagelpressklebung aufgeklebt (wesentliche Abweichung von der Zulassung). Mit einer vorhandenen Trägerhöhe von rd. 136 cm ergibt sich zudem eine geringfügige Überschreitung (13%) der zulassungsgemäß maximal zulässigen Trägerhöhe (120 cm).

An den Hauptträgern schließen beidseitig jeweils zu den Traufkanten hin geneigte Kämpf-Träger (Nebenträger ebenfalls in I-form) an. Die Hauptträger sind lediglich im Bereich des Oberlichts über dem Altar einsehbar, ansonsten ist die Tragkonstruktion im Kircheninneren durch eine geschlossene Unterdecke verkleidet. An den bislang im Rahmen des Forschungsvorhabens handnah begutachteten Bereichen der Kämpf-Träger waren keine gravierenden Auffälligkeiten bezüglich materialseitiger Degradationserscheinungen wie Klebfugendegradationen, Rissbildungen oder Fäulnisschäden erkennbar. Lediglich an den Oberseiten der Trägerobergurte waren im Bereich des Oberlichts gering ausgeprägte Verwitterungserscheinungen vorhanden. Die gemessenen Holzfeuchten von durchschnittlich 10,6 % im äußeren Querschnittsbereich und 11,4 % im Querschnittsinneren (Messtiefe 4 cm) charakterisieren ein konstantes trockenes Raumklima. Die durchgeführten Bohrkernuntersuchungen wiesen unter Berücksichtigung einer geringen Bohrkernanzahl eine ausreichende Stegplattenverklebungsqualität auf. Bei den Gurtholzverklebungen liegen ungeachtet ausreichender Scherfestigkeiten teilweise sehr niedrige Faserbruchanteile vor. Das Dachtragwerk wird derzeit einer eingehenden präventiven Standsicherheitsuntersuchung im Sinne der Gebäuderichtlinie (N.N. 2006) unterzogen.

15 Untersuchungen an Bohrkernen aus den begutachteten Bestandsbauten

15.1 Probenherstellung und -prüfungen

Alle Bohrkern, die aus den in Abschnitt 13 aufgeführten Bauwerken/Bauteilen entnommen wurden, wurden zunächst vermessen und einer eingehenden visuellen Begutachtung unterzogen. Anmerkung: eine weitere eingehende visuelle Begutachtung erfolgte nach Abrichtung der Bohrkern für die Scherprüfung (siehe nachfolgend). Die Blockscherprüfungen wurden an Scherprüfkörpern gemäß DIN EN 392 durchgeführt.

Die Bohrkern wiesen nahezu durchweg einen Außendurchmesser von 35 mm und Längen von rd. 50 – 90 mm auf. Da die Längen der prüfbaren Bohrkern rechtwinklig zur Scherlänge norm- und versuchsvorrichtungsbedingt auf maximal 50 mm beschränkt waren, sowie im Hinblick auf den Einfluss unterschiedlicher Klima/Wasserlagerungs-Vorbehandlungen, wurden die Bohrkern im Regelfall rechtwinklig zur Bohrkernachse in zwei oder drei Bohrkernabschnitte aufgetrennt. Die Dicken der Klebfugen der entnommenen Bohrkern wurden an den für die Scherprüfungen verwendeten Blockscher-/Bohrkernabschnitten nach der Durchführung der Festigkeitsuntersuchungen bestimmt. Die Messungen der Klebfugendicken wurden mittels einer Auflicht-Messlupe mit integriertem Messmasstab mit einer Auflösungsgenauigkeit von 0,05 mm durchgeführt.

Für die chemischen Untersuchungen an den Klebefugen dahingehend, ob es sich im jeweiligen Fall (Bauwerk) tatsächlich um ein UF-Harz handelt und zur Bestimmung des speziellen Klebstofffabrikates wurden aus den freigelegten Klebstoffschichten der abgescherten Bohrkernproben geringe Mengen ca. 1 – 2 g für die chemischen Analysen entnommen

15.2 Vorbehandlung der Bohrkernabschnitte mittels Klima- und Wasserlagerungen

Die auf Endmaße abgelängten/geschliffenen Bohrkernabschnitte wurden vor Durchführung der Scherprüfungen den nachstehend beschriebenen unterschiedlichen Klima- bzw. Wasserlagerungsvorbehandlungen – Normalklimalagerung, Kaltwasserlagerung und Nass-Trocken-Wechselagerung – unterzogen.

a) Normalklimalagerung

Bei der Normalklimalagerung (entspricht Klimalagerung I bei Kolb und Frech (1977)) wurden die Bohrkern/Bohrkernabschnitte im Regelfall rd. 5 - 6 Wochen im Normalklima

20 °C / 65 % rel. LF nach DIN 50014 gelagert. Die erhaltenen Probenfeuchten variierten von 11,3 % - 12,8 %.

b) Kaltwasserlagerung

Bei der Kaltwasserlagerung (entspricht Klimalagerung II bei Kolb und Frech (1977)) wurden die Bohrkerne/Bohrkernabschnitte 5 Tage unter Wasser bei 20 °C gelagert und sodann im nassen Zustand geprüft. Die erhaltenen Probenfeuchten variierten von rd. 95 % bis 99 %. Die 5tägige Kaltwasserlagerung entspricht der Lagerungsfolge 2 nach EN 301 bzw. EN 302-1.

c) Nass-Trocken-Wechselagerung

Bei der Nass-Trocken-Wechselagerung (entspricht Klimalagerung III bei Kolb und Frech (1977)) wurden die Bohrkerne/Bohrkernabschnitte in 4 aufeinanderfolgenden Zyklen je Zyklus jeweils einer 4tägigen Wasserlagerung bei 20 °C und einer 4tägigen Trockenlagerung bei 50 °C unterworfen. Nach Abschluss der 4 x 8 = 32tägigen Zykluslagerung erfolgte eine 5wöchige Lagerung im Normalklima 20 °C / 65% rel. LF. Die sodann trocken geprüften Proben wiesen im Mittel einen Feuchtegehalt von rd. 10,5 % - 12,7 % auf.

15.3 Anforderungen an die Scherfestigkeitsergebnisse nach unterschiedlichen Vorbehandlungen

Die Beurteilung der Versuchsergebnisse nach Trockenlagerung erfolgte nach den Kriterien der DIN EN 386. Bei der Feststellung des Holzfaserbruchanteils wurden die relevanten Ausführungen der DIN EN 391 berücksichtigt.

Die Bewertung der Ergebnisse der Nass-Scherfestigkeiten erfolgte in Anlehnung an die Ausführungen in Abschnitt 10.3.

Die Bewertung der Wiedertrocken-Scherfestigkeiten erfolgt in Anlehnung an die Anforderungen der EN 301 für die Lagerungsfolge A3²⁴. Bei Verklebungen mit Fugendicken von 0,1 mm und 1,0 mm Dicke sind in DIN EN 301 für die Lagerungsfolge A3 die Festigkeitsanforderungswerte 8 N/mm² und 6,4 N/mm² genannt, was jeweils 80 % des Anforderungswertes bei Trockenprüfung (Lagerungsfolge A1) entspricht. Dieser Prozentsatz wird auch hier im Folgenden zugrunde gelegt.

²⁴ Die Lagerungsfolge A3 nach EN 301 umfasst 7 Tage Aushärtezeit in 20 °C/65% rel. LF, anschließend 4 Tage Lagerung in kaltem Wasser, und sodann eine Rücktrocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 20 °C.

16 Ergebnisse von Klebfugendickenbestimmungen an Bohrkernen

Bei der Gebäudegruppe KF mit dem hohen Durchschnittsalter von rd. 47 Jahren und bei der Gebäudegruppe B mit einem mittleren Alter von rd. 21 Jahren wurden die Fugendicken aller sechs bzw. 13 Gebäude bestimmt. Aus der Gebäudegruppe C mit insgesamt 34 Gebäuden wurden nach Zufallsprinzip 12 Gebäude ausgesucht, an denen die Fugendickenmessungen vorgenommen wurden. Bei Nichtberücksichtigung eines Gebäudes mit dem sehr hohen Gebäudealter von 76 Jahren und eines Gebäudes (Nr. 1678) ohne genau bekanntes Gebäudealter lag das mittlere Gebäudealter der Stichprobe der Gebäudegruppe C übereinstimmend mit der Gebäudegruppe B bei 21 Jahren. Die Fugendicken wurden je Bauwerk der Gebäudegruppen KF und B an minimal sieben und im Regelfall an 10 Bohrkernen bestimmt. Bei der Gebäudegruppe C konnten in zwei Fällen nur Messungen an drei bzw. vier Bohrkernen durchgeführt werden. Je Bohrkern wurde durch Mehrfachmessung eine mittlere Fugendicke ermittelt.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Klebfugendickenmessungen sind getrennt für die Bauwerke der Gebäudegruppen KF, B und C in den Tabellen 16.1 bis 16.3 angegeben. In Tabelle 16.4 sind die Ergebnisse der einzelnen Gebäudegruppen zusammenfassend angegeben. Die mittlere Fugendicke der älteren Gebäudegruppe KF lag mit 0,25 mm deutlich über den mittleren Fugendicken der Gebäudegruppen B und C, die dort jeweils 0,19 mm betrug. Die Maximalwerte der Klebfugendicken der einzelnen Gebäude lagen bei den Gebäudegruppen KF, B und C bei 0,5 mm, 0,4 mm und 0,6 mm. Interessant ist, dass der Maximalwert der Fugendicken nicht bei den ältesten Gebäuden auftrat, sondern bei einem Gebäude (Nr. 1663) mit mittlerem Bauwerksalter von 34 Jahren. Allgemein gilt, dass Gebäude mit vergleichsweise hohen mittleren Fugendicken auch große Maximalwerte aufweisen. Insgesamt überraschend waren drei Sachverhalte:

- i) In keinem einzigen Fall lag die mittlere Klebfugendicke eines Gebäudes unter 0,1 mm, was nach heutigem Stand der Technik und vorherrschender Auffassung als Regel-Fugendicke gilt. Dieser Sachverhalt gilt auch für Gebäude mit sehr jungen Bauwerksaltern von lediglich sechs Jahren (sechs Gebäude der Gebäudegruppe B), die sehr einheitlich eine mittlere Fugendicke von 0,19 mm verbunden mit einer nahezu durchweg sehr niedrigen Streuung (Maximalwerte i.d.R. 0,2 mm) aufwiesen.

- ii) Die mittlere Fugendicke eines Gebäudes überstieg nur in einem einzigen Fall den Wert von 0,3 mm und sodann mit 0,33 mm nur gering. Gruppiert man die gemessenen Fugendicken in 0,05 mm Klassenbreiten, so waren insgesamt lediglich fünf Gebäude einer mittleren Fugendicke von 0,3 mm zuzuordnen.
- iii) Die Maximalwerte der gemessenen Klebfugendicken erreichten lediglich bei sieben von insgesamt 31 Gebäuden Werte von 0,4 – 0,6 mm.

Mit Blick auf den bekannten und hier in Abschnitt 8 für UF-Verklebungen unter idealen Laborbedingungen eindeutig belegten Sachverhalt einer abnehmenden Klebfugenfestigkeit, insbesondere der Nassfestigkeit, mit zunehmender Klebfugendicke ist der Nachweis, dass die Fugendicken der Bestandsbauten im Regelfall deutlich unter 0,5 mm liegen, als sehr positiv zu vermerken.

Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerkalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Fugendicken			
				Anzahl gemessener Fugendicken	Mittelwert	Standardabweichung	Maximalwert
	-	J	J	-	mm	-	mm
KF	1619	1962	46	10	0,33	0,07	0,40
	1627	1959	49	10	0,21	0,06	0,30
	1630	1964	44	10	0,20	0,05	0,30
	1631	1964	44	10	0,25	0,07	0,40
	1621	1958	51	10	0,27	0,12	0,50
	1612	1960	49	10	0,25	0,10	0,50
	Mittelwerte, Summe bzw. Maximalwert			47,2	60	0,25	0,08

Tabelle 16.1 Zusammenstellung der gemessenen Fugendicken an Bohrkernen der Bauwerke der Gebäudegruppe KF

Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl gemessener Fugendicken	Fugendicken		
					Mittelwert	Standardabweichung	Maximalwert
	-	J	J	-	mm	-	mm
B	1633	1968	41	10	0,18	0,06	0,30
	1356	1973	36	10	0,22	0,04	0,30
	1580	1979	30	10	0,20	0,07	0,30
	1587	1979	30	10	0,28	0,10	0,40
	1605	2002	6	7	0,20	0,06	0,30
	1606	2002	6	7	0,19	0,04	0,20
	1669	2002	6	10	0,18	0,04	0,20
	1670	2002	6	10	0,19	0,03	0,20
	1671	2002	6	10	0,18	0,04	0,20
	800	1975	34	10	0,17	0,05	0,20
	1640	1985	24	7	0,17	0,05	0,20
	1641	1989	20	7	0,16	0,05	0,20
	1642	1983	26	8	0,11	0,04	0,20
	Mittelwerte, Summe bzw. Maximalwert			20,8	116	0,19	0,05

Tabelle 16.2 Zusammenstellung der gemessenen Fugendicken an Bohrkernen der Bauwerke der Gebäudegruppe B

Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl gemessener Fugendicken	Fugendicken		
					Mittelwert	Standardabweichung	Maximalwert
	-	J	J	-	mm	-	mm
C	1634	1973	33	10	0,19	0,03	0,20
	1636	2002	4	10	0,14	0,05	0,20
	1639	1981	28	8	0,21	0,12	0,50
	1663	1972	34	6	0,28	0,16	0,60
	1678	1996	10	10	0,19	0,07	0,30
	1653	1993	13	3	0,13	0,06	0,20
	1658	1990	16	4	0,28	0,05	0,30
	1664	1980	27	10	0,21	0,03	0,30
	1661	1988	19	6	0,18	0,08	0,30
	1662	1930	76	8	0,18	0,05	0,20
	1678	n.b.	n.b.	6	0,12	0,04	0,20
	1681	1988	22	6	0,17	0,05	0,20
	Mittelwerte, Summe bzw. Maximalwert			25,6	87	0,19	0,07

Tabelle 16.3 Zusammenstellung der gemessenen Fugendicken an Bohrkernen der Bauwerke der Gebäudegruppe C

Gebäudegruppe	Fugendicken			
	Anzahl gemessener Fugendicken	Mittelwert	Standardabweichung	Maximalwert
-	-	mm	-	mm
KF	60	0,25	0,08	0,50
B	116	0,19	0,05	0,40
C	87	0,19	0,07	0,60

Tabelle 16.4 Zusammenfassung der Fugendicken der Gebäudegruppen KF, B und C

17 Chemische Untersuchungen an Bohrkernproben zur Bestimmung der Klebstofffabrikate

Die chemischen Untersuchungen dahingehend, ob die vorliegenden Klebefugen tatsächlich aus UF-Harzen bestehen sowie die Bestimmung spezieller Fabrikate erfolgte nahezu durchweg mittels IR-Spektroskopie. Die Bestimmung der Einzelfabrikate erfolgte durch Vergleich mit vorliegenden Spektren bekannter Zusammensetzungen. Die Spektren vormaliger, heute nicht mehr hergestellter UF-Harze bzw. spezieller Harz-Härter-Füllstoffkombinationen wurden anhand von Rückstellproben, die an der MPA Universität Stuttgart für nahezu alle alten UF-Harz-Konfigurationen vorliegen, bestimmt. Die Bilder 17.1 bis 17.5 zeigen exemplarisch einige IR-Spektren.

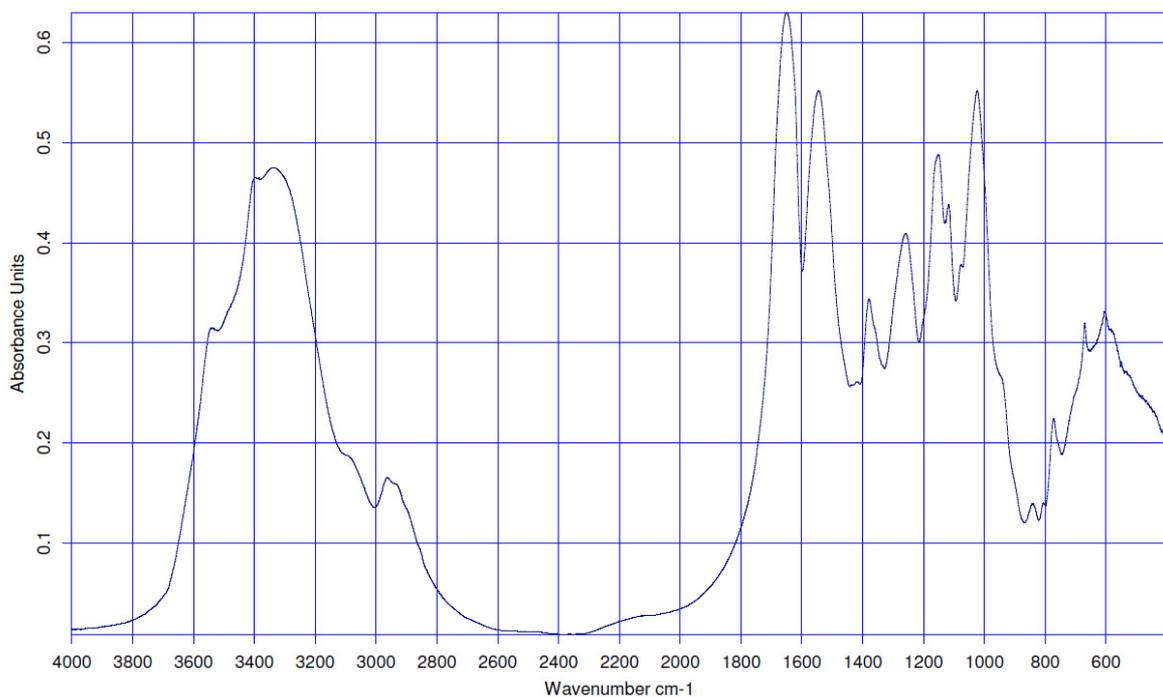


Bild 17.1 IR-Spektrum der UF-Klebstoffkonfiguration Kaurit 270 + Härter 70 + Walzit

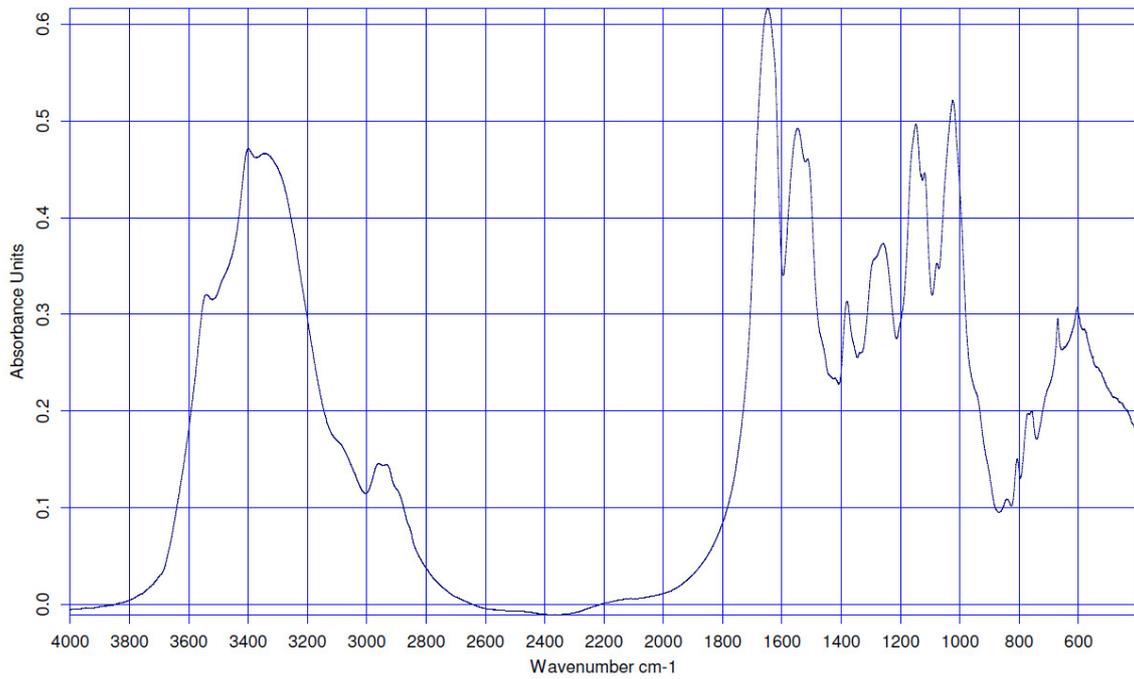


Bild 17.2 IR-Spektrum der UF-Klebstoffkonfiguration Kaurit 234 + Härter 30 + Walzit

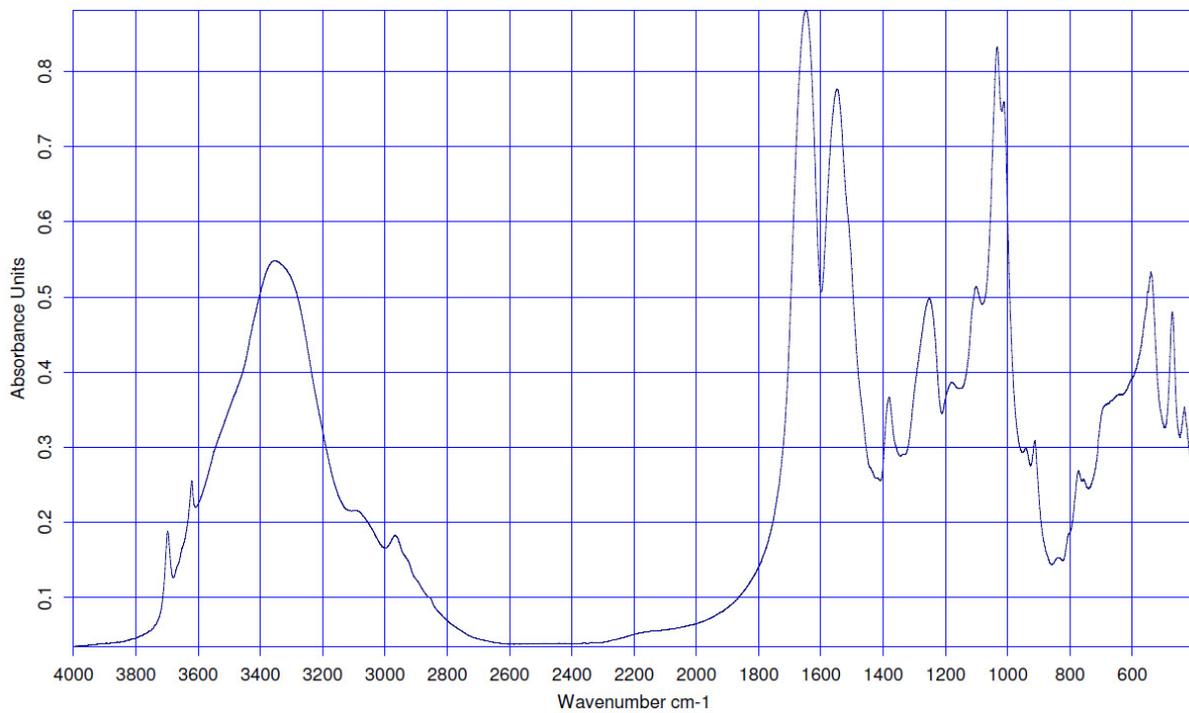


Bild 17.3 IR-Spektrum der UF-Klebstoffkonfiguration Synthekeo 1206

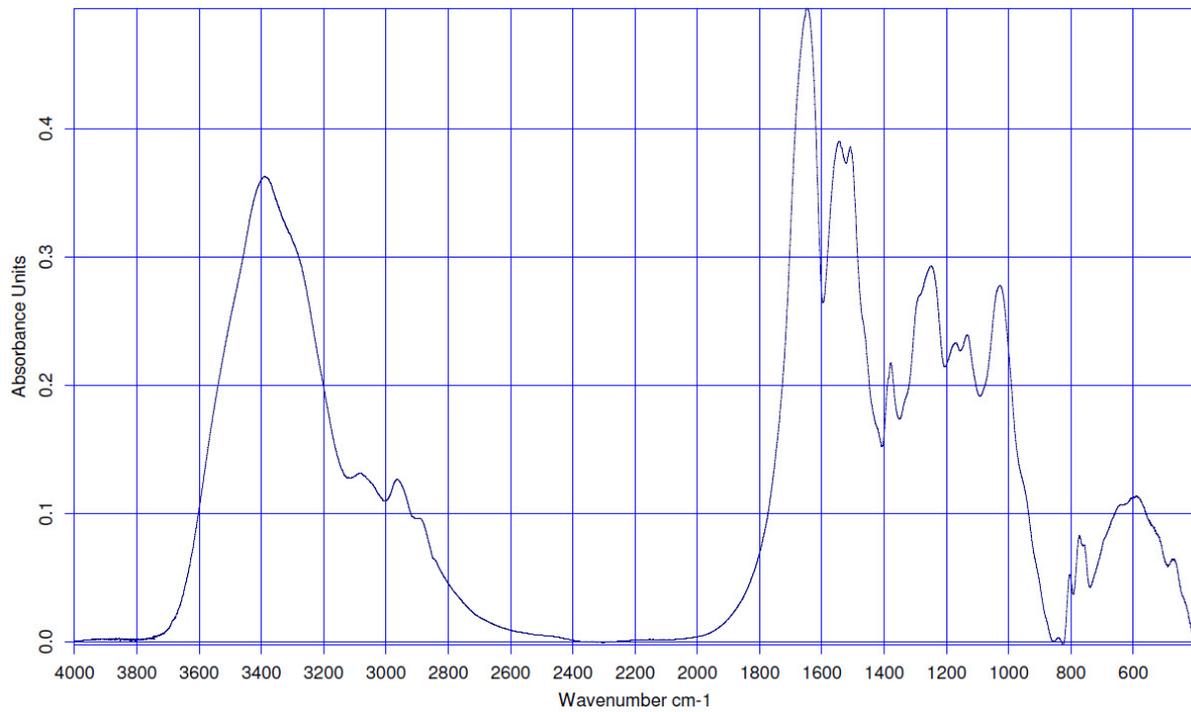


Bild 17.4 IR-Spektrum der UF-Klebstoffkonfiguration Kaurit WHK + Härter 70 (BASF 1968)

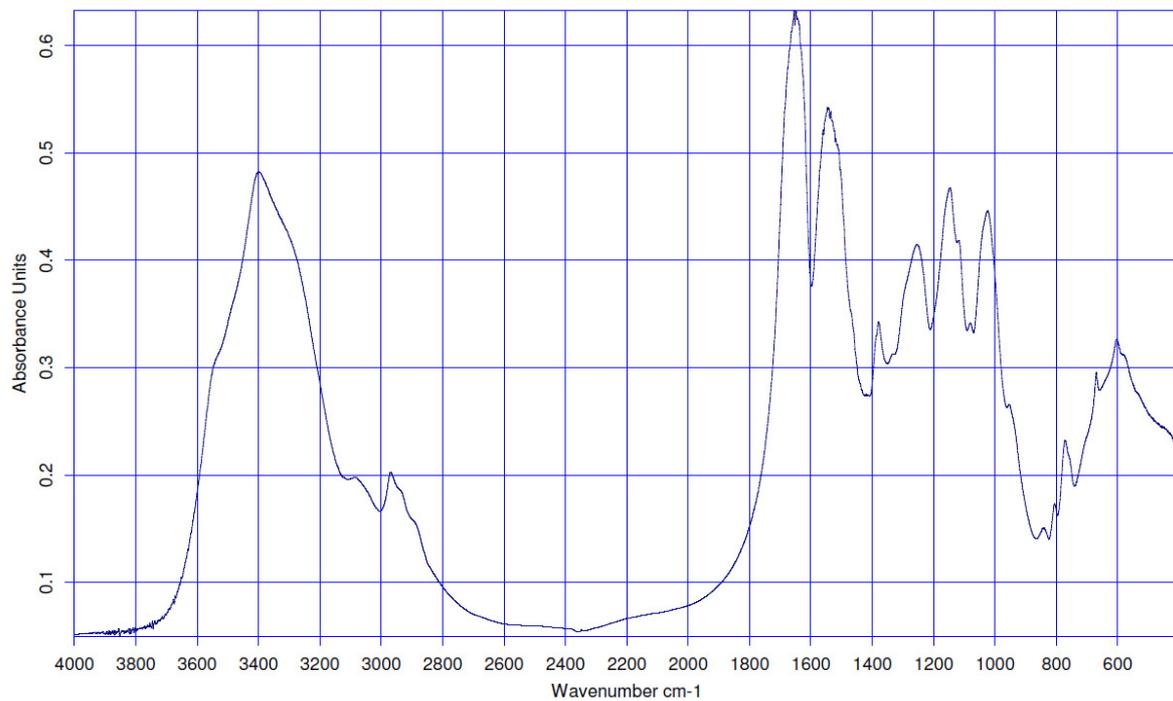


Bild 17.5 IR-Spektrum der UF-Klebstoffkonfiguration Kaurit 270 + Härter 70 + Walzit 250 (BASF 1975)

18 Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkern der Gebäudegruppe KF

18.1 Ergebnis-Zusammenstellungen

Die Tabellen F1 bis F18, Anhang F1 bis F18, enthalten die Einzelergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an den Bohrkernabschnitten der sechs Gebäude Nr. 1619 = B, Nr. 1627 = A, Nr. 1630 = F, Nr. 1631 = I, Nr. 1621 = C und Nr. 1612 = D der Gebäudegruppe KF, getrennt für die Klimalagerungsarten I, II und III.

Die Tabellen G1 bis G6, Anhang G1 bis G6, enthalten eine statistische Auswertung der Scherfestigkeiten und Faserbeläge jedes Bauwerks, getrennt nach Klimalagerungsart und Lage der Bohrkernabschnitte, die bei den Lagerungsarten I und II, alternierend am Träger-
rand (Position = a) bzw. im Trägerinneren (Position = i) gelegen sein können.

Die Tabellen E1 bis E6, Anhang E1 bis E6, enthalten eine Gegenüberstellung der Scherfestigkeitsergebnisse der „neuen“ Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit den „alten“ Ergebnissen von Kolb und Frech. Die Gegenüberstellung erfolgt je Bauwerk für die Gesamtheit aller Bohrkernabschnitte bei den jeweiligen Lagerungen und getrennt für die außen- und innenliegenden Bohrkernabschnitte a und i.

Die Tabelle 18.1 enthält in komprimierter Form die wichtigsten Scherfestigkeitsergebnisse²⁵ der „neuen“ Untersuchungen an den sechs Gebäuden der Gebäudegruppe KF im Vergleich mit den vormalig von Kolb und Frech (1977) erhaltenen „alten“ Resultaten.

²⁵ Alle Scherfestigkeiten wurden gemäß den Gln. (10.1) und (10.2) unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors k für eine Scherflächenlänge in Last/Faserrichtung < 50 mm bestimmt. Dieser Größeneinfluss-Korrekturfaktor lag bei den seinerzeitigen Ergebnisauswertungen von Kolb und Frech noch nicht vor, d. h. die von Kolb und Frech (1977; 1978) angegebenen Werte sind unkorrigierte Scherfestigkeiten f_v mit impliziter Unterstellung eines Größenfaktors $k = 1,0$. Um einen unmittelbaren Vergleich mit den Literaturwerten zu ermöglichen, sind in Tabelle 18.2 die „alten“ und die „neuen“ Scherfestigkeiten f_v^* , jeweils unter Ansatz von $k = 1,0$ angegeben. Es ist darauf hinzuweisen, dass Festigkeitsverhältnisse zwischen den „alten“ und „neuen“ Werten weitestgehend unabhängig davon sind, ob die korrigierten oder unkorrigierten Scherfestigkeiten f_v bzw. f_v^* zugrunde gelegt werden, da die Bohrkerngrößen und die Größen der hieraus hergestellten Bohrkernabschnitte bzw. Scherflächen bei den „alten“ und „neuen“ Untersuchungen nominell gleich waren, was weitestgehend auch die effektiven Abmessungen betrifft. Die Scherlänge t betrug bei den „alten“ und „neuen“ Untersuchungen nominell einheitlich 25 mm, womit der Korrekturfaktor k nominell 0,886 beträgt. Mit Ausnahme der Tabelle 18.2 und der Tabelle 6.5 im Literatur-Auswertungsabschnitt 6.4 sind alle im Text sowie in den Beilagen und Anhängen aufgeführten Scherfestigkeiten f_v unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors k gemäß Gl. (10.2) bestimmt.

Im Einzelnen sind für die Trocken-, Nass- und Wiedertrocken- Scherfestigkeiten der einzelnen Gebäude und der Gesamtheit aller Bauwerke die Mittelwerte, Minimalwerte und 5% - Quantilwerte sowie die Anzahl der entnommenen Bohrkerne und der jeweils geprüften Bohrkernabschnitte angegeben.

Die Tabelle 18.3 gibt die prozentualen Veränderungen der „neuen“ Scherfestigkeitsergebnisse gegenüber den vormaligen Resultaten von Kolb und Frech wieder.

Die Tabelle 18.4 enthält für die „alten“ und „neuen“ Scherfestigkeitsprüfungen die Verhältniswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten ($f_{v,nass}/f_{v,trocken}$) bzw. der Wiedertrocken- zu den Trockenscherfestigkeiten ($f_{v,re-dry}/f_{v,trocken}$). Die Verhältniswerte sind für das Mittelwertniveau sowie für das Minimal- und 5%-Quantil-Level angegeben. Die in den Tabellen 18.1 und 18.4 für das Mittelwertniveau angegebenen Festigkeiten bzw. Festigkeitsverhältnisse sind in den Bildern 18.1 a-c und 18.2a,b graphisch veranschaulicht.

Bauwerks-Nr. (Bez. in [1]) [Baujahr]	Zeitpunkt der Untersuchung	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkern	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v, trocken}^*$				Nass-Scherfestigkeit $f_{v, nass}^*$				Wiedertrocken-Scherfestigkeit $f_{v, re-dry}^*$						
				Anzahl gepr. BK-Abschnitte	X_{mean} N/mm ²	X_{min} N/mm ²	X_{05} N/mm ²	Anzahl gepr. BK-Abschnitte	X_{mean} N/mm ²	X_{min} N/mm ²	X_{05} N/mm ²	Anzahl gepr. BK-Abschnitte	X_{mean} N/mm ²	X_{min} N/mm ²	X_{05} N/mm ²			
-	J	J	-															
1619 (B) [1962]	1977	15	18	7,12	4,93	5,13	18	7,12	4,93	5,13	18	7,12	4,93	5,13	18	7,06	3,23	4,78
	2008/9	46	27	7,14	4,37	4,62	27	7,14	4,37	4,62	27	3,60	1,10	2,11	27	8,61	2,60	3,24
1627 (A) [1959]	1977	18	17	8,24	5,92	6,30	17	8,24	5,92	6,30	15	5,41	4,03	4,21	16	8,12	4,47	5,54
	2008/9	49	16	8,33	4,16	6,09	16	8,33	4,16	6,09	16	4,54	2,95	3,54	15	8,63	2,47	5,78
1630 (F) [1964]	1977	13	17	8,04	4,87	5,24	17	8,04	4,87	5,24	17	5,27	4,45	4,49	15	6,76	4,43	4,76
	2008/9	44	18	7,55	4,38	5,13	18	7,55	4,38	5,13	17	3,65	1,28	2,35	12	6,97	3,51	3,89
1631 (I) [1964]	1977	13	14	7,32	5,73	6,11	12	7,32	5,73	6,11	13	4,60	3,65	3,80	11	6,12	3,72	3,99
	2008/9	44	16	7,05	3,95	4,95	16	7,05	3,95	4,95	16	3,80	3,21	3,30	14	5,31	2,23	2,59
1621 (C) [1958]	1977	19	19	8,44	6,50	6,86	19	8,44	6,50	6,86	19	5,39	4,10	4,64	18	7,16	4,42	5,13
	2008/9	51	20	9,11	5,92	6,29	20	9,11	5,92	6,29	20	4,22	3,20	3,60	20	7,66	3,94	5,51
1612 (D) [1960]	1977	17	14	9,27	4,67	5,61	14	9,27	4,67	5,61	14	5,53	4,72	4,73	12	7,93	5,22	6,05
	2008/9	49	15	8,58	3,00	3,79	15	8,58	3,00	3,79	14	4,19	3,40	3,43	13	6,68	1,20	1,24
Mittelwerte aller Bauwerke	1977	16	17	8,07	5,44	5,88	16	8,07	5,44	5,88	16	5,25	4,20	4,39	15	7,19	4,25	5,04
	2008/9	47	19	7,96	4,30	5,15	19	7,96	4,30	5,15	18	4,00	2,52	3,06	17	7,31	2,66	3,71

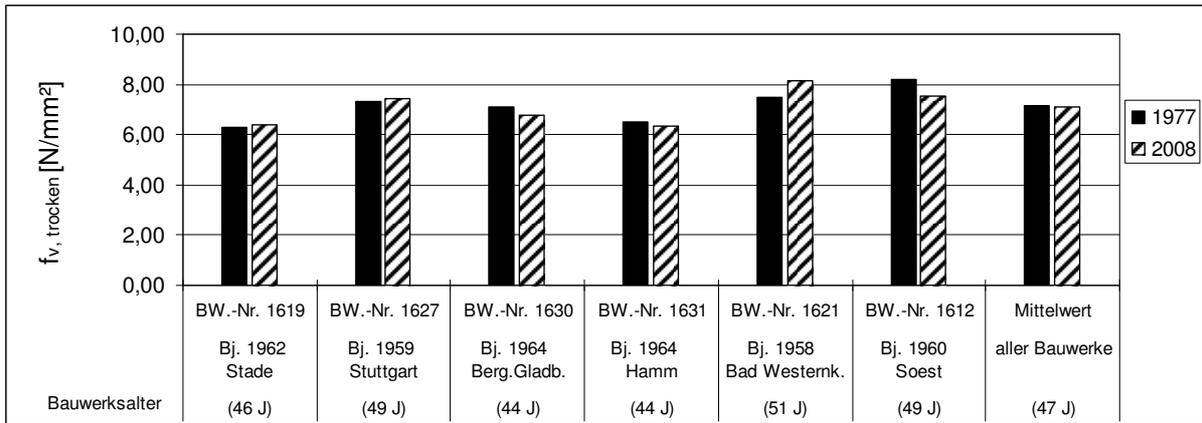
Tabelle 18.2 Scherfestigkeitsergebnisse f_v^* nach Trocken-, Nass- und Wiedertrockenlagerung „neuer“ Bohrkernuntersuchungen (Jahre 2008/2009) an sechs Gebäuden der Gebäudegruppe KF im Vergleich mit vormalig von Kolb und Frech (1977) erhaltenen „alten“ Resultaten. Anmerkung: bzgl. f_v^* vgl. Fußnote 25

Bauwerks-Nr. (Bez. in [1])	Verhältniszerte der Festigkeiten zufolge "neuer" Untersuchungen 2008 im Vergleich zu den "alten" Ergebnissen von 1977								
	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v,trocken}$			Nass-Scherfestigkeit $f_{v,nass}$			Wiedertrocken-Scherfestigkeit $f_{v,re-dry}$		
	X_{mean}	X_{min}	X_{05}	X_{mean}	X_{min}	X_{05}	X_{mean}	X_{min}	X_{05}
-									
1619 (B)	1,01	0,89	0,91	0,69	0,26	0,48	1,23	0,81	0,69
1627 (A)	1,02	0,71	0,97	0,85	0,74	0,85	1,07	0,56	1,05
1630 (F)	0,95	0,91	0,99	0,70	0,29	0,53	1,04	0,80	0,83
1631 (I)	0,98	0,70	0,82	0,84	0,86	0,87	0,79	0,54	0,58
1621 (C)	1,09	0,90	0,93	0,79	0,79	0,77	1,08	0,90	1,08
1612 (D)	0,92	0,64	0,67	0,75	0,72	0,72	0,85	0,23	0,21
Mittelwerte	0,99	0,79	0,88	0,77	0,61	0,70	1,01	0,64	0,74

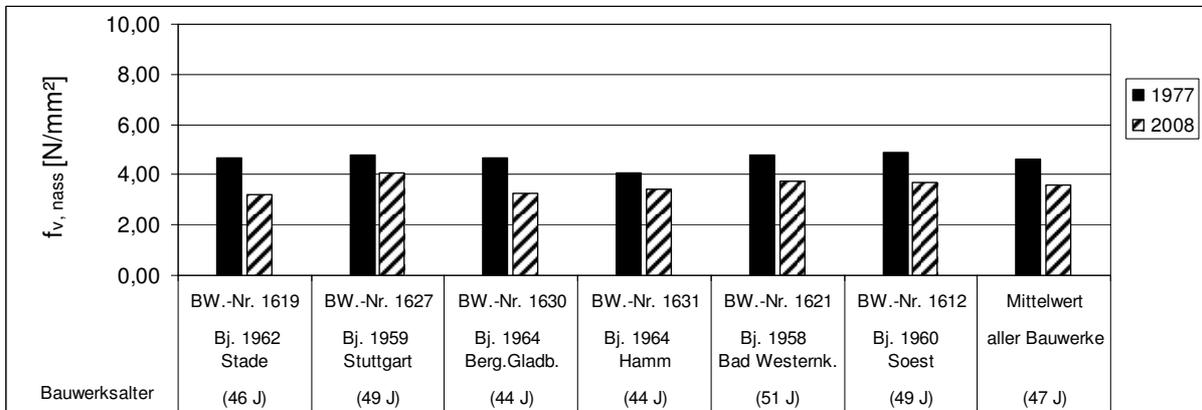
Tabelle 18.3 Verhältniszerte der Scherfestigkeiten der Gebäudegruppe KF zufolge „neuer“ Untersuchungen (Jahre 2008/2009) im Vergleich zu den „alten“ Ergebnissen aus dem Jahr 1977

Bauwerks-Nr. (Bez. in [1]) [Baujahr]	Zeitpunkt der Untersuchung	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der untersuchten Bohrkörner n_{all}	Scherfestigkeitsverhältnisse							
				$\frac{f_{v,nass}}{f_{v,trocken}}$				$\frac{f_{v,re-dry}}{f_{v,trocken}}$			
				X_{mean}	X_{min}	X_{05}	$X_{05,ln}$	X_{mean}	X_{min}	X_{05}	$X_{05,ln}$
-	J	J	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1619 (B) [1962]	1977	15	18	0,74	0,86	0,87	0,83	0,99	0,65	0,93	0,84
	2008/9	46	27	0,50	0,25	0,46	0,43	1,21	0,60	0,70	0,87
1627 (A) [1959]	1977	18	17	0,66	0,68	0,67	0,67	0,99	0,75	0,88	0,89
	2008/9	49	16	0,55	0,71	0,58	0,58	1,04	0,59	0,95	0,78
1630 (F) [1964]	1977	13	17	0,65	0,91	0,86	0,76	0,84	0,91	0,91	0,82
	2008/9	44	18	0,48	0,29	0,46	0,40	0,92	0,80	0,76	0,79
1631 (I) [1964]	1977	13	14	0,63	0,64	0,62	0,60	0,84	0,65	0,65	0,65
	2008/9	44	16	0,54	0,79	0,66	0,63	0,68	0,50	0,46	0,47
1621 (C) [1958]	1977	19	19	0,64	0,63	0,68	0,66	0,85	0,68	0,75	0,76
	2008/9	51	20	0,46	0,55	0,56	0,54	0,84	0,68	0,87	0,73
1612 (D) [1960]	1977	17	14	0,60	1,01	0,84	0,82	0,85	1,12	1,08	1,03
	2008/9	49	15	0,49	1,14	0,90	0,82	0,79	0,41	0,33	0,42
Mittelwerte aller Bauwerke	1977	16	17	0,65	0,79	0,76	0,72	0,89	0,79	0,87	0,83
	2008/9	47	19	0,50	0,62	0,60	0,57	0,91	0,60	0,68	0,68

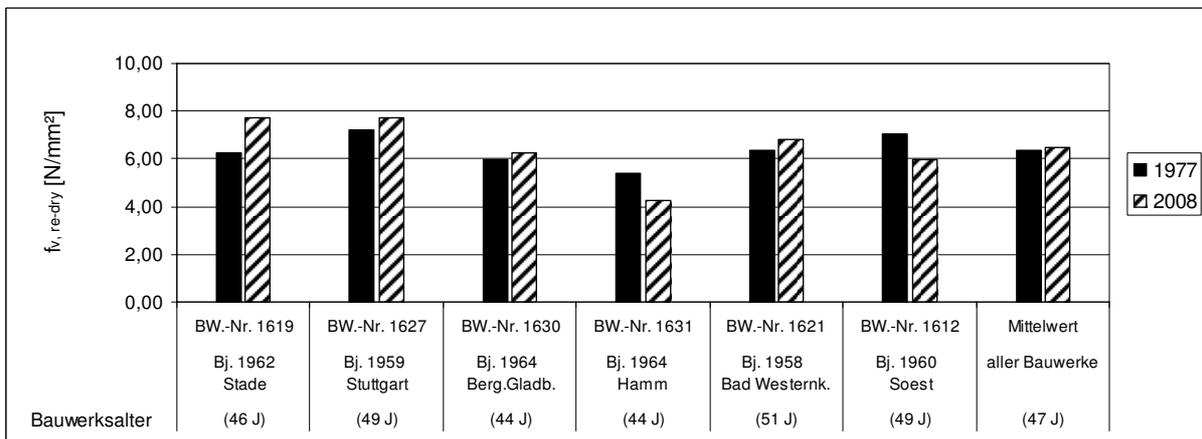
Tabelle 18.4 Verhältniszerte der Nass- bzw. Wiedertrocken-Scherfestigkeiten, $f_{v,nass}$ bzw. $f_{v,re-dry}$, bzgl. der Trockenscherfestigkeit $f_{v,trocken}$ der Gebäudegruppe KF zu unterschiedlichen Bauwerksaltern bzw. Untersuchungszeitpunkten



a)



b)



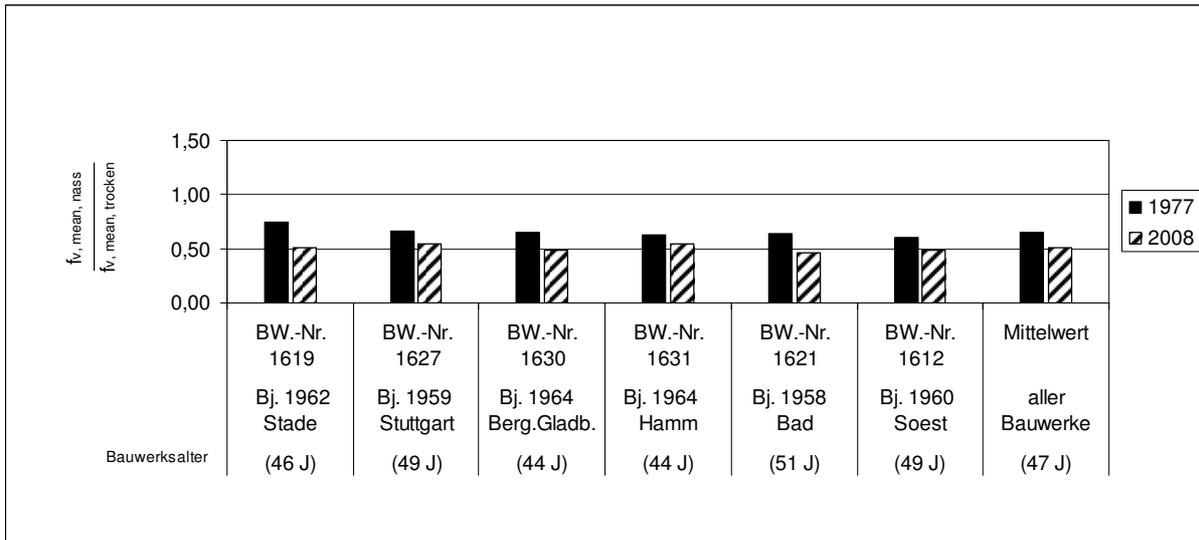
c)

Bild 18.1a-c: Vergleichende Darstellung der Scherfestigkeitsmittelwerte der „alten“ und „neuen“ Bohrkern-Untersuchungen an den sechs im Forschungsvorhaben untersuchten Gebäuden der Gebäudegruppe KF

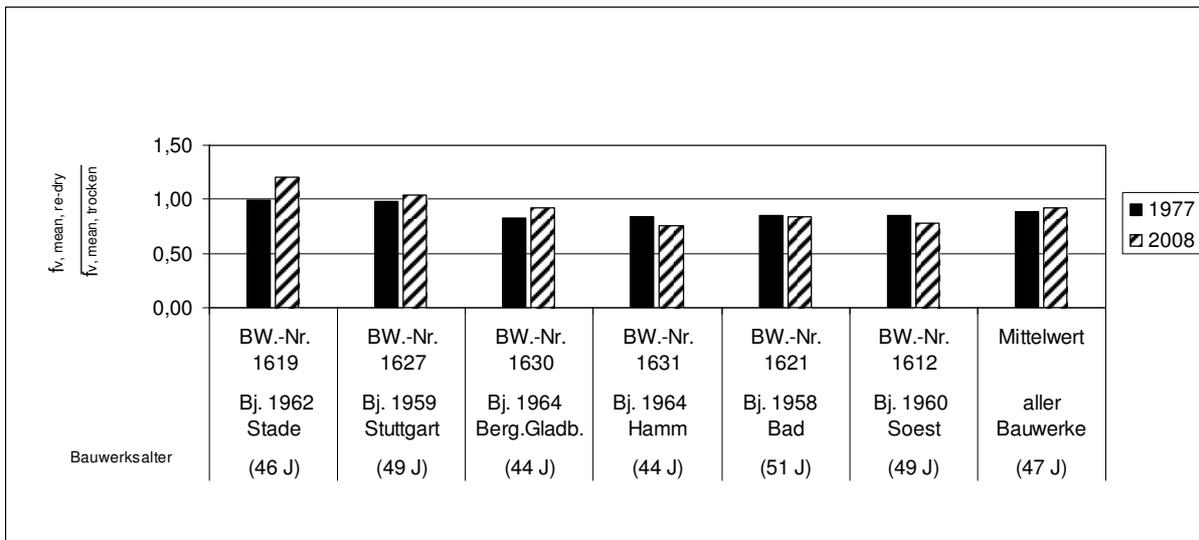
a) Trocken-Scherfestigkeiten

b) Nass-Scherfestigkeiten

c) Wiedertrocken-Scherfestigkeiten



a)



b)

Bild 18.2a,b: Vergleichende Gegenüberstellung der Verhältniswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten bzw. von Wiedertrocken- zu Trocken-Scherfestigkeiten bei den sechs Gebäuden der Gebäudegruppe KF zufolge „alter“ und „neuer“ Untersuchungen

18.2 Diskussion der „alten“ und „neuen“ Trockenscherfestigkeiten

Wie aus den vorstehend genannten Tabellen und Bildern ersichtlich, stimmen die bei den „neuen“ und „alten“ Untersuchungen auf der Grundlage nahezu gleicher Anzahlen von Bohrkernabschnitten (Ausnahme: Gebäude 1619) bestimmten Trockenscherfestigkeiten bei den

einzelnen Bauwerken erstaunlich gut überein. Bei den jeweiligen Bauwerken lagen die Abweichungen der Mittelwerte der „neuen“ Untersuchungen bezüglich der Ergebnisse der „alten“ Untersuchungen im Bereich von -8,0 % bis + 9 %. Es bleibt festzuhalten, dass die benannten extremalen Abweichungen, die Festigkeitsabnahmen bzw. -zunahmen zuzuordnen sind, bei den beiden ältesten untersuchten Bauwerken mit 49 bzw. 51 Jahren erhalten wurden. Im Mittel aller sechs Bauwerke blieb die mittlere Trockenscherfestigkeit mit einem Wert von 7,1 N/mm² („neue“ Untersuchungen) gegenüber 7,2 N/mm² („alte“ Untersuchungen im Jahr 1977) im Grunde unverändert (Änderung < 1%).

Betrachtet man die Minimalwerte und die 5%-Quantilwerte der Trockenscherfestigkeiten der einzelnen Gebäude so ist, abweichend von der vorstehend genannten Konstanz der mittleren Festigkeitswerte festzustellen, dass sich beide statistischen Kenngrößen nicht unwesentlich zu niedrigeren Werten hin verändert haben. Die Minimalwerte der einzelnen Gebäude liegen bei den „neuen“ Untersuchungen um rd. 10 % bis 36 % unter den früheren Minimalwerten, womit sich im Mittel eine Absenkung des Minimalwertniveaus der Trockenscherfestigkeit von rd. 21 % ergibt. Bei den 5%-Quantilen der Trockenscherfestigkeiten liegen qualitativ ähnliche Verhältnisse wie bei den Minimalwerten vor, wobei die Abminderungen quantitativ geringer ausgeprägt sind. Bei den einzelnen Bauwerken liegen die 5%-Quantilwerte der Trockenscherfestigkeiten der „neuen“ Untersuchungen um rd. 1 % bis 33 % unter den „alten“ Werten und im Mittel aller Bauwerke liegt der x_{05} -Wert der „aktuellen“ Trockenscherfestigkeit um rd. 12 % unter dem x_{05} - Mittelwert der „alten“ Untersuchungen.

18.3 Diskussion der „alten“ und „neuen“ Nass-Scherfestigkeiten

Im Gegensatz zu den Trockenscherfestigkeiten liegen die auf der Grundlage nahezu gleicher Anzahlen von Bohrkernabschnitten (Ausnahme: Gebäude 1619) bestimmten „neuen“ Nass-Scherfestigkeiten bezüglich aller relevanten Verteilungsgrößen (Mittelwert, Minimal- und 5%-Quantilwert) bei den einzelnen Bauwerken und damit auch bei dem zusammengefassten Kollektiv aller Bauwerke durchweg unter den Werten der „alten“ Untersuchungen.

Die „neuen“ mittleren Nass-Scherfestigkeiten liegen abhängig vom jeweiligen Bauwerk zwischen 16 % bis 31 % unter den „alten“ Mittelwerten und sind im Gesamt-Mittel um rd. 23 % niedriger. Die Abweichungen hin zu alterungsbedingt kleineren Festigkeiten sind bei den Minimal- und 5 %-Quantilwerten der jeweiligen Bauwerke sowie im Mittel der Bauwerke noch deutlich ausgeprägter. Die „neuen“ Minimalwerte der Nass-Scherfestigkeiten liegen im Mittel

aller Bauwerke um rd. 40 % unter dem „alten“ mittleren Minimalwert der Nass-Scherfestigkeit (bei den einzelnen Bauwerken liegen die „neuen“ Minimalwerte zwischen 14 % bis 74 % niedriger). Vergleichbar, jedoch absolut mit etwas geringeren Abschlägen, liegen die 5%-Quantilwerte der „neuen“ Nass-Scherfestigkeiten der Einzelbauwerke um 13 % bis 52 % unter den „alten“ Werten; der mittlere „neue“ 5%-Quantilwert der Nass-Scherfestigkeit liegt um 30 % unter dem „alten“ Wert.

Die mit Abstand größten Abnahmen der Nass-Scherfestigkeiten wurden bei den Gebäuden mit der lfd. Bauwerk Nr. 1619 (= Salzlagerhalle in Stade) und der Nr. 1630 (heute klimatisierte Lagerhalle in Bergisch-Gladbach) erhalten. Bei beiden Bauwerken nahmen die Mittel-, 5%-Quantil- und Minimalwerte der Nass-Scherfestigkeiten jeweils um rd. 30 %, 50 % bzw. 70 % ab. Vergleicht man die Minimal- und 5% -Quantilwerte der „neuen“ Nass-Scherfestigkeiten der Bauwerke Nr. 1619 und Nr. 1630 mit den Ergebnissen der übrigen Bauwerke, so liegen die Festigkeiten der beiden vorstehend genannten Bauwerke wesentlich niedriger. So wurden für das Bauwerk Nr. 1619 die Werte $f_{v,min} = 0,99 \text{ N/mm}^2$ bzw. $f_{v,05} = 1,89 \text{ N/mm}^2$ erhalten und für das Bauwerk Nr. 1630 ergaben sich die Werte $f_{v,min} = 1,15 \text{ N/mm}^2$ bzw. $f_{v,05} = 2,10 \text{ N/mm}^2$. Die absolute Höhe der Nass-Scherfestigkeitswerte der beiden speziellen Gebäude liegt sicherheitsrelevant auf einem eindeutig zu niedrigen Niveau (siehe hierzu auch Abschnitt 24, Schlussfolgerungen), sofern nicht durchgängig trockene Klima-Nutzungsbedingungen gewährleistet werden können (wegen des Abrisses des Bauwerks Nr. 1619 nur noch für das Bauwerk 1630 relevant).

Die BSH-Bauteile des Bauwerks Nr. 1619, das über 40 Jahre als Salzlagerhalle gedient hatte, wiesen bei der eingehenden Begutachtung keine nennenswerten Schäden auf. Die gemessenen Holzfeuchten lagen infolge des hygroskopischen Lagergutes und vermutlichen, zumindest teilweisen Salzniederschlägen/-absorptionen auf bzw. an den Trägeroberflächen sehr hoch im Bereich von 16 % bis 48 %, vgl. Anhänge X-1 und X-2. Zuzufolge der chemischen Analyse der Klebfugen erfolgte die Verklebung der BSH-Lamellen wahrscheinlich (bester Fit mit den IR-Banden der Referenzspektren) mittels des UF-Klebstoffs Kauritleim W 234 in Verbindung mit dem Härter 30 und dem Streckmittel Walzit. Der genannte Mehl-gestreckte Klebstoff weist speziell bei dickeren Fugen (sicher ab 0,5 mm, wahrscheinlich aber bereits bei dünneren Fugen ab rd. 0,3 mm) eine ausgeprägte alterungsbedingte Abnahme der Nass-Scherfestigkeit auf (vgl. Abschnitte 5.2 und 6.2).

Das Bauwerk Nr. 1630 wird heute als klimatisierte Lagerhalle verwendet (vgl. Anhänge X-5 und X-6). Der bauliche Zustand der BSH-Vollwandträger ist abgesehen von Rissen im Be-

reich von Anschlüssen im Wesentlichen als gut zu bezeichnen. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen lagen die gemessenen Holzfeuchten, typisch für beheizte Lagerhallen, im Bereich von 7 % - 9 %. Vor der heutigen Nutzung erfolgte im Jahr 2007 eine Schimmelpilzsanierung an einigen Trägern, die offensichtlich länger andauernd einer hohen Feuchtebeanspruchung ausgesetzt waren. Zuzufolge chemischer Analyse der Bohrkern-Klebefugen wurden die Bauteile dieses Bauwerks ebenfalls mit dem auch bei dem Bauwerk Nr. 1619 verwendeten Kaurit-leim W 234 (wahrscheinlich mit Härter 30 und Streckmittel Walzit) verklebt.

18.4 Verhältniswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten

Betrachtet man die in Tabelle 18.4 angegebenen Verhältniswerte von Nass-Scherfestigkeit $f_{v,nass}$ zu Trockenscherfestigkeit $f_{v,trocken}$, die getrennt für die „alten“ und „neuen“ Untersuchungen angegeben sind, so sind deutliche Veränderungen zu konstatieren. Diese resultieren aus dem vorstehend dargelegten Sachverhalt der weitgehend unveränderten Trockenscherfestigkeiten und der deutlich verringerten Nass-Scherfestigkeiten, womit nunmehr bei den „neuen“ Versuchen die Nass- zu Trockenscherfestigkeitsverhältnisse deutlich niedriger liegen als bei der vormaligen Auswertung von Kolb und Frech im Jahre 1977 (vgl. hierzu auch Tabelle 6.5, Abschnitt 6.4).

Bei den „alten“ Versuchen wurde im Mittel aller acht seinerzeit untersuchten Bauwerke A-I ein $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältnis von 0,65 erhalten; der genannte Wert gilt auch bei ausschließlicher Betrachtung der Teilmenge der sechs Gebäude A-D, F und I, die anlässlich der vorliegenden Untersuchung begutachtet wurden (vgl. Tabelle 18.4). Bei den „neuen“ Untersuchungen wurde nunmehr im Mittel aller sechs Gebäude ein mittlerer Verhältniswert $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ von lediglich 0,50 erhalten. Vergleichbar haben sich auch die Festigkeitsverhältnisse bei den Minimal- und 5%-Quantilwerten zu niedrigeren Werten hin verschoben. Während bei den „alten“ Versuchen die Mittelwerte (sechs Gebäude A-D, F und I) der Minimal- und 5%-Quantilwerte der $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältniswerte 0,79 bzw. 0,76 betragen, so liegen die „neuen“ Verhältniswerte bei 0,62 bzw. 0,60. Auf allen relevanten Festigkeitsniveaus (x_{mean} , x_{min} und x_{05}) liegen die „neuen“ $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältniswerte im Mittel aller Gebäude somit um rd. 20 % niedriger.

Betrachtet man die $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältniswerte der einzelnen Bauwerke, so ist bezüglich der vorstehend bereits genannten Gebäude Nr. 1619 und Nr. 1630 mit außergewöhnlich großen Verringerungen der Nass-Scherfestigkeit ein weiterer interessanter Sachverhalt festzustellen. Bei allen Bauwerken, ausgenommen die Bauwerke Nr. 1619 und Nr. 1630, liegen

die $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältnismerte auf dem Minimalwert- und auf dem 5%-Quantilwertniveau überwiegend deutlich über (oder gleich) den Verhältnismerten auf dem Mittelwertniveau. Dies gilt sowohl für die „alten“ wie für die „neuen“ Untersuchungen. Bei den Bauwerken Nr. 1619 und 1630 galt der vorstehend genannte Sachverhalt bei den „alten“ Versuchen in deutlicher Ausprägung ebenfalls. Im Gegensatz dazu ergaben sich bei den „neuen“ Versuchen Minimalwertverhältnisse von 0,25 bzw. 0,29 (Bauwerk Nr. 1619 bzw. Nr. 1630), die nunmehr extrem unterhalb den zugeordneten Mittelwertverhältnissen von 0,50 bzw. 0,48 liegen. Desgleichen ist der Unterschied die Veränderung des Minimalwertverhältnisses $f_{v,nass,min}/f_{v,trocken,min}$ zwischen „alten“ und „neuen“ Versuchen im Vergleich zu den anderen Bauwerken extrem ausgeprägt (jeweils Bauwerke Nr. 1619 und 1630; „alte“ Versuche: 0,86 und 0,91; „neue“ Versuche: 0,25 bzw. 0,29).

18.5 Diskussion der „alten“ und „neuen“ Wiedertrocken-Scherfestigkeiten

Die Anzahl der geprüften Bohrkernabschnitte entsprach bei den „neuen“ Untersuchungen wie bereits bei den Trocken- und Nass-Scherfestigkeitsprüfungen mit Ausnahme des Gebäudes Nr. 1619 den „alten“ Untersuchungen. Die Wiedertrocken-Scherfestigkeiten $f_{v,re-dry}$ der „neuen“ und „alten“ Untersuchungen stimmten im Mittel aller Bauwerke (= ungewichtetes Mittel der Mittelwerte der Einzelbauwerke) mit einer unwesentlichen Abweichung von lediglich 1,4 % erstaunlich gut überein. Die Abweichungen zwischen den „alten“ und „neuen“ Wiedertrocken-Mittelwerten der einzelnen Bauwerke variierten im Vergleich zu den Trockenscherfestigkeiten deutlich ausgeprägter im Bereich von -21 % bis +23 % (Bezugswert: „alte“ Untersuchungen).

Bei den Minimal- und 5%-Quantilwerten der $f_{v,re-dry}$ -Werte der Einzelbauwerke lagen die Abweichungen zwischen den „neuen“ und „alten“ Ergebnissen im Vergleich zu den Mittelwertergebnissen wesentlich höher. Im Falle der Minimalwerte variierten die Abweichungen zwischen den „alten“ und „neuen“ Untersuchungen bei den Einzelbauwerken von -10 % bis -77 % und der mittlere Minimalwert der „neuen“ Wiedertrockenscherfestigkeit lag um rd. 36 % unter dem Ergebnis der „alten“ Untersuchungen. Es bleibt festzuhalten, dass die „neuen“ Minimalwerte der Wiedertrockenscherfestigkeit bei allen Bauwerken - unterschiedlich ausgeprägt - immer unter den Ergebnissen der „alten“ Untersuchungen lagen.

In absolut leicht abgeschwächter Form und mit verminderter Streuung trifft der für die Minimalwerte ausgeführte Sachverhalt auch für die 5%-Quantilwerte zu. Im Gegensatz zu den

Minimalwerten weichen nunmehr nicht alle „neuen“ 5 %-Quantilwerte der Wiedertrocken-Scherfestigkeiten zu kleineren Werten bezüglich der „alten“ Untersuchungen ab; die Abweichungen zwischen „alten“ und „neuen“ Untersuchungen variieren zwischen -79 % und +8 % (Bezugswerte: „alte“ Untersuchungen). Im Mittel aller Bauwerke liegt der „neue“ 5%-Quantilwert um rd. 26 % unter den Ergebnissen der vormaligen Untersuchungen von Kolb und Frech.

Zur Verminderung der Minimal- und 5%-Quantilwerte der Wiedertrocken-Scherfestigkeiten bei gleichbleibendem Mittelwertniveau tragen insbesondere die festzustellenden Mikroriss-Ausbildungen im Holz-Klebstoff-Interface im Laufe der Rücktrochnungsperioden bei. Diese gegenüber den „alten“ Untersuchungen erhöhte Rissbildungstendenz hängt mit hoher Wahrscheinlichkeit primär mit einem Alterungsverhalten des Holzes selbst und weniger mit einer Degradation der wiedergetrockneten Klebefuge zusammen.

18.6 Verhältniswerte von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeiten

Betrachtet man die in Tabelle 18.4 angegebenen Verhältniswerte von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeit $f_{v, re-dry}/f_{v, trocken}$, die getrennt für die „alten“ und „neuen“ Untersuchungen angegeben sind, so ergeben sich im Mittel aller Bauwerke (Grundlage: ungewichtete Mittelwerte der Einzelbauwerke) auf dem Mittelwertniveau keine nennenswerte Unterschiede zwischen den Ergebnissen der „alten“ und „neuen“ Untersuchungen. Dies folgt anschaulich aus dem Sachverhalt, dass sich weder der Gebäudemittelwert der Trockenscherfestigkeit noch der Gebäudemittelwert der Wiedertrocken-Scherfestigkeit bei den „neuen“ gegenüber den „alten“ Untersuchungen geändert hat. Im Mittel aller Bauwerke liegt die Wiedertrocken-Scherfestigkeit bei den „alten“ und „neuen“ Untersuchungen um rd. 10% unter der Trockenscherfestigkeit.

Betrachtet man die $f_{v, re-dry}/f_{v, trocken}$ -Verhältniswerte auf dem Niveau der Minimal- und 5 %-Quantilwerte, so erhält man im Sinne vorstehender Ausführungen zwangsläufig einen geänderten Sachverhalt. Im Vergleich zu den „alten“ Untersuchungen haben sich die Verhältnisse von $f_{v, re-dry}/f_{v, trocken}$ auf dem Minimal- und 5%-Quantilniveau im Mittel aller Gebäude um rd. 20 % verringert und liegen nunmehr bei 0,6 bzw. bei rd. 0,7.

Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v,trocken}$			Vorhandener mittlerer Faserbruchanteil	Mindestfaserbruchanteil nach DIN EN 386	
				Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean}	x_{min}			x_{05}
-	J	J	-		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%
1619	1962	46	27	27	6,39	3,91	4,13	71	86
1627	1959	49	16	15	7,45	3,72	5,45	61	77
1630	1964	44	18	18	6,77	3,93	4,60	82	83
1631	1964	44	16	16	6,32	3,54	4,44	81	87
1621	1958	51	20	20	8,12	5,20	5,66	83	71
1612	1960	49	15	15	7,56	2,64	3,34	65	76

a)

Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Nass-Scherfestigkeit $f_{v,nass}$			Vorhandener mittlerer Faserbruchanteil	Mindestfaserbruchanteil nach DIN EN 386	
				Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean}	x_{min}			x_{05}
-	J	J	-		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%
1619	1962	46	27	27	3,22	0,99	1,89	73	86
1627	1959	49	16	16	4,07	2,64	3,17	75	77
1630	1964	44	18	17	3,27	1,15	2,10	81	83
1631	1964	44	16	16	3,40	2,78	2,94	68	87
1621	1958	51	20	20	3,76	2,86	3,17	78	71
1612	1960	49	15	14	3,69	3,00	3,02	74	76

b)

Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Wiedertrocken-Scherfestigkeit $f_{v,re-dry}$			Vorhandener mittlerer Faserbruchanteil	Mindestfaserbruchanteil nach DIN EN 386	
				Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean}	x_{min}			x_{05}
-	J	J	-		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	%
1619	1962	46	27	27	7,71	2,33	2,90	83	86
1627	1959	49	16	15	7,72	2,21	5,18	83	77
1630	1964	44	18	12	6,25	3,15	3,49	94	83
1631	1964	44	16	14	4,28	1,77	2,05	84	87
1621	1958	51	20	20	6,83	3,51	4,92	85	71
1612	1960	49	15	13	5,95	1,07	1,11	72	76

c)

Tabelle 18.5a-c Faserbruchanteile bei den „neuen“ Scherfestigkeitsuntersuchungen nach Trocken-, Nass- und Wiedertrockenlagerung

a) $f_{v,trocken}$

b) $f_{v,nass}$

c) $f_{v,re-dry}$

18.7 Scherfestigkeits-Faserbruchanteil-Zusammenhänge der „neuen“ Untersuchungen

Die Tabellen 18.5a-c enthalten die Versuchsergebnisse betreffend die mittleren und minimalen Scherfestigkeits-Faserbruchanteil-Zusammenhänge bei Trocken-, Nass- und Wiedertrockenlagerung der „neuen“ Untersuchungen. (Anmerkung: Bei den vormaligen Auswertungen von Kolb und Frech sind die Faserbruchanteile nicht ermittelt, zumindest jedoch nicht mitgeteilt worden). Die Bilder 18.3a,b zeigen die Zusammenhänge zwischen Faserbelag und Trockenscherfestigkeit, wobei der Graph in Bild 18.3a alle Einzelwerte der Gebäudegruppe KF beinhaltet und Bild 18.3b die $FB-f_{v,trocken}$ -Zusammenhänge der Gebäudemittelwerte beinhaltet. In analoger Weise zeigen die Bilder 18.4a,b die $FB-f_{v,nass}$ -Zusammenhänge für alle Einzelwerte und die Gebäudemittelwerte; die Graphen in Bild 18.5a und in Bild 18.5b geben sodann die $FB-f_{v,re-dry}$ -Zusammenhänge an.

In allen Bildern ist die kombinierte Faserbruchanteil-Trockenscherfestigkeits-Anforderungslinie gemäß EN 386 mit angegeben. (Anmerkung: In EN 386 sind ausschließlich Anforderungen an die $FB-f_{v,trocken}$ -Zusammenhänge definiert, die näherungsweise auch auf die $FB-f_{v,re-dry}$ -Zusammenhänge anwendbar sind. Im Falle der $FB-f_{v,nass}$ -Ergebnisse sind die EN 386-Anforderungen ausschließlich zu Vergleichszwecken angegeben).

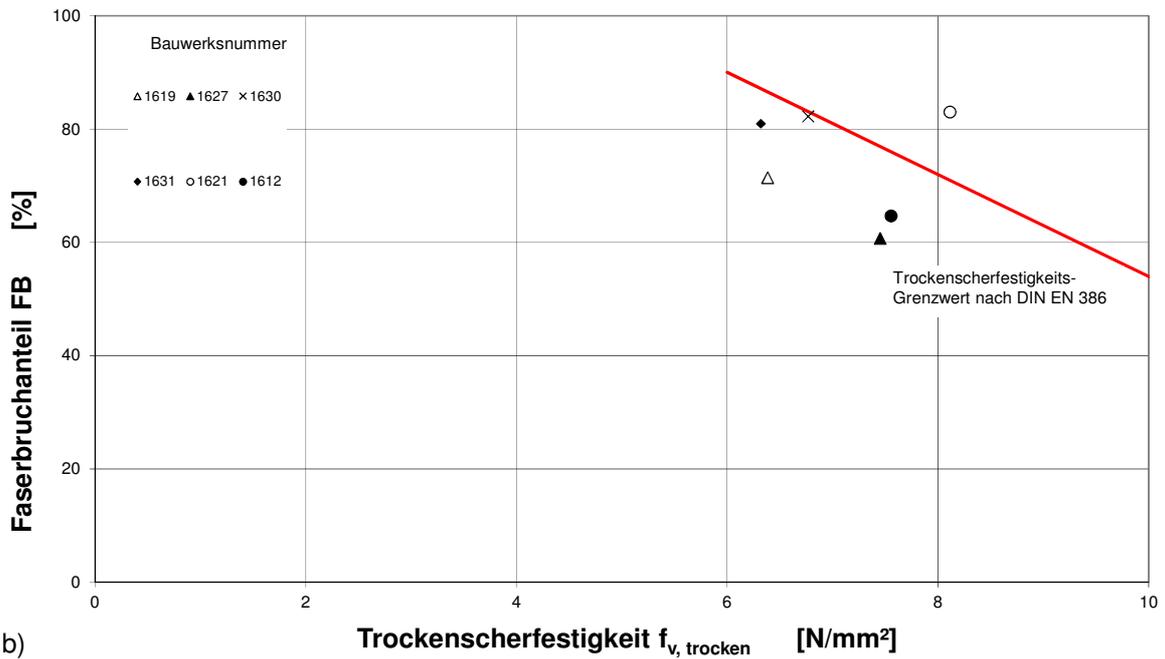
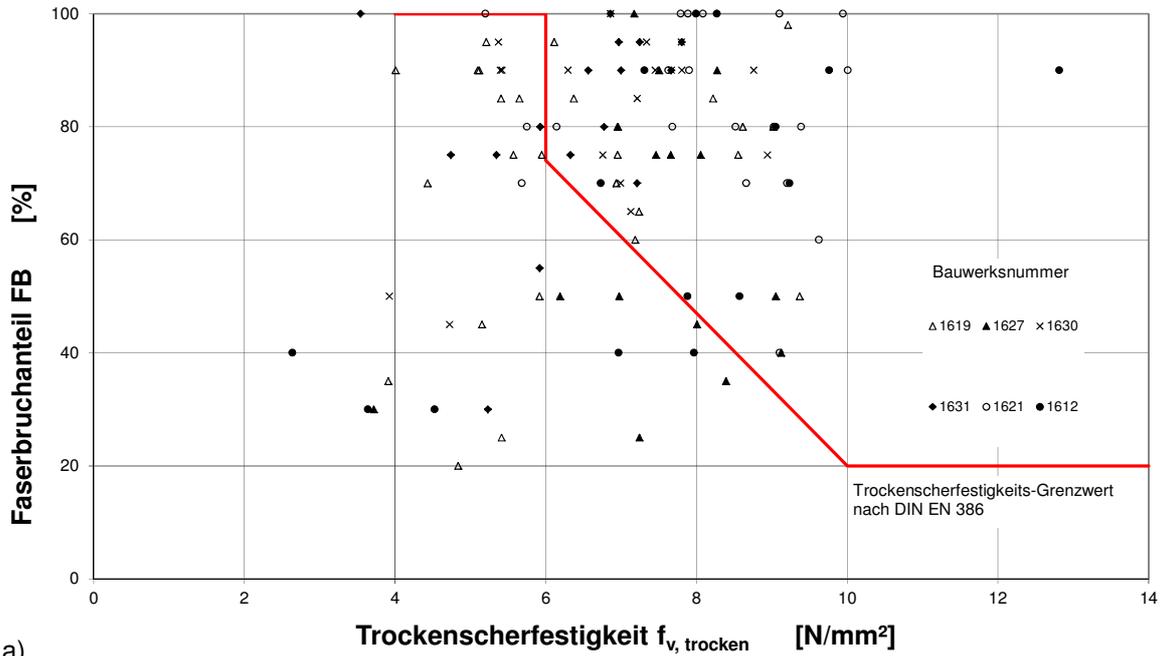


Bild 18.3a,b: Graphische Darstellung des experimentell erhaltenen Zusammenhangs zwischen Trocken-Scherfestigkeit (Lagerungsart I) und Faserbruchanteil bei den „neuen“ Untersuchungen an den sechs Gebäuden der Gebäudegruppe KF. Mitangegeben sind die Anforderungswerte gemäß EN 386.

a) Einzelwerte

b) Gebäude-Mittelwerte

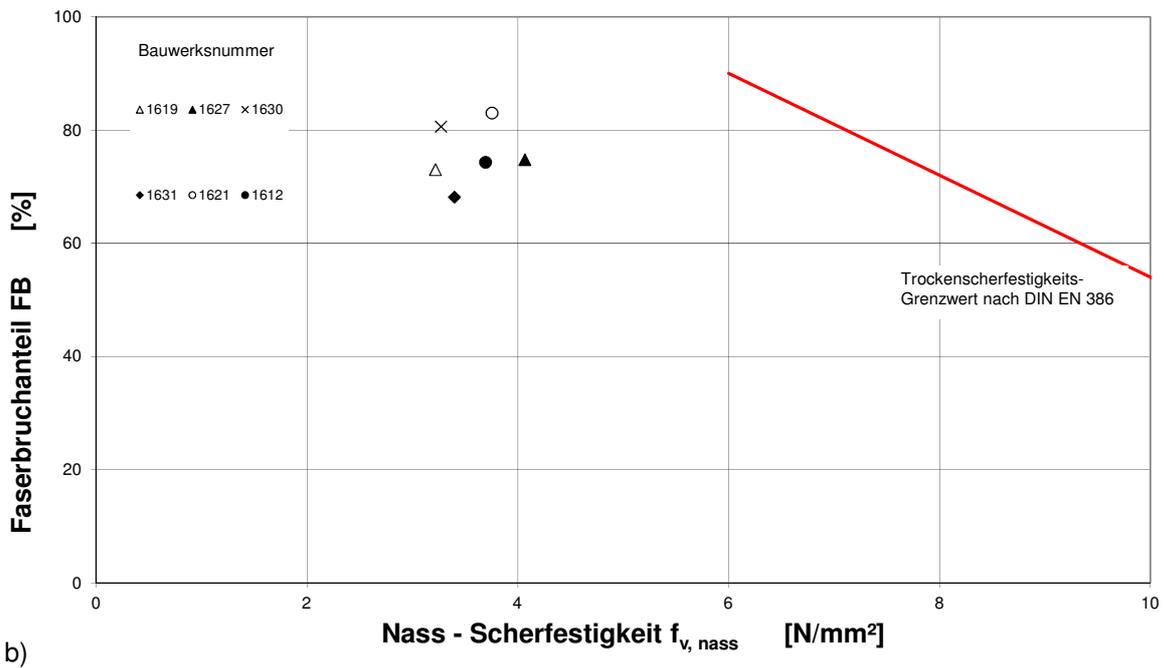
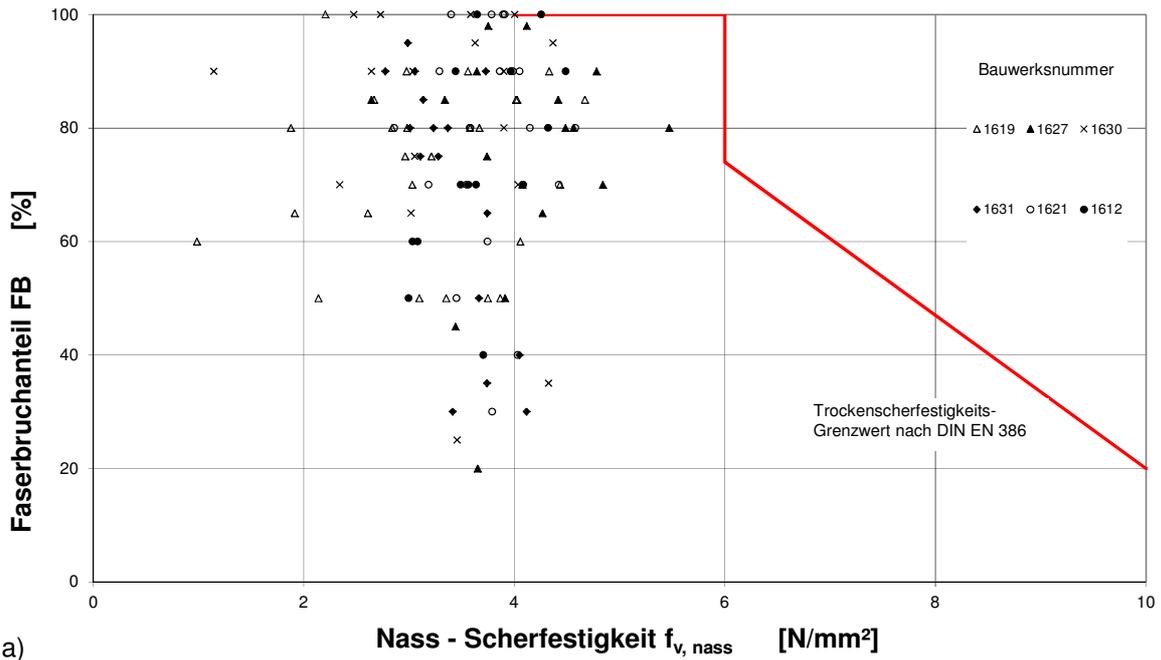


Bild 18.4a,b: Graphische Darstellung des experimentell erhaltenen Zusammenhangs zwischen Nass-Scherfestigkeit (Lagerungsart II) und Faserbruchanteil bei den „neuen“ Untersuchungen an den sechs Gebäuden der Gebäudegruppe KF. Mitangegeben sind die Anforderungswerte gemäß EN 386.

a) Einzelwerte

b) Gebäude-Mittelwerte

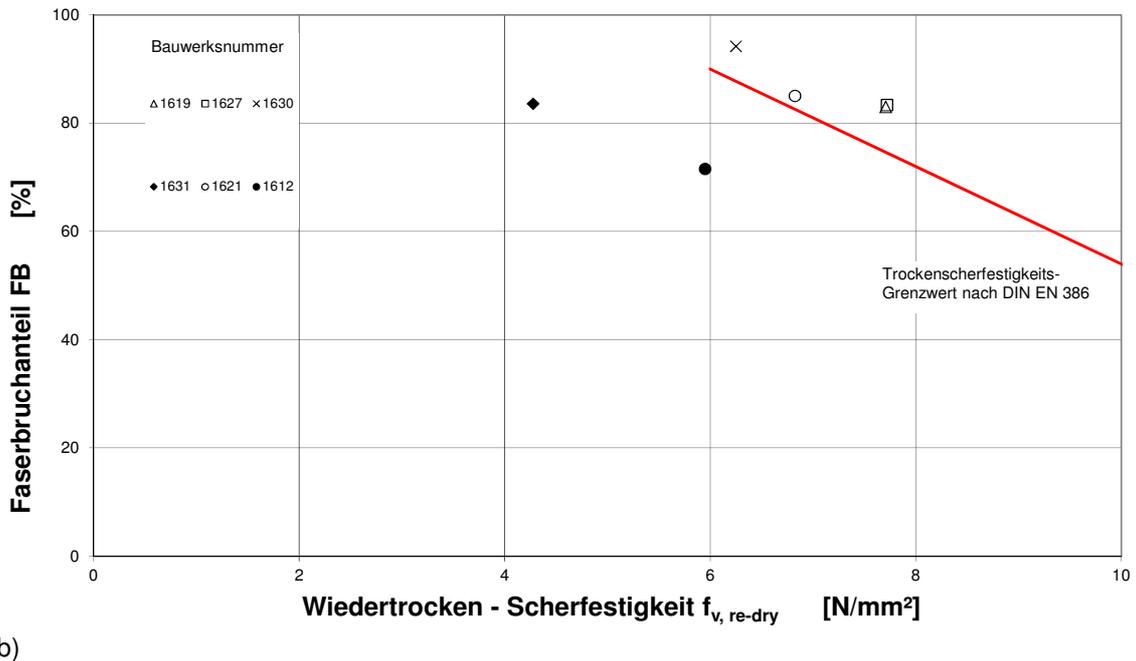
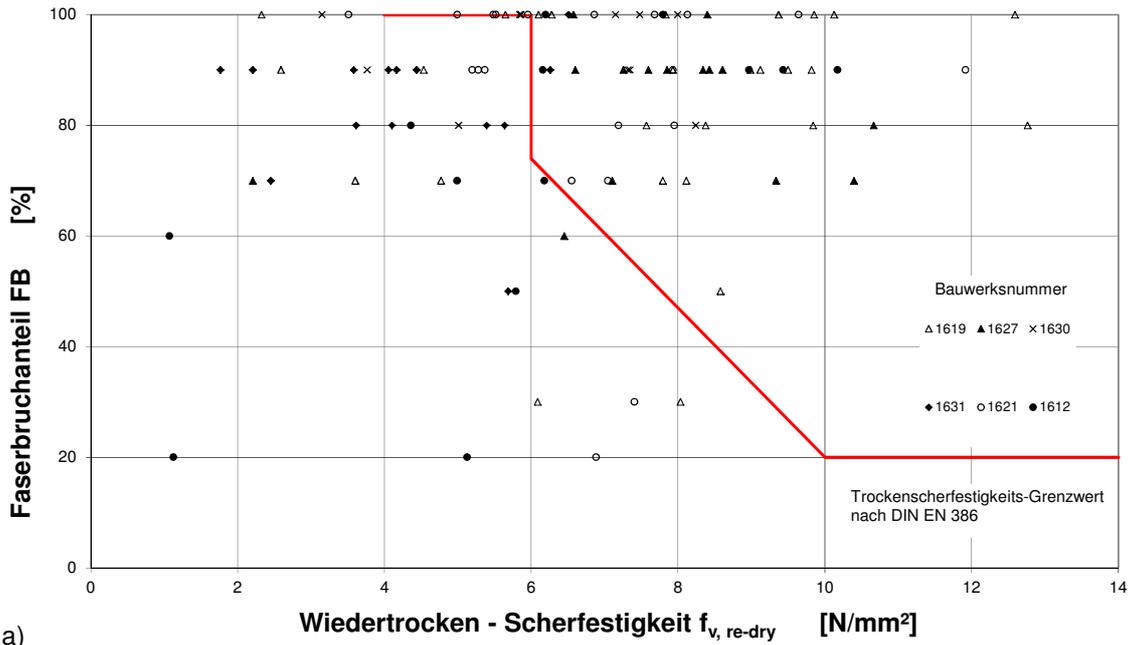


Bild 18.5a,b: Graphische Darstellung des experimentell erhaltenen Zusammenhangs zwischen Wiedertrocken-Scherfestigkeit (Lagerungsart III) und Faserbruchanteil bei den „neuen“ Untersuchungen an den sechs Gebäuden der Gebäudegruppe KF. Mitangegeben sind die Anforderungswerte gemäß EN 386.

a) Einzelwerte

b) Gebäude-Mittelwerte

19 Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkerne der Gebäudegruppe B

Wie in Abschnitt 13.3 ausgeführt, umfasst die Gebäudegruppe B insgesamt 13 Bauwerke mit Gebäudealtern zwischen 6 und 41 Jahren aus denen Bohrkerne entnommen wurden (vgl. Tabelle 13.2). Bei 10 der 13 Bauwerke wurden die Bohrkerne bzw. die Bohrkernabschnitte denselben drei Klima/Wasser-Vorbehandlungen (Lagerungsarten I, II und III) wie bei den sechs Gebäuden der Gebäudegruppe KF unterzogen. Bei drei Gebäuden wurden ausschließlich die Lagerungsarten I (trocken) und II (nass) geprüft.

19.1 Ergebnis-Zusammenstellungen

Die Tabellen F19 bis F54, Anhang F-19 bis F-50, enthalten die Einzelergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an den Bohrkernen der 13 Gebäude der Gebäudegruppe B, getrennt für die Klimalagerungsarten I, II und III. Die Tabellen G7 bis G19, Anhang G-7 bis G-19, enthalten eine statistische Auswertung der Scherfestigkeiten und Faserbeläge jedes Bauwerks der Gebäudegruppe B, getrennt nach Klimalagerungsart und Lage der Bohrkernabschnitte, die bei den Lagerungsarten I und II alternierend am Trägerrand (= Position a) bzw. im Trägerinneren (= Position i) gelegen sein können.

Die Tabelle 19.1 enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Scherfestigkeitsergebnisse (Trocken-, Nass- und Wiedertrockenfestigkeit) aller Einzelgebäude der Gebäudegruppe B und für das zusammengefasste Gebäudekollektiv der Gebäudegruppe B.

Im Hinblick auf eine gebotene Differenzierung der Versuchsergebnisse bezüglich des Gebäude/Bauteilalters²⁶ gibt Tabelle 19.2 die Scherfestigkeitsergebnisse getrennt für die Bauwerke mit Bauwerksaltern bis 35 Jahren (= Gebäudegruppe B_20) sowie mit mehr als 35 Jahren Standzeit (= Gebäudegruppe B_40) an.

Die Tabelle 19.3 enthält eine Zusammenfassung der Scherfestigkeiten der Gebäudegruppe KF (mittleres Bauwerksalter von 47 Jahren zum Zeitpunkt der Untersuchungen 2008/2009) und der Gebäude(-Unter)gruppe B_40 mit einem mittleren Bauwerksalter von 39

²⁶ Von den insgesamt 13 Gebäuden der Gebäudegruppe B weisen 11 Gebäude ein Gebäudealter < 35 Jahren auf. Diese Gebäude, deren mittleres Alter bei 18 Jahren liegt, werden im Weiteren als Gebäude(-Unter)gruppe B_20 bezeichnet. Die beiden Gebäude mit Bauwerksaltern > 35 Jahren weisen im Mittel ein Gebäudealter von 39 Jahren auf und werden nachfolgend als Gebäudegruppe B_40 bezeichnet.

Jahren (zum Zeitpunkt der Untersuchungen 2008/2009). Diese zusammengelegte Gebäudegruppe wird nachfolgend mit KF+B_40 bezeichnet. Die Graphen in den Bildern 19.1a,b, 19.2a,b und 19.3a,b veranschaulichen die experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen den Scherfestigkeiten und Faserbruchanteilen der Bohrkerne bzw. der Bohrkernabschnitte der Gebäudegruppe B getrennt für die Trocken-, Nass- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten. Die Versuchsergebnisse sind für die unterschiedlichen Klima/Feuchtigkeits-Lagerungsarten jeweils separat für die Einzelwerte und für die Mittelwerte der einzelnen Gebäude angegeben.

Die Tabelle 19.4 enthält eine Zusammenstellung der Verhältniswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten bzw. von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeiten. Die genannten Festigkeitsverhältnisse sind auf dem Niveau der Gebäudemittelwerte, der Minimalwerte und der 5 % -Quantilwerte getrennt für die Gebäudeuntergruppen B_40 und B_20 angegeben.

Die Tabelle 19.5 enthält eine summarische Zusammenstellung der Trockenscherfestigkeiten der Gebäudegruppen KF und B, der Gebäudeuntergruppen B_40 und B_20 sowie der zusammengefassten Gebäudegruppe KF+B_40. Die Tabelle 19.6 und die Tabelle 19.7 geben für die genannten Gebäudegruppen bzw. -untergruppen die Nass- bzw. Wiedertrocken-Scherfestigkeiten an.

19.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Diskussion der Versuchsergebnisse erfolgt speziell im Hinblick auf einen Vergleich mit den Ergebnissen, die für die Gebäudegruppe KF erhalten wurden. Diesbezüglich beinhalten die Tabellen 19.5 - 19.7 eine vergleichende Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse der Gebäudegruppen KF und B respektive deren Untergruppen B_20 und B_40. Betrachtet man die Mittelwerte der Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten der Gebäudegruppe B im Vergleich zu den jeweiligen Festigkeiten der Gebäudegruppe KF, so liegen die Werte der Gruppe B um rd. 10 % höher. Mit Blick auf das nachweisliche Alterungsverhalten von Holz und UF-Klebstoffugen ist dieser Vergleich jedoch nur sehr eingeschränkt sinnvoll, da die in Bezug gesetzten Gebäudegruppen signifikant unterschiedliche Bauwerksalter aufweisen und innerhalb der Gebäudegruppe B eine sehr große Streubreite der Bauwerksalter von minimal 6 Jahren bis maximal 41 Jahren vorliegt. Vergleicht man dagegen die in grober Näherung gleich alten Gebäudegruppen KF (mittleres Gebäudealter 47 Jahre) und B_40 (mittleres Gebäudealter 39 Jahre), so ist auf dem Niveau der Gebäudemittelwerte bei den Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten nunmehr eine sehr gute Übereinstimmung mit Abweichungen (B_40 bzgl. KF) von 5 % bei den Trocken-Scherfestigkeiten bzw. 2,5 % bei den Nass-

Scherfestigkeiten zu konstatieren²⁷. Im Gegensatz zu den $f_{v,trocken}$ - und $f_{v,nass}$ -Werten liegt die mittlere Wiedertrocken-Scherfestigkeit $f_{v,re-dry}$ der Gebäudegruppe B_40 um rd. 20 % unter dem Mittelwert der Gebäudegruppe KF. Im Falle der Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten ist somit eine Zusammenfassung der Gebäudegruppen KF und B_40 zur Gebäudegruppe „KF+B_40“ sowohl mit Blick auf die vergleichbaren Gebäudealter wie in Bezug auf die sehr gut übereinstimmenden Festigkeiten angezeigt. Im Falle der Wiedertrockenfestigkeiten ist die Zusammenlegung der Gebäudegruppen KF und B_40 in Bezug auf die Gebäudealter natürlich in gleicher Weise sinnvoll. Dessen ungeachtet ist festzustellen, dass die Wiedertrocken-Scherfestigkeiten der gesamten Gebäudegruppe B und sodann speziell auch der Gebäudeuntergruppe B_40 im Vergleich zur Gebäudegruppe KF insgesamt auf einem niedrigeren Niveau liegen.

Vergleicht man die Ergebnisse der Gebäudeuntergruppe B_40 mit den Ergebnissen der rd. 20 Jahre jüngeren Gebäudegruppe B_20, so liegen die mittleren Trocken-, Nass- und Wiedertrockenscherfestigkeiten der Gebäudegruppe B_40 um 6 %, 8 % und 13 % niedriger. Legt man für den Vergleich „älterer“ Gebäude zu „jüngeren“ Gebäuden im Falle der „älteren“ Gebäude die zusammengefasste Gebäudegruppe B_40 + KF zugrunde, so liegen deren mittlere Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten vergleichbar um rd. 10 % unter den Ergebnissen der B_20-Gebäudegruppe. Die Ergebnisse der Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten belegen somit ein vergleichbares sehr moderates Alterungsverhalten der UF-Klebefugen.

Im Falle der Wiedertrocken-Scherfestigkeit liegt der mittlere Festigkeitswert der „älteren“ Gebäudegruppe um 5% über den B_20 Ergebnissen. Betrachtet man anstelle der Mittelwerte die gemittelten Minimalwerte der Wiedertrockenscherfestigkeiten bzw. die mittleren 5 % Quantilwerte, so liegen die Scherfestigkeiten der B_40-Gruppe sowie der zusammengefassten KF+B_40-Gruppe wesentlich unter den Festigkeiten der B_20 Gebäudegruppe. Dieser Sachverhalt gilt neben den Wiedertrockenfestigkeiten auch für die Minimal- und 5 %-Quantilwerte der Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten. So liegen die mittleren Minimalwerte der Trocken-, Nass- und Wiedertrockenfestigkeiten der Gebäudegruppe KF + B_40 einheitlich um rd. 35 % unter den jeweiligen Festigkeitsminimalwerten der Gebäudegruppe B_20. Auf dem Niveau der 5 %-Quantilwerte liegt die Festigkeitsabnahme der „älteren“ Gebäude bei rd. 25 %.

²⁷ Auf den Sachverhalt, dass die Gebäudegruppe KF 6 Gebäude mit insgesamt 112 Bohrkernen umfasst und die Gebäudeuntergruppe B_40 lediglich 2 Gebäude mit insgesamt 29 Bohrkernen beinhaltet, ist im Hinblick auf die statistische Bewertung der Ergebnisse hinzuweisen.

Bezeichnung der Gebäudegruppe	Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkern	Trocken-Scherfestigkeit $f_{t,trocken}$				Nass-Scherfestigkeit $f_{t,nass}$				Wiedertrocken-Scherfestigkeit $f_{t,ne-dry}$							
					Anzahl gepr. BK-Abschnitte	\bar{x}_{mean} N/mm ²	x_{min} N/mm ²	$x_{0,5}$ N/mm ²	$x_{0,5,ln}$ N/mm ²	Anzahl gepr. BK-Abschnitte	\bar{x}_{mean} N/mm ²	x_{min} N/mm ²	$x_{0,5}$ N/mm ²	$x_{0,5,ln}$ N/mm ²	Anzahl gepr. BK-Abschnitte	\bar{x}_{mean} N/mm ²	x_{min} N/mm ²	$x_{0,5}$ N/mm ²	$x_{0,5,ln}$ N/mm ²	
B	-	J	J	-	14	8,12	6,15	6,26	6,09	13	3,99	1,74	2,15	2,31	13	5,54	2,39	2,62	1,69	
	1633	1968	41	14	15	8,99	6,17	6,30	5,98	15	4,34	3,58	3,64	3,57	15	5,04	2,78	2,96	2,69	
	1580	1979	30	15	15	8,62	6,75	6,92	6,90	15	4,36	3,89	3,90	3,86	15	5,67	2,35	2,80	2,91	
	1587	1979	30	15	9	8,09	6,25	6,45	6,38	9	3,81	3,60	3,63	3,45	9	6,57	5,61	5,71	5,47	
	1605	2002	6	9	8	7,77	6,39	6,48	6,21	8	3,91	3,37	3,49	3,39	8	6,87	5,44	5,48	5,16	
	1606	2002	6	8	10	7,70	6,33	6,60	6,54	10	3,76	3,34	3,37	3,16	10	6,36	4,78	4,91	4,69	
	1669	2002	6	10	10	7,75	5,37	6,10	5,79	10	3,70	3,18	3,20	3,01	8	5,79	1,11	2,15	1,99	
	1670	2002	6	6	10	7,67	5,87	6,08	5,90	10	3,92	3,14	3,37	3,28	7	6,28	3,73	4,23	4,38	
	1671	2002	6	6	10	7,67	5,87	6,08	5,90	10	3,92	3,14	3,37	3,28	7	6,28	3,73	4,23	4,38	
	1356	1973	36	15	15	6,81	2,23	2,80	3,05	13	3,33	2,24	2,45	2,95	12	4,55	1,39	1,46	1,48	
	800	1975	34	8	8	7,78	5,50	5,97	5,83	8	3,77	3,23	3,31	3,21	8	4,04	1,16	1,43	1,15	
	1640	1985	24	12	12	7,79	6,31	6,35	6,18	12	3,76	2,80	3,00	2,98	-	-	-	-	-	
	1641	1989	20	8	8	7,13	4,78	4,85	4,28	7	4,24	3,63	3,75	3,66	-	-	-	-	-	
	1642	1983	26	12	12	8,01	5,69	6,20	6,23	11	4,23	2,94	3,30	3,16	-	-	-	-	-	
	Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkern /-abschnitte				146	146	7,86	5,68	5,95	5,80	141	3,93	3,13	3,27	3,18	105	5,67	3,07	3,38	3,16

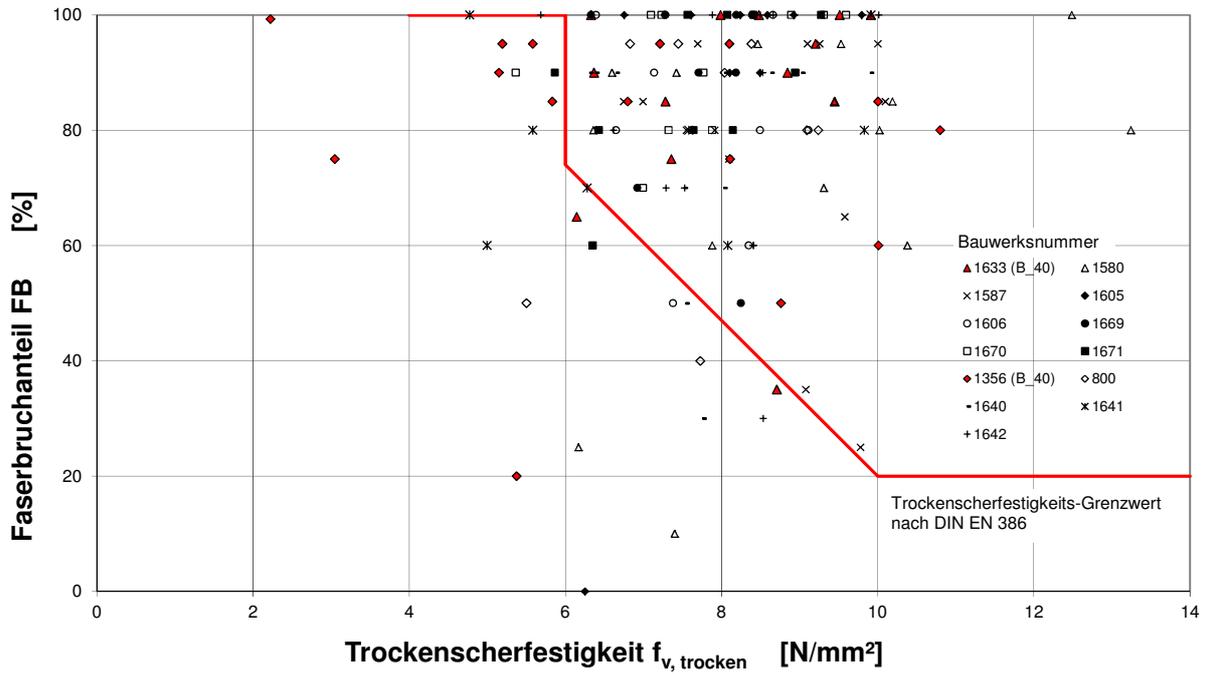
Tabelle 19.1

Zusammenfassung der wichtigsten Scherfestigkeitsergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkernen der Gebäudegruppe B

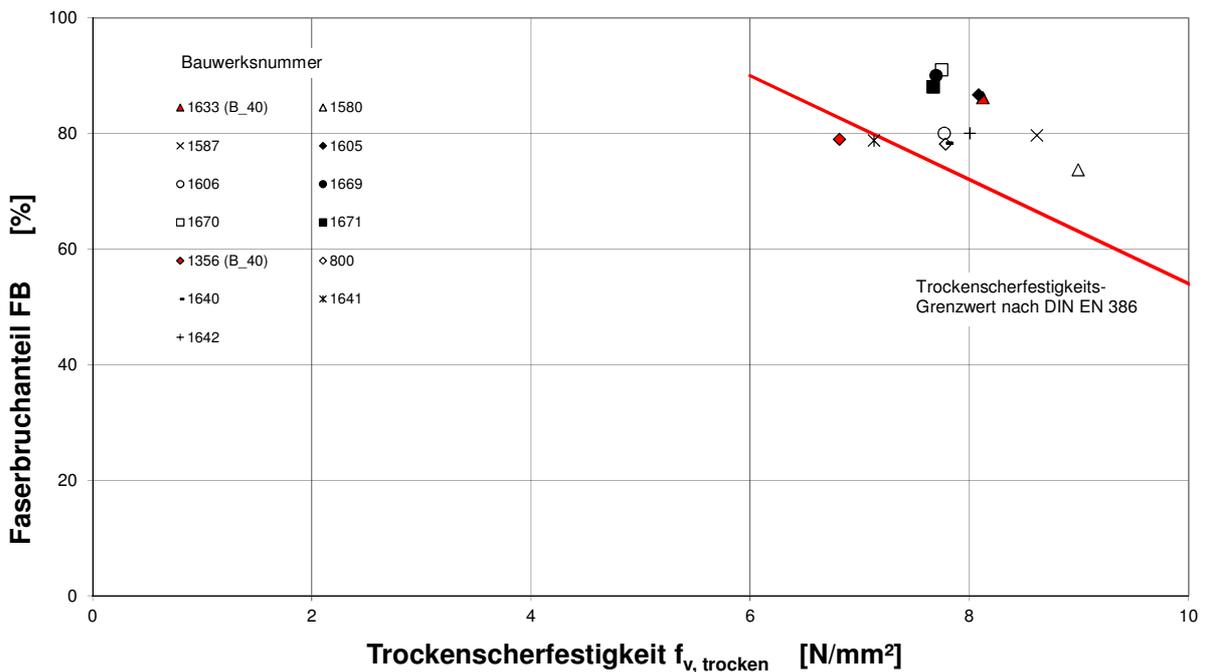
Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe	Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkern	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v,trocken}$				Nass-Scherfestigkeit $f_{v,nass}$				Wiedertrocken-Scherfestigkeit $f_{v,ret-dry}$			
					Anzahl gepr. BK-	X_{mean} N/mm ²	X_{min} N/mm ²	X_{05} N/mm ²	Anzahl gepr. BK-	X_{mean} N/mm ²	X_{min} N/mm ²	X_{05} N/mm ²	Anzahl gepr. BK-	X_{mean} N/mm ²	X_{min} N/mm ²	X_{05} N/mm ²
KF	-	J		-	27	6,39	3,91	4,13	27	3,22	0,99	1,89	27	7,71	2,33	2,90
	1619	1962	46	27	15	7,45	3,72	5,45	16	4,07	2,64	3,17	15	7,72	2,21	5,18
	1627	1959	49	16	18	6,77	3,93	4,60	17	3,27	1,15	2,10	12	6,25	3,15	3,49
	1630	1964	44	18	16	6,32	3,54	4,44	16	3,40	2,78	2,94	14	4,28	1,77	2,05
	1621	1958	51	20	20	8,12	5,20	5,66	20	3,76	2,86	3,17	20	6,83	3,51	4,92
B_40	1612	1960	49	15	15	7,56	2,64	3,34	14	3,69	3,00	3,02	13	5,95	1,07	1,11
	1633	1968	41	14	13	8,12	6,15	6,26	13	3,99	1,74	2,15	13	5,54	2,39	2,62
	1356	1973	36	15	15	6,81	2,23	2,80	13	3,33	2,24	2,45	12	4,55	1,39	1,46
KF + B_40	Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkern/-abschnitte		45	141	139	7,19	3,92	4,59	136	3,59	2,18	2,61	126	6,10	2,23	2,97

Tabelle 19.3

Zusammenfassung der wichtigsten Scherfestigkeitsergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkernen der Gebäudegruppe KF und der Gebäudeuntergruppe B_40 mit jeweiligen mittleren Bauwerksaltern von 47 bzw. 39 Jahren



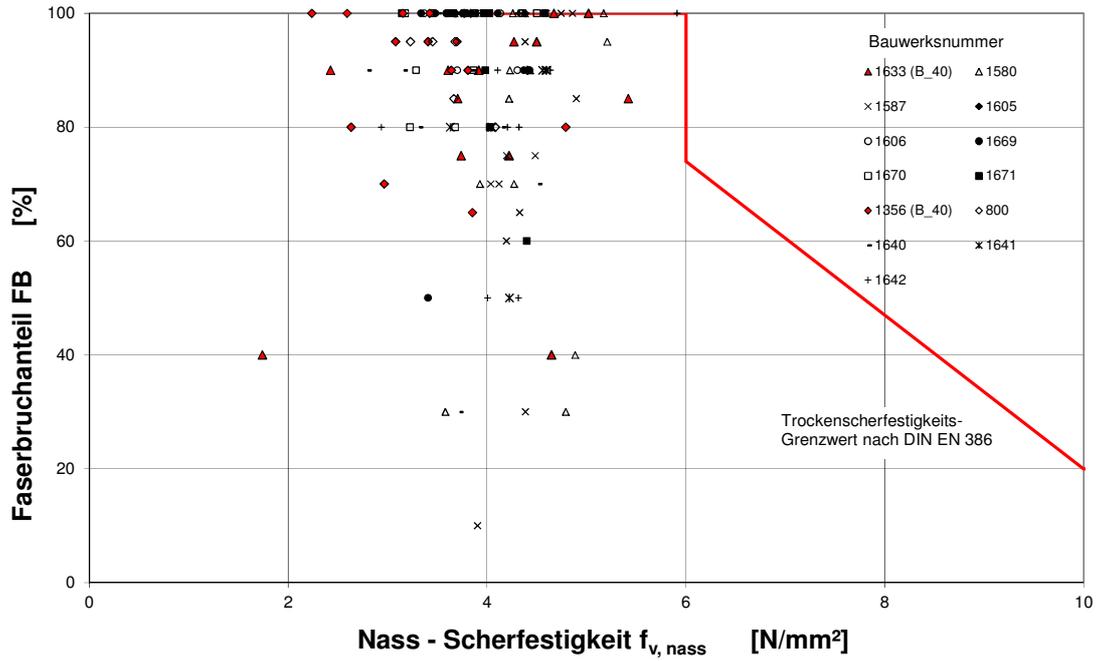
a)



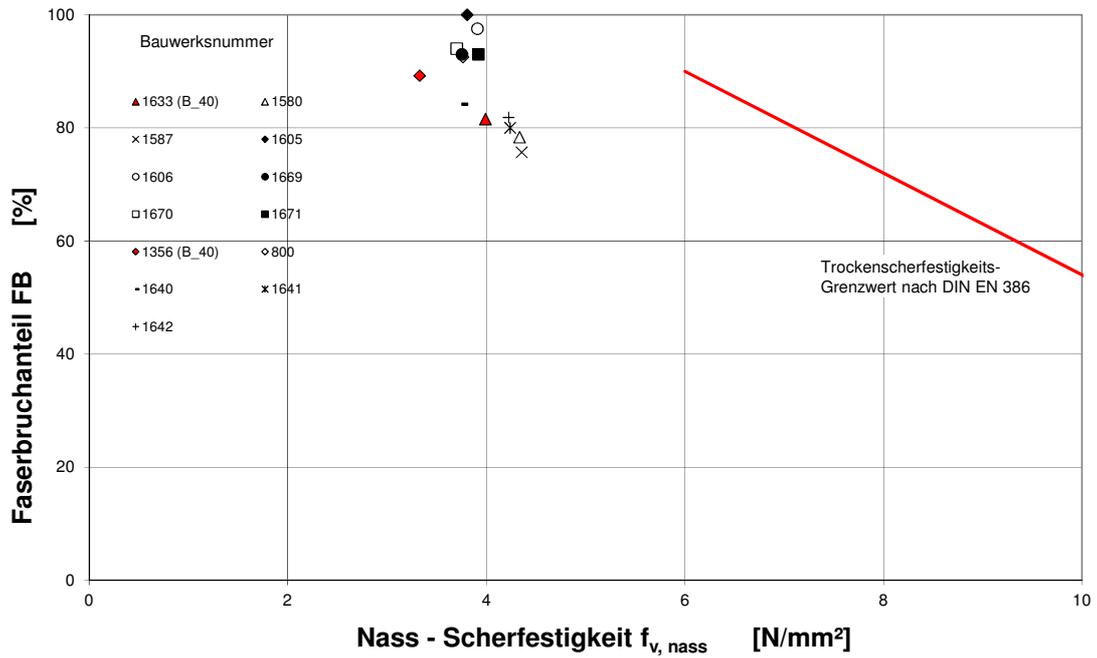
b)

Bild 19.1a,b: Graphische Darstellung der experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen Trocken-Scherfestigkeit (Lagerungsart I) und Faserbruchanteil bei den Untersuchungen an den 13 Gebäuden der Gebäudegruppe B

a) Einzelwerte b) Gebäude-Mittelwerte



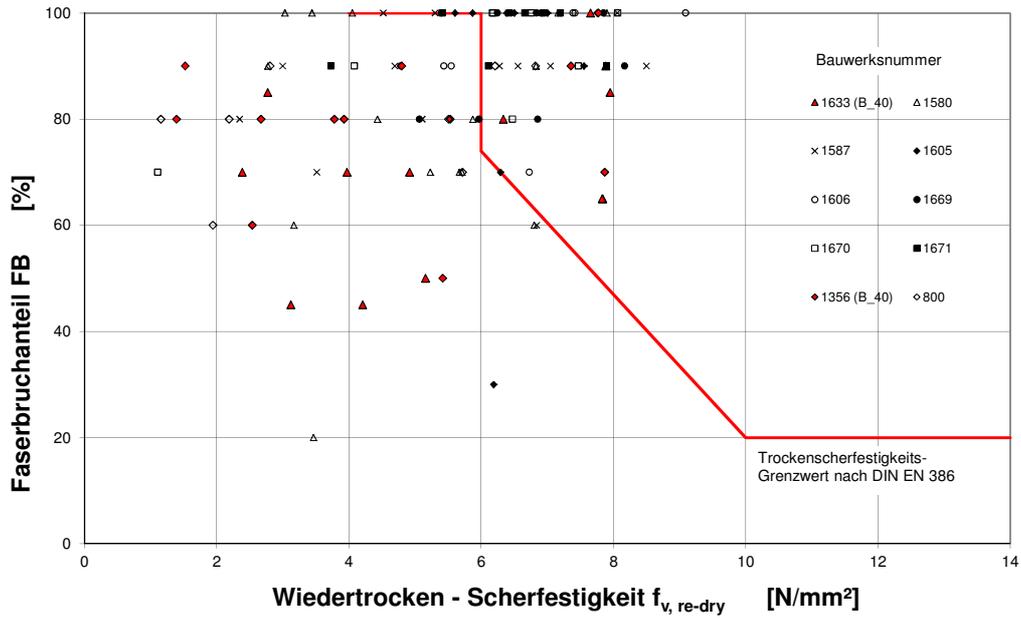
a)



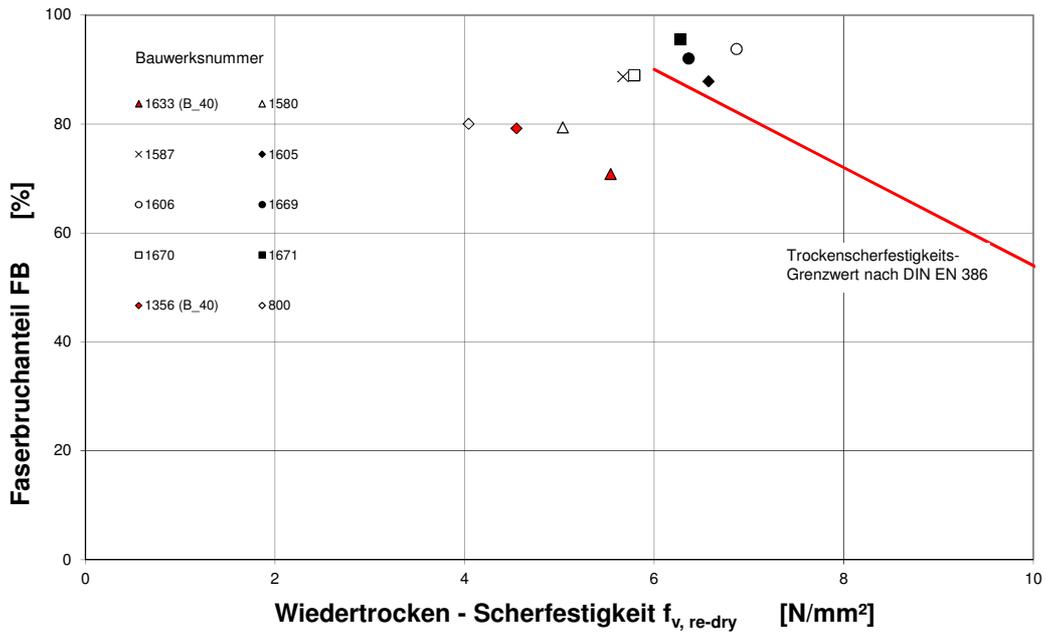
b)

Bild 19.2a,b: Graphische Darstellung der experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen Nass-Scherfestigkeit (Lagerungsart II) und Faserbruchanteil bei den Untersuchungen an den 13 Gebäuden der Gebäudegruppe B

a) Einzelwerte b) Gebäude Mittelwerte



a)



b)

Bild 19.3a,b: Graphische Darstellung der experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen Wiedertrocken-Scherfestigkeit (Lagerungsart III) und Faserbruchanteil bei den Untersuchungen an den 13 Gebäuden der Gebäudegruppe B

a) Einzelwerte

b) Gebäude-Mittelwerte

Bezeichnung der Gebäudegruppe	Bezeichnung der Gebäudeuntergruppe	Bauwerks-Nr.	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Scherfestigkeitsverhältnisse						
					$\frac{f_{v,nass}}{f_{v,trocken}}$			$\frac{f_{v,re-dry}}{f_{v,trocken}}$			
					X_{mean}	X_{min}	X_{05}	X_{mean}	X_{min}	X_{05}	
B	B_40	1633	41	14	0,49	0,28	0,34	0,68	0,39	0,42	
		1356	36	15	0,49	1,00	0,88	0,67	0,62	0,52	
		Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkerne /-abschnitte		39	29	0,49	0,64	0,61	0,68	0,51	0,47
	B_20	1580	30	15	0,48	0,58	0,58	0,56	0,45	0,47	
		1587	30	15	0,51	0,58	0,56	0,66	0,35	0,40	
		1605	6	9	0,47	0,58	0,56	0,81	0,90	0,89	
		1606	6	8	0,50	0,53	0,54	0,88	0,85	0,85	
		1669	6	10	0,49	0,53	0,51	0,83	0,76	0,74	
		1670	6	10	0,48	0,59	0,52	0,75	0,21	0,35	
		1671	6	10	0,51	0,53	0,55	0,82	0,64	0,70	
		800	34	8	0,48	0,59	0,55	0,52	0,21	0,24	
		1640	24	12	0,48	0,44	0,47	-	-	-	
		1641	20	8	0,59	0,76	0,77	-	-	-	
		1642	26	12	0,53	0,52	0,53	-	-	-	
		Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkerne /-abschnitte		18	117	0,50	0,57	0,56	0,73	0,54	0,58

Tabelle 19.4: Verhältniswerte der Nass- bzw. Wiedertrocken-Scherfestigkeiten, $f_{v,nass}$ bzw. $f_{v,re-dry}$, bzgl. der Trockenscherfestigkeiten $f_{v,trocken}$ der Gebäudegruppe B bzw. der Gebäudeuntergruppen B_40 und B_20

Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe	Anzahl der Bauwerke	mittleres Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v,trocken}$			
				Anzahl gepr. BK-Abschnitte	X_{mean}	X_{min}	X_{05}
					N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
KF	6	47	112	111	7,10	3,82	4,60
B	13	21	146	145	7,86	5,68	5,95
B_40	2	39	29	28	7,47	4,19	4,53
B_20	11	18	117	117	7,94	5,95	6,21
KF+B_40	8	45	141	139	7,19	3,92	4,59

Tabelle 19.5 Zusammenstellung der Trockenscherfestigkeiten der Gebäudegruppen KF und B, der Gebäudeuntergruppen B_40 und B_20 sowie der zusammengefassten Gebäudegruppe KF+B_40

Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe	Anzahl der Bauwerke	mittleres Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Nass-Scherfestigkeit			
				Anzahl gepr. BK-Abschnitte	$f_{v,nass}$		
					x_{mean}	x_{min}	x_{05}
-	-	J	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	
KF	6	47	112	110	3,57	2,24	2,72
B	13	21	146	141	3,93	3,13	3,27
B_40	2	39	29	26	3,66	1,99	2,30
B_20	11	18	117	115	3,98	3,34	3,45
KF+B_40	8	45	141	136	3,59	2,18	2,61

Tabelle 19.6 Zusammenstellung der Nass-Scherfestigkeiten der Gebäudegruppen KF und B, der Gebäudeuntergruppen B_40 und B_20 sowie der zusammengefassten Gebäudegruppe KF+B_40

Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe	Anzahl der Bauwerke	mittleres Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Wiedertrocken-Scherfestigkeit			
				Anzahl gepr. BK-Abschnitte	$f_{v,re-dry}$		
					x_{mean}	x_{min}	x_{05}
-	-	J	-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	
KF	6	47	112	101	6,46	2,34	3,28
B	13	21	146	105	5,67	3,07	3,38
B_40	2	39	29	25	5,05	1,89	2,04
B_20	11	18	117	80	5,83	3,37	3,71
KF+B_40	8	45	141	126	6,10	2,23	2,97

Tabelle 19.7 Zusammenstellung der Wiedertrocken-Scherfestigkeiten der Gebäudegruppen KF und B, der Gebäudeuntergruppen B_40 und B_20 sowie der zusammengefassten Gebäudegruppe KF+B_40

20 Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkerne der Gebäudegruppe C

20.1 Ergebnis-Zusammenstellungen

Wie in Abschnitt 13.4 ausgeführt, umfasst die Gebäudegruppe C insgesamt 38 Gebäude, deren Gebäudealter zum Zeitpunkt der Bauwerksuntersuchungen und Bohrkernentnahmen in den Jahren 2008 bis 2011 zwischen 4 und 76 Jahren variierten. Kennzeichnend für die Gebäudegruppe C ist, dass die Bohrkerne respektive die Bohrkernabschnitte dieser Gebäude ausschließlich trocken (Lagerungsart I) geprüft wurden.

Die Tabellen F55 bis F88, Anhang F-51 bis F-77, enthalten die Einzelergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an den Bohrkernen von 34 der insgesamt 38 Gebäude²⁸. Mit angegeben in den Tabellen sind neben den Versuchsergebnissen (Trockenschерfestigkeit und Faserbruchanteil) die normativ erforderlichen Mindestfaserbruchanteile gemäß DIN EN 386.

Die Tabelle 20.1 enthält zusammenfassend die wichtigsten statistischen Kenngrößen (Mittelwert, Standardabweichung, Minimal- und 5 %-Quantilwert) der Trocken-Scherfestigkeit und des mittleren Faserbruchanteils der einzelnen Gebäude. Mit angegeben ist der Anforderungswert an den vom Scherfestigkeitsmittelwert abhängigen mittleren Faserbruchanteil gemäß EN 386. In weitergehender Differenzierung der Versuchsergebnisse beinhaltet Tabelle 20.2 eine Zusammenfassung der Festigkeits- und Faserbruchanteil-Ergebnisse der Bohrkerne der Gebäudegruppe C, getrennt für die nach Bauwerksaltern unterschiedenen Gebäude-Untergruppen C_40 (Bauwerksalter > 35 Jahre) und C_20 (Bauwerksalter < 35 Jahre). Im Mittel lagen die Bauwerksalter der Gebäude-Untergruppen C_40 und C_20 bei 47 bzw. 22 Jahren.

Die Bilder 20.1a,b veranschaulichen die experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen Trockenschерfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkerne der Gebäudegruppe C; die Ergebnisse sind sowohl für die Einzelwerte aller Bohrkernabschnitte als auch für die Mittelwerte der einzelnen Gebäude angegeben.

²⁸ Wie in der Legende zu Tabelle 13.3 ausgeführt, waren die Bohrkernuntersuchungen von drei Gebäuden bis zum Berichtszeitpunkt noch nicht vollständig abgeschlossen. Die Gurt-Steg-Verklebungen des Kastenträgers des Gebäudes und die Scherfestigkeiten des Gebäudes 1685 werden separat diskutiert.

In analoger Weise zeigen die Bilder 20.2a,b und 20.3a,b die Ergebnisse der einzelnen Bohrkernabschnitte und die Mittelwtergebnisse je Gebäude, getrennt für die Gebäude-Untergruppen C_20 und C_40.

20.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Diskussion der Versuchsergebnisse erfolgt getrennt für die gebäudealtersmäßig unterschiedlichen Gebäude-Untergruppen C_40 und C_20. Im Weiteren werden die Versuchsergebnisse der Untergruppe C_40 mit den Befunden der zusammengefassten Gebäude-Untergruppe KF + B_40 verglichen. Die Versuchsergebnisse der Gebäude-Untergruppe C_20 werden denjenigen der Gebäude-Untergruppe B_20 gegenübergestellt. Tabelle 20.3 enthält die wichtigsten Ergebnisse für die genannten Gegenüberstellungen.

Die Trockenscherfestigkeiten der Gebäudeuntergruppe C_40 liegen im Mittel um rd. 7 % unter den Festigkeitswerten der jüngeren Gebäudegruppe C_20. Diese alterungsbedingte Festigkeitsabnahme entspricht sehr gut den Abminderungen von 6 % bzw. 9 %, die bei dem Vergleich der Trockenscherfestigkeiten der Gebäudegruppen B_40 zu B_20 bzw. der zusammengefassten Gebäudegruppe KF+B_40 zu B_20 erhalten wurden. Bezüglich der absoluten Werte stimmen die Trockenscherfestigkeiten der Gebäudeuntergruppen C_20 und C_40 auf dem Mittelwertniveau sehr gut mit den Werten der Gebäudeuntergruppen B_20 bzw. KF+B_40 überein. Auf dem Niveau der Minimalwerte und der 5 %-Quantilwerte sind die jeweiligen Übereinstimmungen gut bzw. ausreichend.

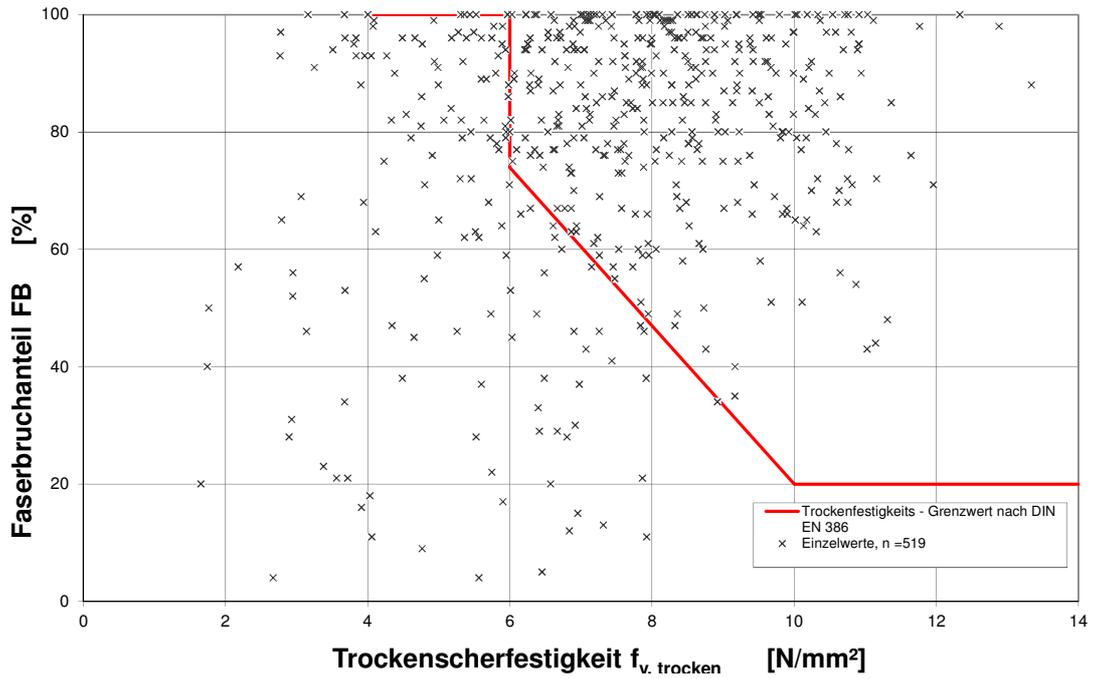
Gebäude-gruppe	Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommene n Bohrkerne	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v,trocken}$					Vorhandener mittlerer Faserbruch-anteil	Mindestfaser-bruchanteil nach DIN EN 386	
					Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean}	Standardabweichung	x_{min}	x_{05}			$x_{05,ln}$
						N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²			N/mm ²
	-	J	J	-							%	%
C	253	1982	26	6	12	7,85	0,65	6,71	6,97	6,83	87	73
	1643	1964	45	11	16	6,14	1,72	2,78	3,45	3,45	96	89
	658	1974	33	22	39	8,37	2,40	3,07	3,24	4,44	89	69
	1634	1973	33	16	29	8,29	1,95	2,79	5,32	4,95	77	69
	1635	1975	31	29	39	7,48	2,03	1,77	4,04	4,02	80	77
	1636	2002	4	21	28	6,44	1,60	3,91	4,04	4,02	53	86
	1639	1981	28	12	22	8,41	2,30	2,90	5,02	4,60	85	68
	1644	1969	37	5	10	9,55	0,59	8,55	8,63	8,55	90	58
	1645	1972	34	4	8	7,86	1,76	4,93	5,44	5,07	86	73
	428	1978	30	9	9	8,57	1,17	6,54	6,77	6,63	85	67
	1646	1965	42	7	14	8,98	1,66	5,28	5,63	6,14	84	63
	1663	1972	34	5	5	8,13	0,87	7,22	7,23	6,65	80	71
	1648	1973	35	4	5	6,19	1,68	3,68	3,93	3,44	76	88
	1649	1973	33	3	6	9,57	1,02	7,95	8,10	7,80	83	58
	1650	1976	30	5	8	8,37	1,28	6,87	6,88	6,34	86	69
	1651	n.b.	n.b.	4	7	7,10	0,87	5,53	5,68	5,59	76	80
	1678	1996	10	14	22	6,03	1,42	3,16	3,53	3,74	86	90
	1653	1993	13	6	4	5,97	0,96	4,61	4,75	4,29	49	90
	1656	1970	36	4	6	6,43	1,52	4,79	4,89	4,15	63	86
	1657	1920	86	3	3	3,52 ¹⁾	1,48 ¹⁾	1,95 ¹⁾	2,13 ¹⁾	1,33 ¹⁾	96 ¹⁾	-
	1658	1990	16	8	9	6,37	1,65	3,81	4,21	3,86	90	87
	1664	1980	27	24	42	8,05	2,38	2,77	4,24	4,31	76	72
	1661	1988	19	7	15	9,35	1,47	6,23	6,56	6,89	93	60
	1662	1930	76	31	40	6,00	2,29	1,66	2,16	2,47	58	90
	1685	1972	37	11	23	7,76	1,21	5,00	5,17	5,74	85	74
	1680	1975	36	8	15	6,82	1,62	4,01	4,06	4,28	87	83
	1681	1988	22	5	7	7,68	1,52	5,60	5,82	5,16	83	75
	189	1959	49	3	6	6,22	0,91	4,49	4,78	4,61	63	88
	1666	1964	44	10	21	6,93	0,94	5,30	5,53	5,49	77	82
	1667	1964	44	4	8	7,45	0,88	5,90	6,15	5,96	86	77
1665	1982	26	6	10	6,55	1,24	4,38	4,56	4,51	86	85	
1659	1982	26	10	18	7,14	1,30	4,75	5,25	5,18	78	80	
1128	1967	42	7	7	7,84	1,06	6,90	6,90	6,22	81	73	
162	1980	28	3	6	7,88	0,78	6,90	6,96	6,56	77	73	
Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkern /-abschnitte			34	327	519	7,51	1,42	4,87	5,33	5,21	80	76

1) Die Scherfestigkeiten des ältesten untersuchten Gebäudes Nr. 1657 (Bj. 1920) wurden in die zusammenfassende statistische Auswertung der Gebäudegruppe C nicht einbezogen, da die sehr niedrigen Festigkeiten infolge weitgehender hydrolytisch bedingter Fugendegradationen als Sonderfall bewertet wurden.

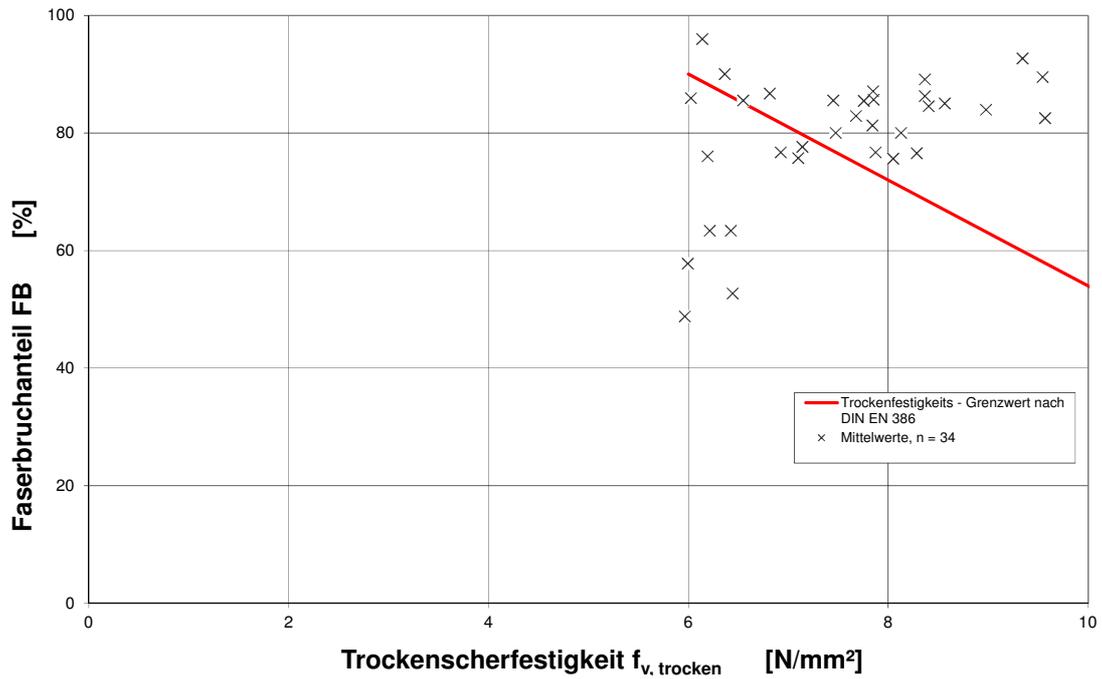
Tabelle 20.1 Zusammenstellung der wichtigsten Trocken-Scherfestigkeitsergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkernen der Gebäudegruppe C

Bezeichnung der (Gebäudegruppe) bzw. der Gebäudeuntergruppe	Bauwerks-Nr.	Baujahr	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v,trocken}$					Vorhandener mittlerer Faserbruchanteil	Mindestfaserbruchanteil nach DIN EN 386		
					Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean} N/mm ²	Standardabweichung N/mm ²	x_{min} N/mm ²	x_{05} N/mm ²			$x_{05,ln}$ N/mm ²	
	-	J	J	-							%	%	
(C) C_40	1643	1964	45	11	16	6,14	1,72	2,78	3,45	3,45	96	89	
	1644	1969	37	5	10	9,55	0,59	8,55	8,63	8,55	90	58	
	1646	1965	42	7	14	8,98	1,66	5,28	5,63	6,14	84	63	
	1648	1973	35	4	5	6,19	1,68	3,68	3,93	3,44	76	88	
	1656	1970	36	4	6	6,43	1,52	4,79	4,89	4,15	63	86	
	1657	1920	86	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	1662	1930	76	31	40	6,00	2,29	1,66	2,16	2,47	58	90	
	1680	1975	36	8	15	6,82	1,62	4,01	4,06	4,28	87	83	
	189	1959	49	3	6	6,22	0,91	4,49	4,78	4,61	63	88	
	1666	1964	44	10	21	6,93	0,94	5,30	5,53	5,49	77	82	
	1667	1964	44	4	8	7,45	0,88	5,90	6,15	5,96	86	77	
	1128	1967	42	7	7	7,84	1,06	6,90	6,90	6,22	81	73	
Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkerne /-abschnitte			48	97	151	7,14	1,35	4,85	5,10	4,98	78,17	79,73	
(C) C_20	253	1982	26	6	12	7,85	0,65	6,71	6,97	6,83	87	73	
	658	1974	33	22	39	8,37	2,40	3,07	3,24	4,44	89	69	
	1634	1973	33	16	29	8,29	1,95	2,79	5,32	4,95	77	69	
	1635	1975	31	29	39	7,48	2,03	1,77	4,04	4,02	80	77	
	1636	2002	4	21	28	6,44	1,60	3,91	4,04	4,02	53	86	
	1639	1981	28	12	22	8,41	2,30	2,90	5,02	4,60	85	68	
	1645	1972	34	4	8	7,86	1,76	4,93	5,44	5,07	86	73	
	428	1978	30	9	9	8,57	1,17	6,54	6,77	6,63	85	67	
	1663	1972	34	5	5	8,13	0,87	7,22	7,23	6,65	80	71	
	1649	1973	33	3	6	9,57	1,02	7,95	8,10	7,80	83	58	
	1650	1976	30	5	8	8,37	1,28	6,87	6,88	6,34	86	69	
	1651	n.b.	n.b.	4	7	7,10	0,87	5,53	5,68	5,59	76	80	
	1678	1996	10	14	22	6,03	1,42	3,16	3,53	3,74	86	90	
	1653	1993	13	6	4	5,97	0,96	4,61	4,75	4,29	49	90	
	1658	1990	16	8	9	6,37	1,65	3,81	4,21	3,86	90	87	
	1664	1980	27	24	42	8,05	2,38	2,77	4,24	4,31	76	72	
	1661	1988	19	7	15	9,35	1,47	6,23	6,56	6,89	93	60	
	1685	1972	37	11	23	7,76	1,21	5,00	5,17	5,74	85	74	
	1681	1988	22	5	7	7,68	1,52	5,60	5,82	5,16	83	75	
	1665	1982	26	6	10	6,55	1,24	4,38	4,56	4,51	86	85	
1659	1982	26	10	18	7,14	1,30	4,75	5,25	5,18	78	80		
162	1980	28	3	6	7,88	0,78	6,90	6,96	6,56	77	73		
Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkerne /-abschnitte			26	230	368	7,69	1,45	4,88	5,44	5,33	80	75	

Tabelle 20.2 Zusammenstellung der wichtigsten Trocken-Scherfestigkeitsergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkerne der Gebäudegruppe C, getrennt für die nach Bauwerksaltern unterschiedenen Gebäudeuntergruppen C_40 und C_20



a)

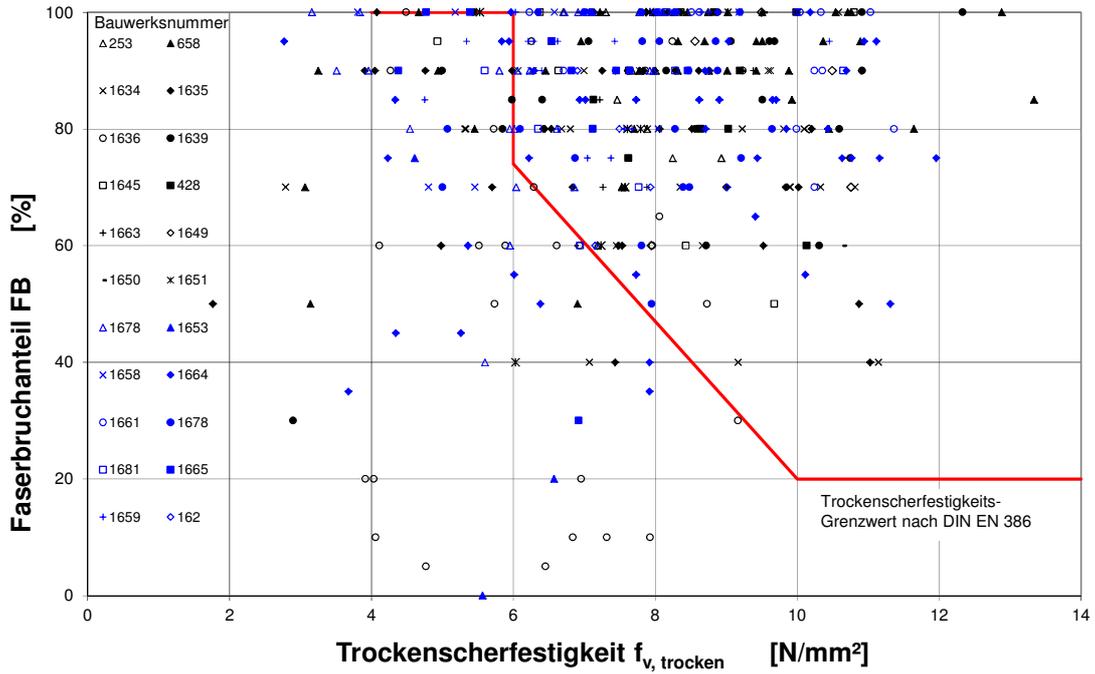


b)

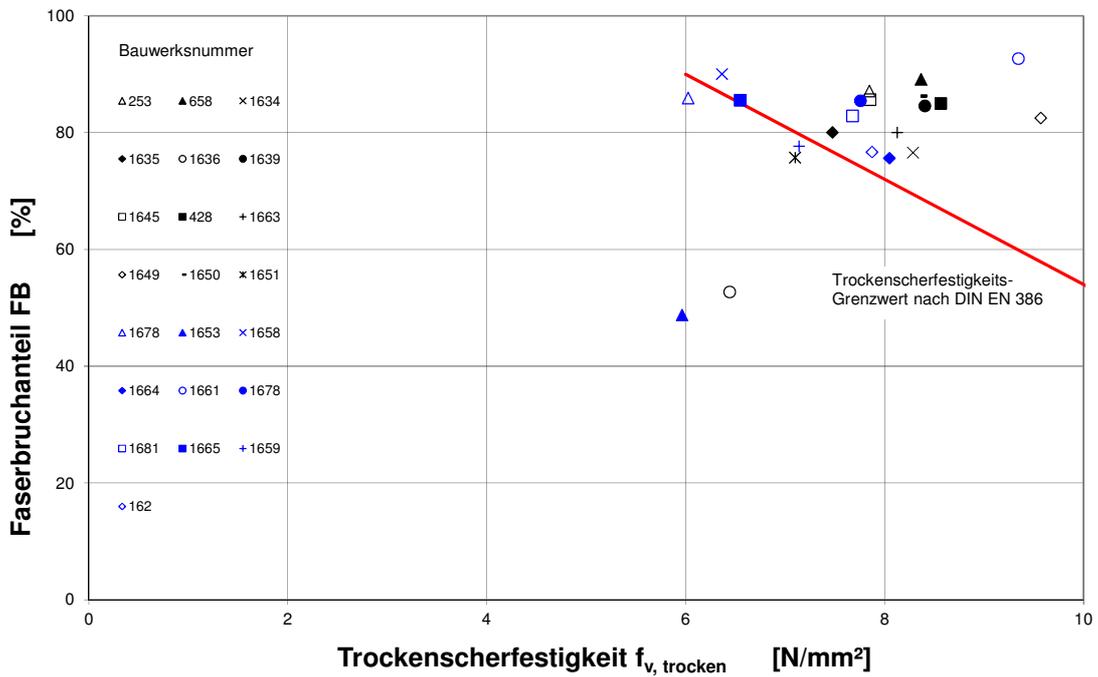
Bild 20.1a,b: Graphische Darstellung der experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen Trocken-Scherfestigkeit (Lagerungsart I) und Faserbruchanteil bei den Untersuchungen an den 34 Gebäuden der Gebäudegruppe C. Mit angegeben sind die Anforderungswerte gemäß EN 386.

a) Einzelwerte

b) Gebäude-Mittelwerte



a)

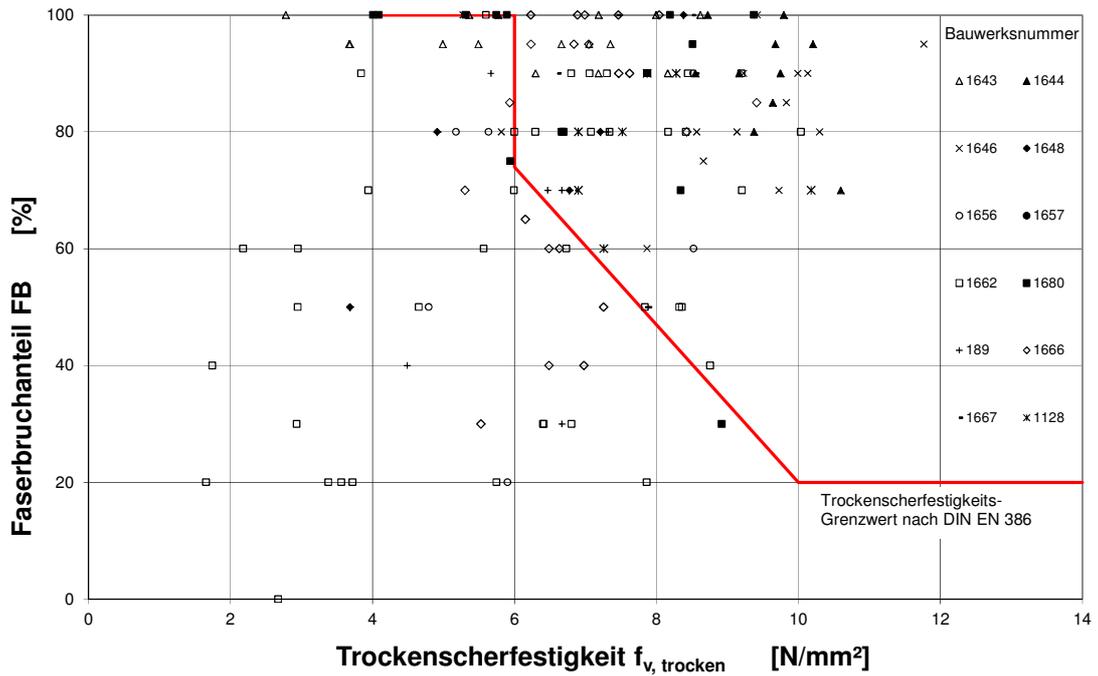


b)

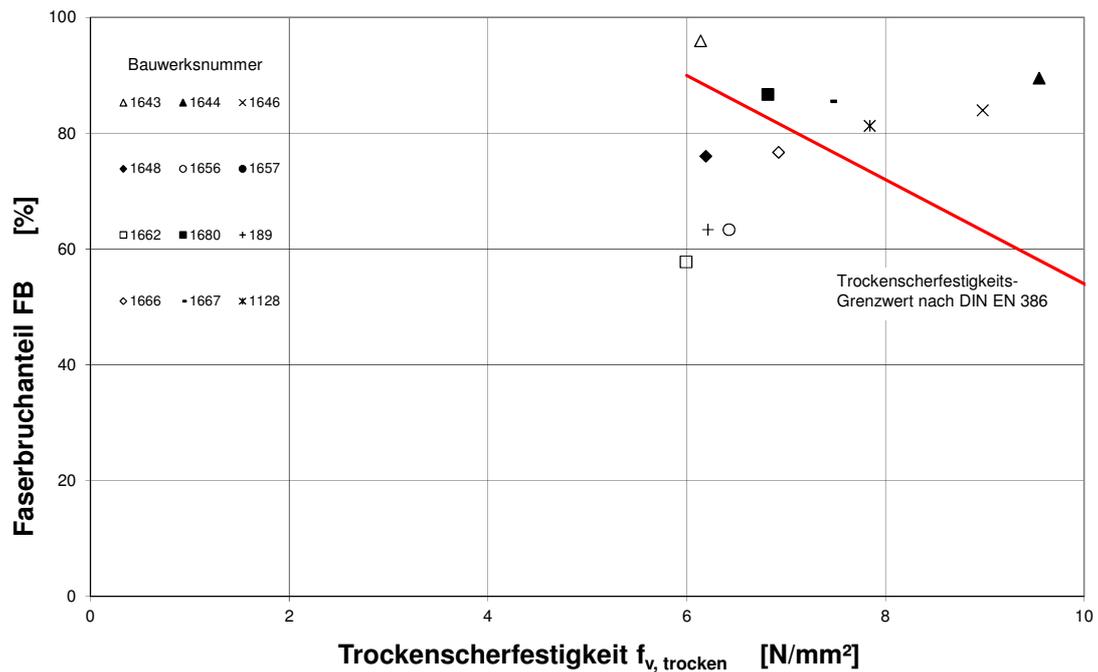
Bild 20.2a,b: Graphische Darstellung der experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen Trockenscherfestigkeit (Lagerungsart I) und Faserbruchanteil bei den Untersuchungen an den Bohrkernen der Gebäude-Untergruppe C_20 (Bauwerksalter < 35 Jahre).

a) Einzelwerte

b) Gebäude-Mittelwerte



a)



b)

Bild 20.3a,b: Graphische Darstellung der experimentell erhaltenen Zusammenhänge zwischen Trockenscherfestigkeit (Lagerungsart I) und Faserbruchanteil bei den Untersuchungen an den Bohrkernen der Gebäude-Untergruppe C_40 (Bauwerksalter > 35 Jahre).

a) Einzelwerte

b) Gebäude-Mittelwerte

Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe		Anzahl der Bauwerke	mittleres Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkern	Anzahl gepr. BK-Abschnitte	Trocken-Scherfestigkeit		
						$f_{v,trocken}$		
		-	J	-		x_{mean}	x_{min}	x_{05}
						N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
G_45	C_40	12	48	97	151	7,14	4,85	5,10
	KF+B_40	8	45	141	139	7,19	3,92	4,59
	KF+B_40 + C_40	20	47	238	290	7,16	4,48	4,89
G_20	C_20	22	25	230	368	7,69	4,88	5,44
	B_20	11	18	117	117	7,94	5,95	6,21
	B_20 + C_20	33	23	347	485	7,77	5,24	5,70

Tabelle 20.3 Gegenüberstellung der wichtigsten Trockenscherfestigkeitsergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkernen der Gebäudeuntergruppe C_40 mit den Ergebnissen der zusammengefassten Gebäudegruppe KF + B_40 bzw. der Gebäudeuntergruppe C_20 mit den Ergebnissen der Gebäudeuntergruppe B_20.

21 Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile der Bohrkerne aus Bestandsbauten mit Kämpf-Trägern bzw. Kastenträgern mit Kämpf- oder Wolff-Stegplatten

21.1 Gebäude Nr. 1576 mit Kämpf-Trägern

Aus dem Kirchengebäude Nr. 1576 wurden insgesamt 17 Bohrkerne aus 8 verschiedenen Kämpf-Trägern entnommen. Fünf Bohrkerne stammten aus den Gurtbereichen (Bohrkernachse rechtwinklig zur Gurt-Steg-Klebefuge). Anmerkung: Die Verklebungen der Brettlamellen der Gurthölzer waren zulassungskonform (N. N., 1961; 1963) mittels Nagelpressklebung ausgeführt. Von den 12 Bohrkerne die aus den Stegbereichen entnommen wurden, enthielten 9 Schmalkantenverklebungen der äußeren oder inneren Stegbretter, die zulassungsgemäß unter einem Winkel von $\pm 15^\circ$ gegenüber der Trägerlängsachse verschränkt sind.

Die Bohrkerne wurden für die Scherprüfungen in insgesamt 36 Bohrkernabschnitte aufgetrennt (vgl. hierzu Tabelle 21.1). Die Scherprüfungen an den Bohrkernabschnitten erfolgten ausschließlich nach Normklimalagerung. Die Einzelwerte der Versuchsergebnisse sind in Tabelle F 90, Anhang F 79, angegeben. Tabelle 21.1 enthält eine komprimierte Zusammenfassung der Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile (jeweils Mittel- und Minimalwert). Des Weiteren ist die Anzahl bzw. der prozentuale Anteil der f_v -FB-Wertepaare, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen aufgeführt.

Die Qualität der Flächenverklebung der Stegbrettlagen ist mit einer mittleren Scherfestigkeit von $7,8 \text{ N/mm}^2$ sowie mit einem mittleren Faserbruchanteil von 81 % als ausreichend gut zu bewerten. Der Minimalwert der Scherfestigkeit betrug $4,4 \text{ N/mm}^2$. Die Schmalkantenverklebung der Stegbrettlagen (Bohrkerne durchweg aus ungerissenen Schmalkantenfugenbereichen) ist mit einer minimalen und mittleren Scherfestigkeit von $5,1 \text{ N/mm}^2$ bzw. $7,5 \text{ N/mm}^2$ als befriedigend zu bewerten; die Faserbruchanteile liegen jedoch gegenüber der breittseitigen Flächenverklebung im Mittel und minimal mit Werten von 62 % bzw. 20 % deutlich niedriger.

Die mittels Nagelpressklebung hergestellte Verklebung der Gurtlamellen wies im Mittel eine Scherfestigkeit von $6,5 \pm 1,5 \text{ N/mm}^2$ auf, wobei der Faserbruchanteil bei $80 \% \pm 27 \%$ lag. Ein Versuchswert lag mit einer Scherfestigkeit von $3,9 \text{ N/mm}^2$ und einem sehr geringen Holzfaserverbruchanteil von 15 % deutlich unterhalb den Anforderungen nach EN 386. Dieses Ergebnis ist auf einen lokal zu niedrigen Pressdruck zurückzuführen. Insgesamt ist die Qualität der Gurtlagenverklebung jedoch als ausreichend zu bewerten. Die ebenfalls mittels Nagel-

pressklebung hergestellte Gurt-Steg-Verklebung konnte nicht geprüft werden; es liegen jedoch keine plausiblen Anhaltspunkte dafür vor, dass diese Verklebungsergebnisse von denjenigen der Gurtlagenverklebungen abweichen sollten.

Bauwerk Nr.	Untersuchungsparameter	Gurtverklebung brettbreitseitig	Gurt-Steg-Verklebungen	Stegverklebungen		
				brettbreitseitig zwischen den einzelnen Steglagen	Schmalkantenverklebung der einzelnen Brettlagen	
1576	Anzahl der Bohrkerne (insgesamt 17)	5	0	12		
	Anzahl der Bohrkerneabschnitte (insgesamt 36)	10	0	17	9	
	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert	6,53	-	7,77	7,47
		Minimalwert (zweitkleinster Wert)	3,91 (4,89)	-	4,39	5,13
	Faserbruchanteil [%]	Mittelwert	80	-	81	62
		Minimalwert	15	-	40	20
Anzahl / Anteil der f_v -FB-Werte, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen		3 / 30 %	-	3 / 18 %	3 / 33 %	

Tabelle 21.1 Zusammenstellung der Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an Bohrkerne mit unterschiedlichen Klebfugentypen des Bauwerks 1576.

21.2 Gebäude Nr. 1679 mit Kastenträgern mit Kämpf-Stegplatten

Aus dem Kirchengebäude Nr. 1679 wurden insgesamt sieben Bohrkerne aus zwei verschiedenen Kasten-Trägern entnommen. In sechs Bohrkerne waren jeweils eine Gurt-Steg-Verklebung sowie die Klebfuge der äußersten (senkrecht stehenden) Brettlamelle des Gurtholzes enthalten. Ein Bohrkern wurde einem Bereich der Stegplatte ohne Gurtholz entnommen. Schmalkantenverklebungsfugen der äußeren oder inneren unter einem Winkel von $\pm 15^\circ$ gegenüber der Trägerlängsachse verschränkten Stegbretter waren nur in einem Bohrkern enthalten.

An den Bohrkerne wurden an insgesamt 27 Klebfugen Scherprüfungen durchgeführt (vgl. hierzu Tabelle 21.2). Die Scherprüfungen an den Bohrkerneabschnitten erfolgten ausschließlich nach Normalklimalagerung. Die Einzelwerte der Versuchsergebnisse sind in Tabelle F 91, Anhang F 80, angegeben. Tabelle 21.2 enthält eine komprimierte Zusammenfassung der Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile (jeweils Mittel- und Minimalwert). Des Weiteren ist die Anzahl bzw. der prozentuale Anteil der f_v -FB-Wertepaare, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen, aufgeführt.

Für die Flächenverklebung der Stegbrettlagen wurde eine mittlere Scherfestigkeit von 7,9 N/mm² sowie ein mittlerer Faserbruchanteil von 71 % erhalten. Der Minimalwert der Scherfestigkeit betrug 5,6 N/mm². Die erhaltenen Werte bilden eine ausreichend gute Verklebungsqualität ab. Dies gilt unter Berücksichtigung der extrem geringen Datenbasis (es wurde nur ein BK-Abschnitt geprüft) auch für die Schmalkantenverklebung der Stegbrettlagen für die eine Scherfestigkeit von 7,5 N/mm² erhalten wurde.

Die Verklebung der Gurtlamellen sowie die Gurt-Steg-Verklebung wiesen im Mittel eine Scherfestigkeit von 8,4 N/mm² bzw. 8,2 N/mm² auf, wobei der mittlere Faserbruchanteil bei 80 % bzw. 77 % lag. Der Minimalwert lag mit einer Scherfestigkeit von 7,14 N/mm² auf relativ hohem Niveau.

Bauwerk Nr.	Untersuchungsparameter	Gurtverklebung brettbreitseitig	Gurt-Steg- Verklebungen	Stegverklebungen		
				brettbreitseitig zwischen den einzelnen Steglagen	Schmalkanten- verklebung der einzelnen Brettlagen	
1679	Anzahl der Bohrkerne (insgesamt 7)	6	6	7		
	Anzahl der Bohrkerneabschnitte (insgesamt 27)	6	6	14	1	
	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert	8,35	8,22	7,88	-
		Minimalwert	7,14	7,23	5,55	7,45
	Faserbruchanteil [%]	Mittelwert	80	77	71	-
		Minimalwert	40	30	50	60
Anzahl / Anteil der f _v -FB-Werte, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen		0 / 0 %	0 / 0 %	3 / 21 %	0 / 0 %	

Tabelle 21.2 Zusammenstellung der Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an Bohrkerne mit unterschiedlichen Klebfugentypen des Bauwerks 1679.

21.3 Gebäude Nr. 1682 mit Kastenträgern mit Wolff-Stegplatten

Aus der Sporthalle Nr. 1682 wurden insgesamt 6 Bohrkerne aus 3 verschiedenen Kastenträgern entnommen. Die dreilagigen Stegplatten der Kastenträger bestanden aus einer 10 mm breiten Mittellage und zwei je 26 mm breiten äußeren Lagen. Die einzelnen Brettlamellen der äußeren Brettlagen waren faserparallel zur Trägerlängsrichtung angeordnet. Die mittlere Brettlage war gegenüber den Decklagen um 90° verdreht quer zur Trägerlängsachse ausgerichtet. An den Bohrkerne konnten drei Schmalkantenverklebungen der äußeren Stegbretter im Scherversuch geprüft werden. Gurt- oder Gurt-Steg-Verklebungen waren nicht enthalten.

An den Bohrkernen wurden an insgesamt 15 Klebfugen Scherprüfungen durchgeführt (vgl. hierzu Tabelle 21.3). Die Scherprüfungen an den Bohrkernabschnitten erfolgten ausschließlich nach Normalklimalagerung. Die Einzelwerte der Versuchsergebnisse sind in Tabelle F 92, Anhang F 81, angegeben. Tabelle 21.3 enthält eine komprimierte Zusammenfassung der Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile (jeweils Mittel- und Minimalwert). Des Weiteren ist die Anzahl bzw. der prozentuale Anteil der f_v -FB-Wertepaare, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen aufgeführt.

Die erhaltene mittlere Scherfestigkeit aller 12 geprüften Bohrkernabschnitte mit Flächenverklebung betrug 2,7 N/mm²; der Kleinstwert der Scherfestigkeit (Bohrkernabschnitt K2.2) ergab sich zu 1,1 N/mm². Der mittlere Faserbruchanteil der Prüfserie lag bei 52 %. Aufgrund der um 90 ° verschränkten Ausrichtung der einzelnen Brettlagen der Stegplatte war bei allen Scherproben ein Rollschubversagen zu beobachten. Die in DIN 1052:2008 angegebene charakteristische Rollschubfestigkeit von $f_{R,k} = 1,0$ N/mm² wurde im Mittel um den Faktor 2,7 übertroffen.

Die mittlere Scherfestigkeit der prüfbaren, nicht gerissenen Bohrkernabschnitte mit Schmalkantenverklebung betrug 7,7 N/mm². Der kleinste Einzelwert der Scherfestigkeit betrug 6,3 N/mm² bei einem Faserbruchanteil von 100 %. Der mittlere Faserbruchanteil der Prüfserie lag bei 67 %. Die Anforderungen der DIN EN 386 bezüglich der gekoppelt zu bewertenden Durchschnittswerte der Scherfestigkeit und des Faserbruchanteils einer Prüfserie wurden in Bezug auf die Faserbruchanteile knapp (um 7%) unterschritten.

Bauwerk Nr.	Untersuchungsparameter	Gurtverklebung brettbreitseitig	Gurt-Steg-Verklebungen	Stegverklebungen		
				brettbreitseitig zwischen den einzelnen Steglagen	Schmalkantenverklebung der einzelnen Brettlagen	
1682	Anzahl der Bohrkern (insgesamt 6)	0	0	6		
	Anzahl der Bohrkernabschnitte (insgesamt 15)	0	0	12	3	
	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert	-	-	2,73 ¹⁾	7,74
		Minimalwert	-	-	1,11 ¹⁾	6,31
	Faserbruchanteil [%]	Mittelwert	-	-	52 ¹⁾	67
		Minimalwert	-	-	10 ¹⁾	20
Anzahl / Anteil der f_v -FB-Werte, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen		-	-	12 / 100 % ¹⁾	1 / 33 %	

1) Geringe f_v -FB-Werte aufgrund 90 ° Rollschubversagen (Die Verschränkung der mittleren Stegplatte betrug 90 °)

Tabelle 21.3 Zusammenstellung der Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an Bohrkernen mit unterschiedlichen Klebfugentypen des Bauwerks 1682.

21.4 Gebäude Nr. 1683 mit Kämpf-Trägern

Aus dem Kirchengebäude Nr. 1683 wurden insgesamt 4 Bohrkern aus 2 verschiedenen Kämpf-Trägern entnommen. Drei Bohrkern enthielten Gurt-Verklebungen (Verklebungen der Brettlamellen der Gurthölzer waren mit Nagelpressklebung ausgeführt). Ein Bohrkern enthielt Flächen- und Schmalkanten-Verklebungen der Brettlamellen der Stegplatte.

An den Bohrkernen wurden an insgesamt 9 Klebfugen Scherprüfungen durchgeführt (vgl. hierzu Tabelle 21.4). Die Scherprüfungen an den Bohrkernabschnitten erfolgten ausschließlich nach Normalklimalagerung. Die Einzelwerte der Versuchsergebnisse sind in Tabelle F 93, Anhang F 82, angegeben. Tabelle 21.4 enthält eine komprimierte Zusammenfassung der Scherfestigkeiten und Faserbruchanteile (jeweils Mittel- und Minimalwert). Des Weiteren ist die Anzahl bzw. der prozentuale Anteil der f_v -FB-Wertepaare, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen aufgeführt.

Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an den Stegplattenverklebungen (sowohl Flächen- als auch Schmalkantenverklebung) übertrafen mit Scherfestigkeiten zwischen 7,9 N/mm² und 12,2 N/mm² bei Faserbruchanteilen von 90 % bzw. 100 % die Anforderungen der DIN EN 386 deutlich.

Die Scherfestigkeitsprüfungen an den Gurtholzverklebungen ergaben bei drei von sechs Proben Ergebnisse, die das kombinierte Scherfestigkeits-/ Faserbelagskriterium deutlich erfüllten. Bei einer Probe mit vergleichsweise hoher Scherfestigkeit von 7,5 N/mm² wurde das Mindestfaserbruchkriterium in geringem Umfang und damit noch vertretbar unterschritten. Bei zwei Proben lagen wesentliche Unterschreitungen des Faserbruchkriteriums vor, wobei in einem Falle (Bohrkernabschnitt K1_a) die Scherfestigkeit in Höhe von 4,8 N/mm² mit Bezug auf eine sehr geringe Holzqualität (geringe Rohdichte, sehr große Jahringbreiten) ausreichend hoch ist. Die durchschnittliche Scherfestigkeit der geprüften Bohrkernabschnitte aus Gurthölzern betrug 6,7 N/mm² und kann als ausreichend hoch gewertet werden. Der durchschnittliche und minimale Faserbruchanteil von 55 % bzw. 10 % liegt vergleichsweise deutlich unterhalb der Mindestanforderung nach DIN EN 386. Die teilweise sehr niedrigen Faserbruchanteile stehen wahrscheinlich im Zusammenhang mit den niedrigen Pressdrücken bei der verwendeten Nagelpressklebung und den hieraus resultierenden, teilweise sehr großen Klebstoffugendicken.

Bauwerk Nr.	Untersuchungsparameter	Gurtverklebung brettbreitseitig	Gurt-Steg- Verklebungen	Stegverklebungen		
				brettbreitseitig zwischen den einzelnen Steglagen	Schmalkanten- verklebung der einzelnen Brettlagen	
1683	Anzahl der Bohrkerne (insgesamt 4)	3	0	1		
	Anzahl der Bohrkerndabschnitte (insgesamt 9)	6	0	2	1	
	Scherfestigkeit [N/mm ²]	Mittelwert	6,65	-	9,52	
		Minimalwert	4,84	-	7,91	12,17
	Faserbruchanteil [%]	Mittelwert	55	-	100	-
		Minimalwert	10	-	100	90
Anzahl / Anteil der f _v -FB-Werte, die nicht den Anforderungen der DIN EN 386 genügen		2 / 33 %	-	0 / 0 %	0 / 0 %	

Tabelle 21.4 Zusammenstellung der Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen an Bohrkerne mit unterschiedlichen Klebfugentypen des Bauwerks 1683.

22 Zusammenfassung und Diskussion der Bohrkern- Versuchsergebnisse der Gebäudegruppen KF, B und C

Bild 22.1 zeigt in summarischer Darstellung die Festigkeitsverteilungen (= relative kummulative Häufigkeiten) der Scherfestigkeiten aller Bohrkernabschnitte ohne Differenzierung nach Bauwerksaltern separat für die Lagerungsarten I (trocken), II (nass) und III (wiedertrocken). Die wichtigsten statistischen Kenngrößen der jeweiligen Festigkeitsverteilungen sind in Tabelle 22.1 angegeben. Wie erwartet, unterscheiden sich die jeweiligen Festigkeitsverteilungen hinsichtlich der Form der Verteilungen und der statistischen Kennwerte deutlich, wobei der größte Unterschied zwischen den Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten vorliegt. Tabelle 22.2 enthält eine Zusammenstellung der Verhältniswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten bzw. von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeiten aller Bohrkernabschnitte.

Die Bilder 22.2 bis 22.4 zeigen getrennt für die Trocken-, Nass- und Wiedertrockenscherversuche aller Bohrkernabschnitte die Zusammenhänge zwischen Faserbruchanteil und Scherfestigkeit. Mit angegeben ist jeweils der Kurvenverlauf der Anforderungswerte an die Trockenscherfestigkeit gemäß EN 386.

Wie aus den Tabellen 22.1 und 22.2 ersichtlich, liegt die mittlere Nass-Scherfestigkeit (Basis: Gebäudemittelwerte) aller Proben mit einem Wert von $f_{v,nass,mean} = 3,82 \text{ N/mm}^2$ um 50% unter dem Mittelwert der Trockenscherfestigkeit von $f_{v,trocken,mean} = 7,55 \text{ N/mm}^2$. Auf dem Niveau der 5 %-Quantilwerte, ermittelt parameterfrei durch Abzählen der Einzelwerte, und auf dem Minimalwertniveau (Einzelwerte) beträgt das $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältnis 0,66 bzw. 0,6 (auf Basis der Gebäudeverteilungen erhält man auf dem 5 %-Quantil- und Minimalwertniveau etwas geringere $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältnisse von rd. 0,58). Die Festigkeitsverteilung der Wiedertrockenscherfestigkeiten, deren Mittelwert $f_{v,re-dry,mean} = 6,1 \text{ N/mm}^2$ beträgt (Basis: Einzelwerte), verläuft näherungsweise affin zur Verteilung der Trockenscherfestigkeit und liegt diesbezüglich im Mittel um rd. 20 % und auf dem 5 %-Quantilniveau um rd. 40 % niedriger (bezüglich der vergleichsweise geringen Unterschiede der $f_{v,re-dry}/f_{v,trocken}$ -Verhältnisse auf Basis der Einzel- bzw. der Gebäudewerte vgl. Tabelle 22.2)

Aufbauend auf den in den vorstehenden Abschnitten besprochenen Ergebnissen der einzelnen Bauwerksgruppen KF, B und C steht bei der Diskussion der Gesamtheit der Bohrkern-Versuchsergebnisse eine Differenzierung der Ergebnisse im Hinblick auf das Bauwerks/Klebfugenalter im Vordergrund, um Schlüsse bezüglich des Alterungsverhaltens der

UF-Klebefugen abzuleiten. Mit Bezug hierauf enthalten die Tabellen 22.3a-c die nach zwei deutlich unterschiedlichen mittleren Bauwerksaltern differenzierten Versuchsergebnisse. Die Versuchsergebnisse sind zum einen für die Gebäudegruppe G_45 mit einem mittleren Bauwerksalter von 46 Jahren und zum anderen für die Gebäudegruppe G_20 mit einem mittleren Gebäudealter von 23 Jahren angegeben. Vergleichbar sind in Tabelle 22.4 die Festigkeits-Verhältnisse $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ bzw. $f_{v,re-dry}/f_{v,trocken}$ für die beiden Gebäudealtersgruppen angegeben.

Zur graphischen Veranschaulichung des Einflusses des Gebäudealters sind die kumulativen Festigkeitsverteilungen der Trocken-, Nass- und Wiedertrockenfestigkeiten in den Bildern 22.5a-c und 22.6a-c jeweils getrennt für die Gebäudealtersgruppen G_45 und G_20 angegeben. Die Bilder 22.5a-c zeigen hierbei die Festigkeitsverteilungen aller Einzelwerte und die Bilder 22.6a-c geben die Festigkeitsverteilungen auf Basis der Gebäudemittelwerte an. Des Weiteren sind in den Bildern 22.7a-c und 22.8a-c die kumulativen Häufigkeiten der 5%-Quantilwerte bzw. der Minimalwerte der Trocken-, Nass- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten der einzelnen Gebäude der Gebäudegruppen KF, B und C getrennt nach den Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45 angegeben.

Die Bilder 22.9 a und b veranschaulichen die Verhältnisse der Trocken-, Nass- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten der „alten“ bezüglich der „neuen“ Gebäude ($f_{v,G_45}/f_{v,G_20}$) in Form von Balkendiagrammen für die statischen Kenngrößen – Mittelwert, 5%-Quantile und Minimalwert.

Im Einzelnen zeigen die Bilder 22.9 a und b die genannten Verhältnisse auf Basis der Gebäudefestigkeitsverteilungen respektive auf der Grundlage der Einzelwerte aller Bohrkernabschnitte. Die Balkendiagramme der Bilder 22.10a,b zeigen das Verhältnis von Nass- zu Trockenscherfestigkeit bzw. von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeit getrennt für die „alten“ und „neuen“ Gebäude (G_20 bzw. G_45) jeweils auf dem Niveau der Mittelwerte, der 5 %-Quantilen und der Minimalwerte.

Wie aus den vorstehend genannten Tabellen und Bildern ersichtlich, liegen bei allen Scherfestigkeiten ($f_{v,trocken}$; $f_{v,nass}$; $f_{v,re-dry}$) nahezu durchweg erhebliche Unterschiede zwischen den Festigkeitsverteilungen der beiden Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45 vor, die auf dem Niveau der 5%-Quantil- und der Minimalwerte am ausgeprägtesten sind. Eine Ausnahme bilden die Wiedertrocken-Scherfestigkeiten, die auf dem Mittelwertniveau bei den „älteren“ Gebäuden ein rd. 5 % höheres Festigkeitsniveau im Vergleich zu den „jüngeren“ Gebäuden

aufweisen (vgl. Bilder 22.5b, 22.6b und 22.9). Die Unterschiede der Festigkeitsverteilungen sind bei den Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten gut vergleichbar.

Die Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude (G_45) liegen im Mittel aller Gebäude bei dem rd. 0,9-fachen der Festigkeiten der „jüngeren“ Gebäude (vgl. Bild 22.9). Im Gegensatz dazu liegen die mittleren Wiedertrocken-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude eher unerwartet um 5% über den Festigkeitswerten der „jüngeren“ Gebäude. Auf dem 5%-Quantilniveau sind bei den Trocken-, Nass- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude in sehr grober Näherung (Basis: Gebäudefestigkeitsverteilungen, Bild 22.9a) vergleichbare Festigkeitsabnahmen von rd. 20 % zu konstatieren (Trockenfestigkeiten: -14 %, Wiedertrockenfestigkeiten: -20 %, Nassfestigkeiten: -24 %). Die genannte rd. 20%-ige 5%-Quantil-Festigkeitsminderung der „älteren“ Gebäude trifft bei den Trockenscherfestigkeiten auch auf das Minimalwertniveau zu, während bei den Nass- und Wiedertrockenscherfestigkeiten die Minimalwerte der „älteren“ Gebäude im Mittel (Gebäudefestigkeitsverteilungen) eine Festigkeitsabnahme auf rd. 2/3 des Festigkeitsniveaus der „jüngeren“ Gebäude aufweisen.

Für die Bewertung des Alterungsverhaltens der UF-Klebstofffugen ist speziell auch das Verhältnis von Nass- zu Trockenscherfestigkeiten bzw. von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeiten und sodann die Veränderung dieser Verhältnisse mit zunehmender Gebäude- bzw. Fugenalterung bedeutsam. Die nachfolgend spezifizierten Festigkeitsverhältnisse basieren auf den mittleren Gebäudefestigkeitswerten der Tabelle 22.3a – c, die sich teilweise geringfügig von den Verhältniswerten in Tabelle 22.4 unterscheiden. Wie anschaulich aus Bild 22.10a hervorgeht, bleibt das Festigkeitsverhältnis $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ auf allen relevanten statistischen Niveaus (x_{mean} , x_{05} , x_{min}) bei beiden Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45 praktisch unverändert. Das $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältnis beträgt unabhängig vom Gebäudealter auf dem Mittelwertsniveau 0,50 und auf dem 5%-Quantil- und Minimalwertniveau übereinstimmend rd. 0,56.

Im Gegensatz zu dem konstant bleibenden $f_{v,nass}/f_{v,trocken}$ -Verhältnis ist bei dem Verhältnis von Wiedertrocken- zu Trockenfestigkeit ($f_{v,re-dry}/f_{v,trocken}$) auf dem Mittelwerts- und 5%-Quantilniveau bei der älteren Gebäudegruppe eine Abnahme der Verhältniswerte um rd. 15% bzw. 10% zu konstatieren (vgl. Tabelle 22.4 und Bild 22.10b). Auf dem Minimalwertsniveau liegen keine Unterschiede bezüglich des Gebäudealters vor.

Die Zusammenhänge zwischen den Scherfestigkeiten und den jeweiligen Faserbruchanteilen sind in den Bildern 22.11a,b bis 22.16a,b getrennt nach den Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45 und hierbei jeweils für die Einzelwerte und die Gebäudemittelwerte angegeben. Aus den Graphen ist deutlich erkennbar, dass sich die Scherfestigkeits-Faserbruch-Zusammenhänge auf dem Einzelwert- und dem Gebäudemittelwertniveau von der „jüngeren“ zur „älteren“ Gebäudegruppe hin zu niedrigeren Werten verschoben haben. Quantitativ lässt sich dieser Sachverhalt im Falle der Trockenscherfestigkeit an der Erfüllung der Scherfestigkeits-Faserbruchanteil-Anforderung der DIN EN 386 (siehe Abschnitt 10.3, Gl. (10.5a) für Einzelwerte bzw. Gl. (10.5b) für Gebäudemittelwerte) aufzeigen. Tabelle 22.5 gibt getrennt für die Bohrkernabschnitt- Einzelwerte und für die Gebäudemittelwerte die prozentualen Anteile der anforderungskonformen f_v -FB-Versuchsergebnisse zum einen für alle Gebäudegruppen KF, B + C und zum anderen getrennt für die beiden altersmäßig unterschiedlichen Gebäudeuntergruppen G_20 und G_45 an.

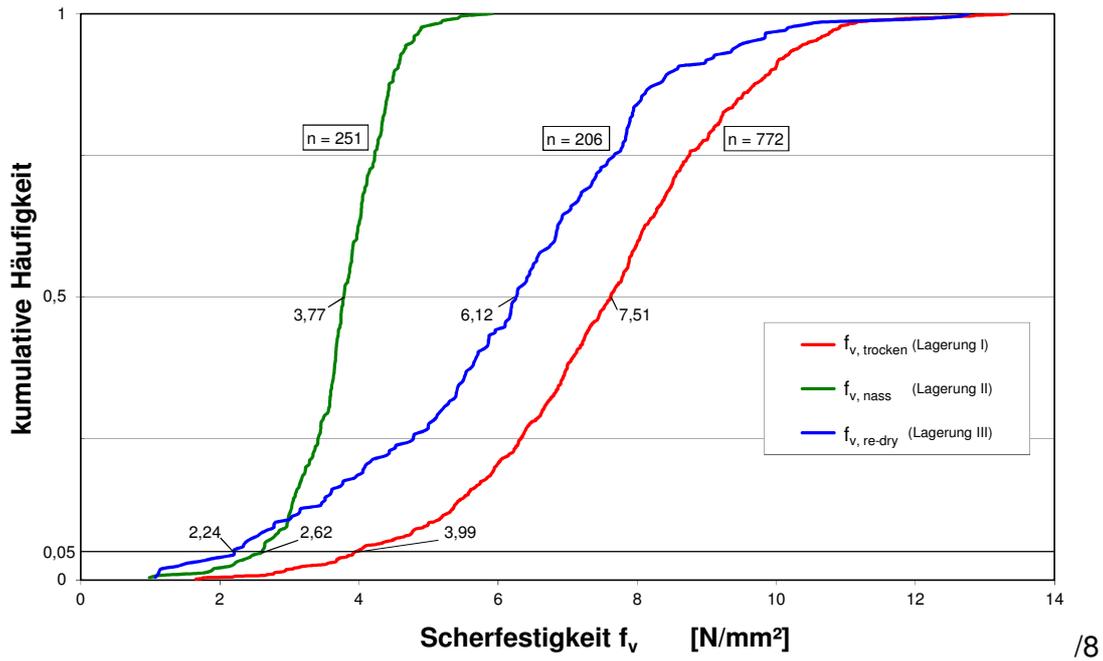


Bild 22.1 Festigkeitsverteilungen (relative kumulative Häufigkeiten) der Trocken-, Nass- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten aller Bohrkernabschnitte der Gebäudegruppen KF, B und C

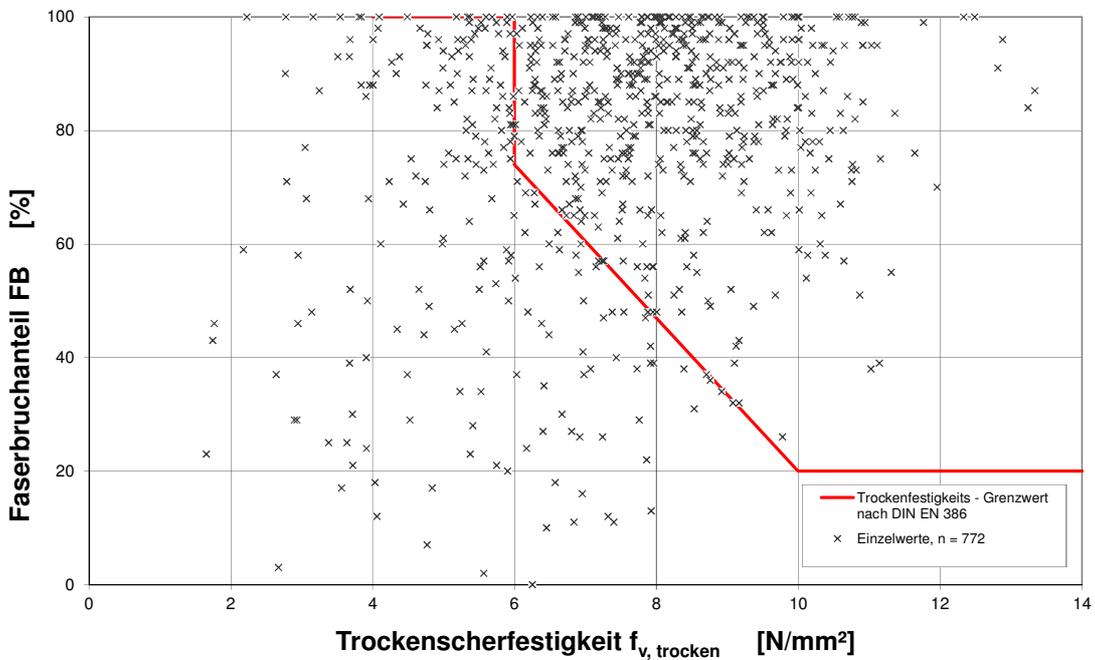


Bild 22.2 Zusammenhang zwischen Trockenscherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudegruppen KF, B und C

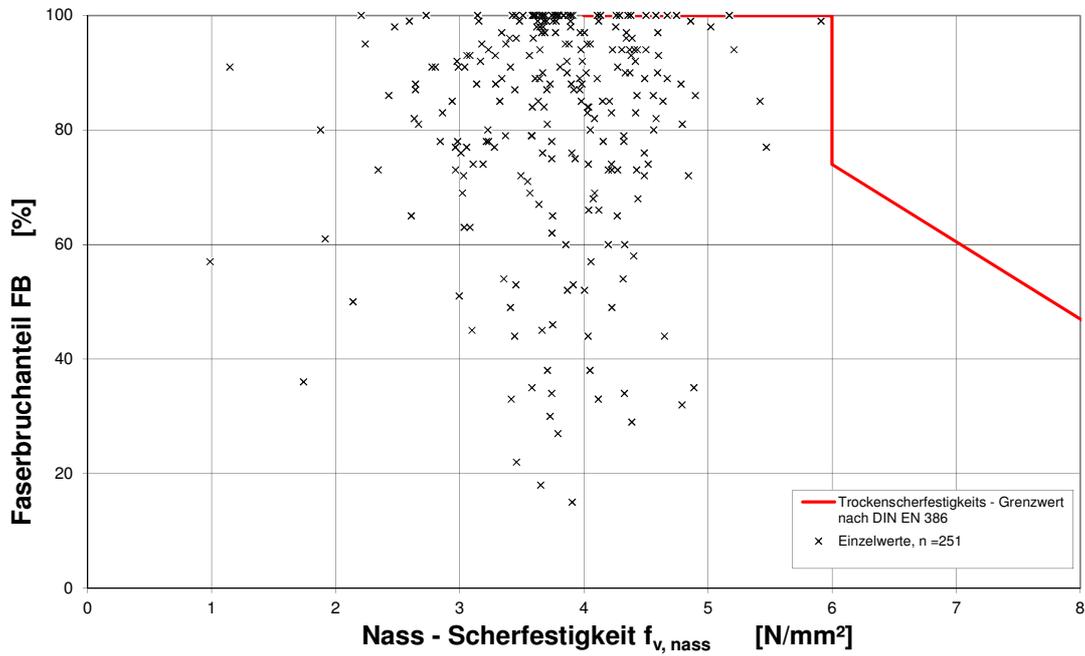


Bild 22.3 Zusammenhang zwischen Nass-Scherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudegruppen KF und B

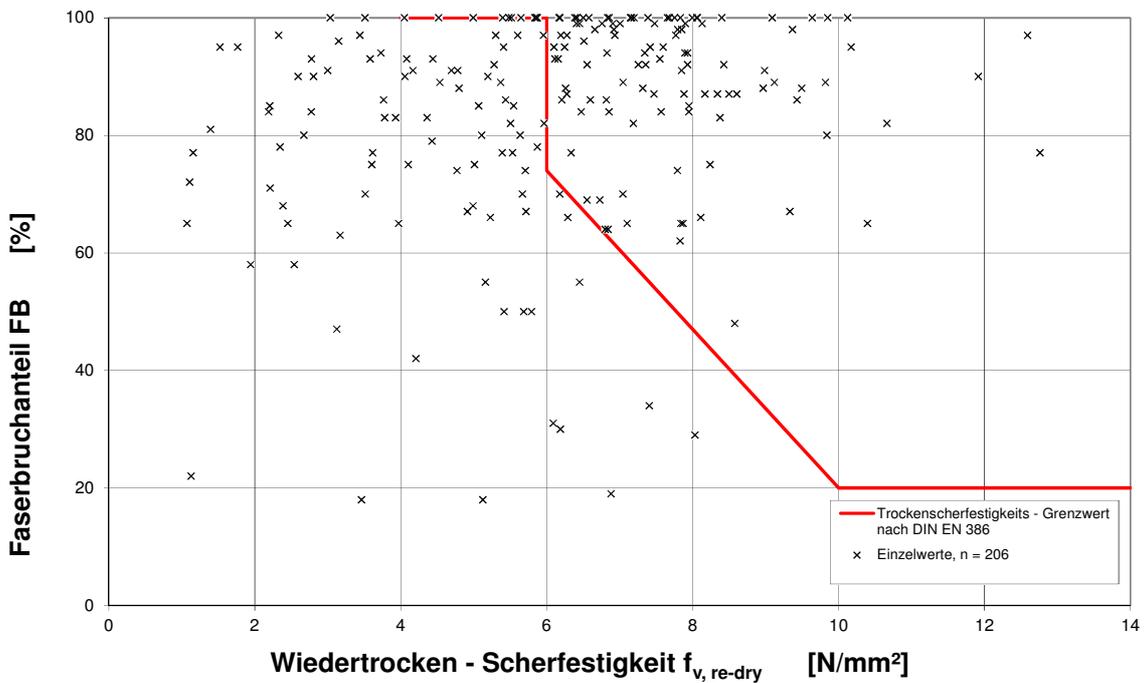


Bild 22.4 Zusammenhang zwischen Wiedertrocken-Scherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudegruppen KF und B

Scherfestigkeit bzw. Lagerungsart	Anzahl der Bauwerke	Anzahl der gepr. Bohrkernabschnitte	Auswertungsgrundlage	Statistische Kenngrößen der Scherfestigkeiten			
				Mittelwert	Standardabweichung	Minimalwert	5 %-Quantilwert
				X_{mean}	s	X_{min}	X_{05}
				N/mm ²	-	N/mm ²	N/mm ²
$f_{v,\text{trocken}}$ (I)	53	772	Einzelwerte aller Bohrkernabschnitte	7,51	1,92	1,66	3,99
			Ergebnisse der einzelnen Gebäude	7,55	0,95	4,95 ¹⁾	5,4 ²⁾
$f_{v,\text{nass}}$ (II)	19	251	Einzelwerte aller Bohrkernabschnitte	3,77	0,69	0,99	2,62
			Ergebnisse der einzelnen Gebäude	3,82	0,34	2,85 ¹⁾	3,1 ²⁾
$f_{v,\text{re-dry}}$ (III)	16	206	Einzelwerte aller Bohrkernabschnitte	6,12	2,23	1,07	2,24
			Ergebnisse der einzelnen Gebäude	5,97	1,10	2,80 ¹⁾	3,34 ²⁾

¹⁾ bzgl. der Bohrkernanzahl ungewichteter Mittelwert der Minimalwerte der einzelnen Gebäude

²⁾ bzgl. der Bohrkernanzahl ungewichteter Mittelwert der 5%-Quantilwerte der einzelnen Gebäude

Tabelle 22.1 Statistische Kenngrößen (Mittelwert, Standardabweichung, Minimalwert und 5%-Quantile) der Trocken-, Nass- und Wiedertrocken- Scherfestigkeitsergebnisse aller Bohrkernabschnitte der Gebäudegruppen KF, B und C. Die Auswertungen sind zu einem auf der Grundlage aller Einzelwerte und zum anderen auf der Basis der einzelnen Gebäude angegeben.

Scherfestigkeitsverhältnis	Anzahl der Bauwerke	Anzahl der gepr. Bohrkernabschnitte	Auswertungsgrundlage	Scherfestigkeitsverhältnisse auf Basis der		
				Mittelwerte	Minimalwerte	5 %-Quantilwerte
				X_{mean}	X_{min}	X_{05}
$\frac{f_{v,\text{nass}}}{f_{v,\text{trocken}}}$	19	251	Einzelwerte	0,50	0,60	0,66
			Gebäudewerte	0,50	0,58	0,57
$\frac{f_{v,\text{re-dry}}}{f_{v,\text{trocken}}}$	16	206	Einzelwerte	0,81	0,64	0,56
			Gebäudewerte	0,79	0,57	0,62

Tabelle 22.2 Verhältnswerte von Nass- zu Trockenscherfestigkeit sowie von Wiedertrocken- zu Trockenscherfestigkeit basierend auf den Mittelwerten, Minimalwerten und 5%-Quantilen der Einzelwerte aller Bohrkernabschnitte bzw. auf den Festigkeitskenngrößen der einzelnen Gebäude (vgl. Tabelle 22.1)

Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe		Anzahl der Bauwerke	mittleres Bauwerkalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Trocken-Scherfestigkeit $f_{v,trocken}$			
					Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean} N/mm ²	x_{min} N/mm ²	x_{05} N/mm ²
		-	J	-				
G_45	KF+B_40	8	45	141	140	7,19	3,92	4,59
	C_40	12	48	97	148	7,14	4,85	5,10
	KF+B_40 + C_40	20	47	238	288	7,16	4,48	4,89
G_20	B_20	11	18	117	116	7,94	5,95	6,21
	C_20	22	25	230	368	7,69	4,88	5,44
	B_20 + C_20	33	23	347	484	7,77	5,24	5,70

a)

Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe		Anzahl der Bauwerke	mittleres Bauwerkalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Nass-Scherfestigkeit $f_{v,nass}$			
					Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean} N/mm ²	x_{min} N/mm ²	x_{05} N/mm ²
		-	J	-				
G_45	KF+B_40	8	45	141	136	3,59	2,18	2,61
	C_40	12	48	97	-	-	-	-
	KF+B_40 + C_40	20	47	238	136	3,59	2,18	2,61
G_20	B_20	11	18	117	115	3,98	3,34	3,45
	C_20	22	25	230	-	-	-	-
	B_20 + C_20	33	23	347	115	3,98	3,34	3,45

b)

Bezeichnung der Gebäudegruppe bzw. Untergruppe		Anzahl der Bauwerke	mittleres Bauwerkalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Wiedertrocken-Scherfestigkeit $f_{v,re-dry}$			
					Anzahl gepr. BK-Abschnitte	x_{mean} N/mm ²	x_{min} N/mm ²	x_{05} N/mm ²
		-	J	-				
G_45	KF+B_40	8	45	141	126	6,10	2,23	2,97
	C_40	12	48	97	-	-	-	-
	KF+B_40 + C_40	20	47	238	126	6,10	2,23	2,97
G_20	B_20	11	18	117	80	5,83	3,37	3,71
	C_20	22	25	230	-	-	-	-
	B_20 + C_20	33	23	347	80	5,83	3,37	3,71

c)

Tabelle 22.3a-c Zusammenstellung der Trocken-, Nass- und Wiedertrocken- Scherfestigkeiten, getrennt für die zwei unterschiedlichen Gebäudealtersgruppen G_45 (mittleres Bauwerkalter 46 Jahre) und G_20 (mittleres Bauwerkalter 20 Jahre); Basis mittlere Gebäudewerte (x_{mean} , x_{min} , x_{05}), vgl. Tabellen 19.2, 19.3 und 20.2

a) Trockenscherfestigkeit

b) Nass- Scherfestigkeit

c) Wiedertrocken- Scherfestigkeit

Bezeichnung der Gebäudegruppe	Bezeichnung der Gebäudeuntergruppe	Bauwerks-Nr.	Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung	Anzahl der entnommenen Bohrkerne	Scherfestigkeitsverhältnisse					
					$\frac{f_{v, nass}}{f_{v, trocken}}$			$\frac{f_{v, re-dry}}{f_{v, trocken}}$		
					X_{mean}	X_{min}	X_{05}	X_{mean}	X_{min}	X_{05}
G_45	KF	1619	46	27	0,50	0,25	0,46	1,21	0,60	0,70
		1627	49	16	0,55	0,71	0,58	1,04	0,59	0,95
		1630	44	18	0,48	0,29	0,46	0,92	0,80	0,76
		1631	44	16	0,54	0,79	0,66	0,68	0,50	0,46
		1621	51	20	0,46	0,55	0,56	0,84	0,68	0,87
		1612	49	15	0,49	1,14	0,90	0,79	0,41	0,33
	B_40	1633	41	14	0,49	0,28	0,34	0,68	0,39	0,42
		1356	36	15	0,49	1,00	0,88	0,67	0,62	0,52
	Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkerne /- abschnitte		45	141	0,50	0,63	0,61	0,85	0,57	0,63
G_20	B_20	1580	30	15	0,48	0,58	0,58	0,56	0,45	0,47
		1587	30	15	0,51	0,58	0,56	0,66	0,35	0,40
		1605	6	9	0,47	0,58	0,56	0,81	0,90	0,89
		1606	6	8	0,50	0,53	0,54	0,88	0,85	0,85
		1669	6	10	0,49	0,53	0,51	0,83	0,76	0,74
		1670	6	10	0,48	0,59	0,52	0,75	0,21	0,35
		1671	6	10	0,51	0,53	0,55	0,82	0,64	0,70
		800	34	8	0,48	0,59	0,55	0,52	0,21	0,24
		1640	24	12	0,48	0,44	0,47	-	-	-
		1641	20	8	0,59	0,76	0,77	-	-	-
		1642	26	12	0,53	0,52	0,53	-	-	-
	Mittelwerte bzw. Summe der Bohrkerne /- abschnitte		18	117	0,50	0,57	0,56	0,73	0,54	0,58

Tabelle 22.4 Verhältnswerte der Nass- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten bezogen auf die Trockenscherfestigkeiten ($f_{v,nass} / f_{v,trocken}$, $f_{v,re-dry} / f_{v,trocken}$) getrennt für die zwei unterschiedlichen Gebäudealtersgruppen G_45 und G_20

prozentualer Anteil der DIN EN 386 anforderungskonformen Trockenfestigkeits-Faserbruch-Ergebnisse			
	alle Gebäude KF, B + C %	Gebäudegruppe G_20 %	Gebäudegruppe G_45 %
Einzelwerte	75%	80%	66%
Gebäudemittelwerte	66%	82%	40%

Tabelle 22.5 Gegenüberstellung der DIN EN 386-anforderungskonformen Versuchsergebnisse der Trockenscherfestigkeit (in Prozent bezogen auf die jeweilige Prüfkörper- /Gebäudeanzahl) für alle Gebäudegruppen sowie für die altersmäßig unterschiedlichen Gebäudeuntergruppen G_20 und G_45.

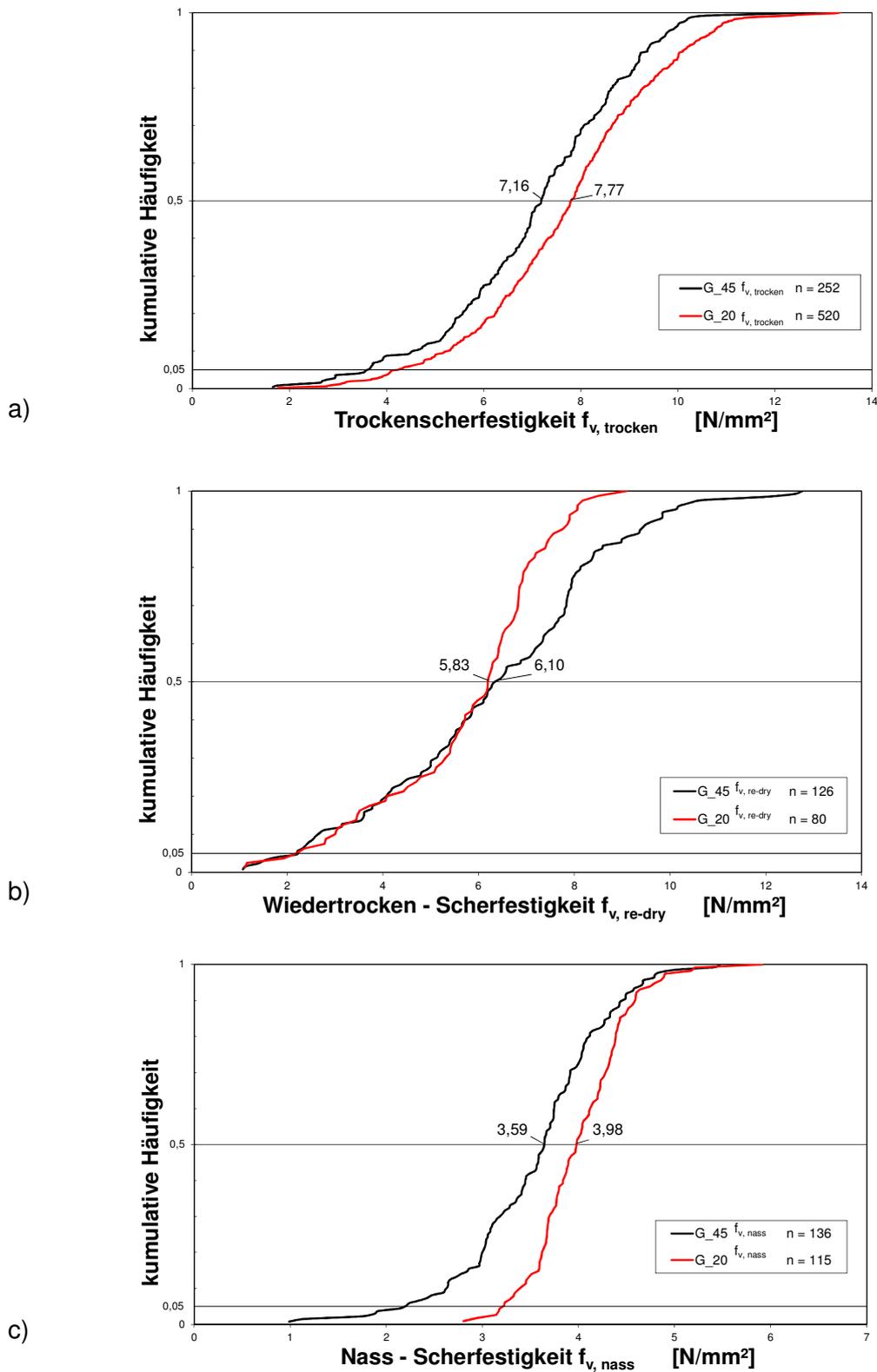


Bild 22.5a-c: Scherfestigkeitsverteilungen (kumulative Häufigkeiten) aller Bohrkernabschnitt-Einzelwerte der Gebäudegruppen KF, B und C getrennt nach den Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45

a) $f_{v, trocken}$

b) $f_{v, re-dry}$

c) $f_{v, nass}$

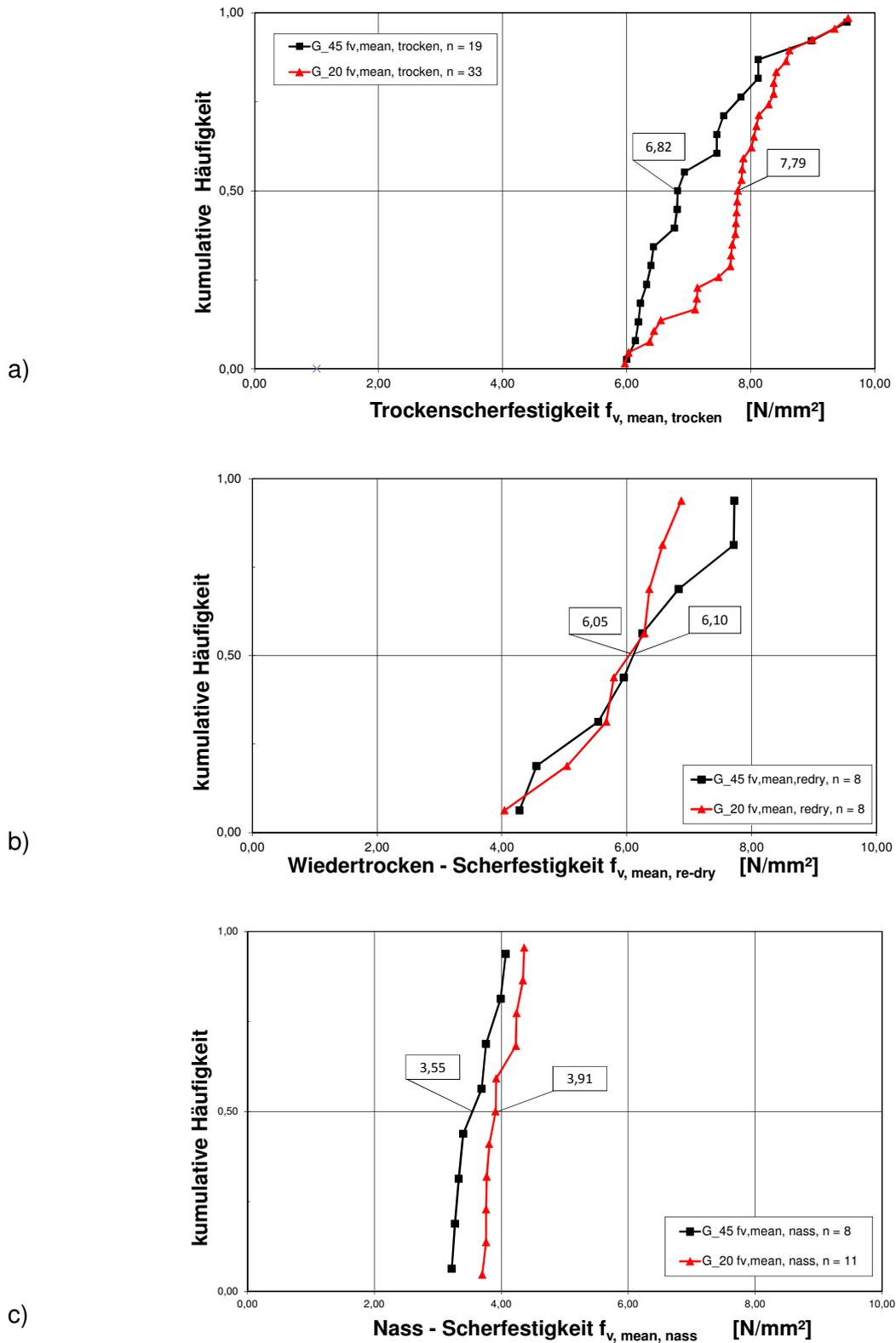


Bild 22.6a-c: Häufigkeitsverteilungen der mittleren Trocken-, Nass- und Wiedertrocken-Schersfestigkeiten aller Gebäude der Gebäudegruppen KF, B und C getrennt nach den Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45

a) $f_{v, \text{trocken}}$

b) $f_{v, \text{re-dry}}$

c) $f_{v, \text{nass}}$

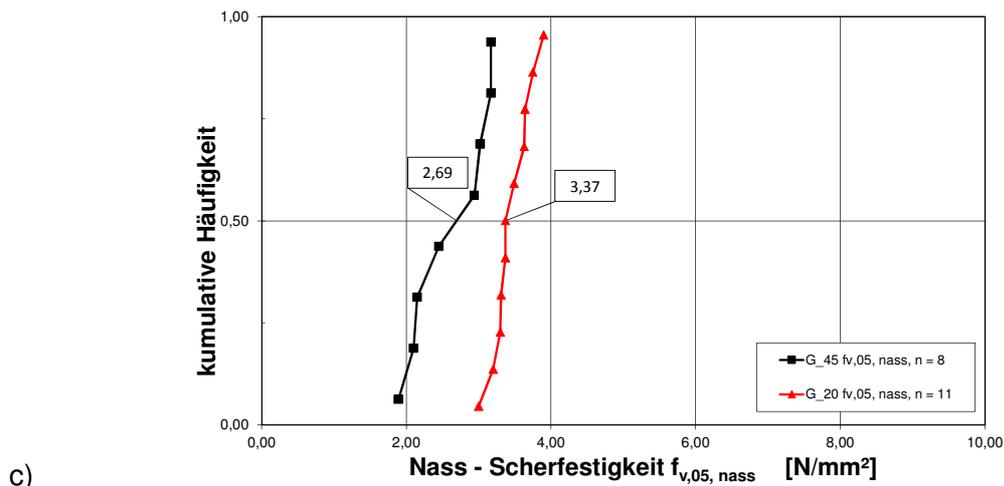
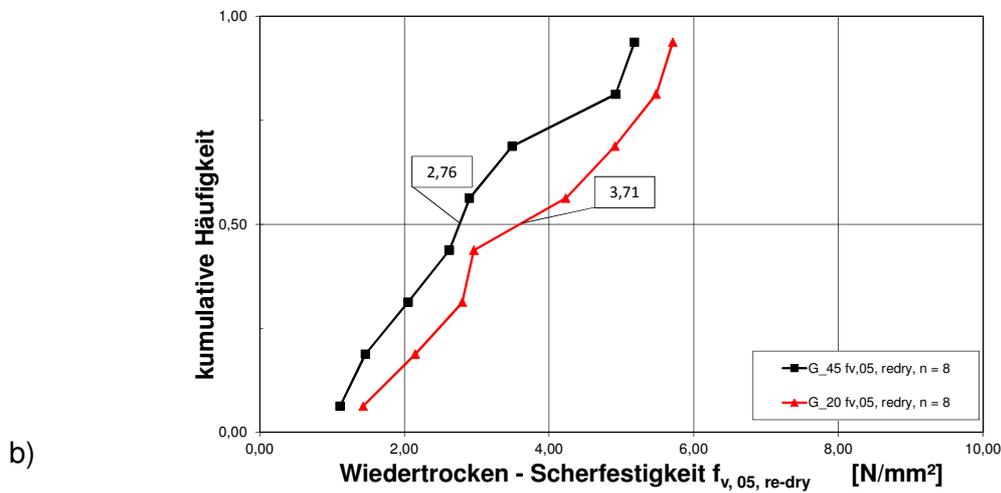
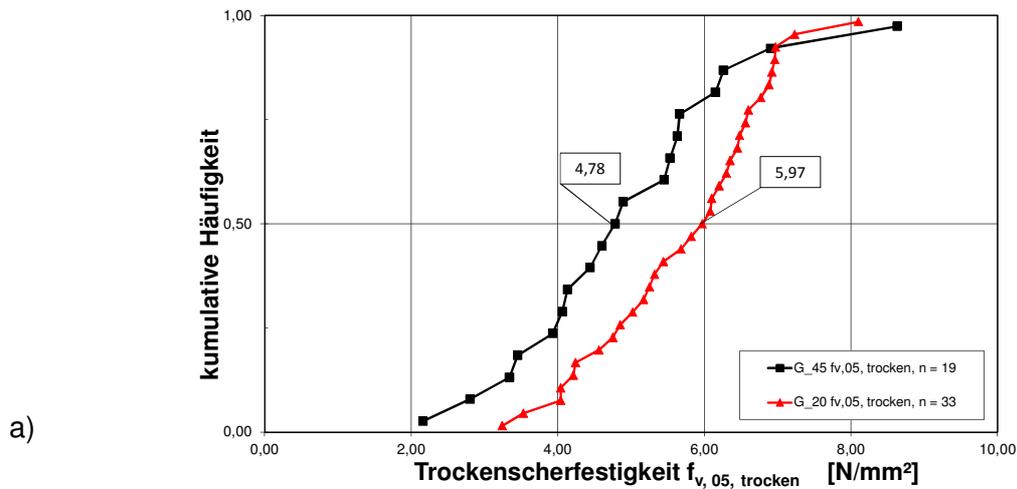


Bild 22.7a-c: Häufigkeitsverteilungen der 5%-Quantilwerte der Trocken-, Nass- und Wiedertrocken- Scherfestigkeiten aller Gebäude der Gebäudegruppen KF, B und C getrennt nach den Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45

a) $f_{v,trocken}$

b) $f_{v,re-dry}$

c) $f_{v,nass}$

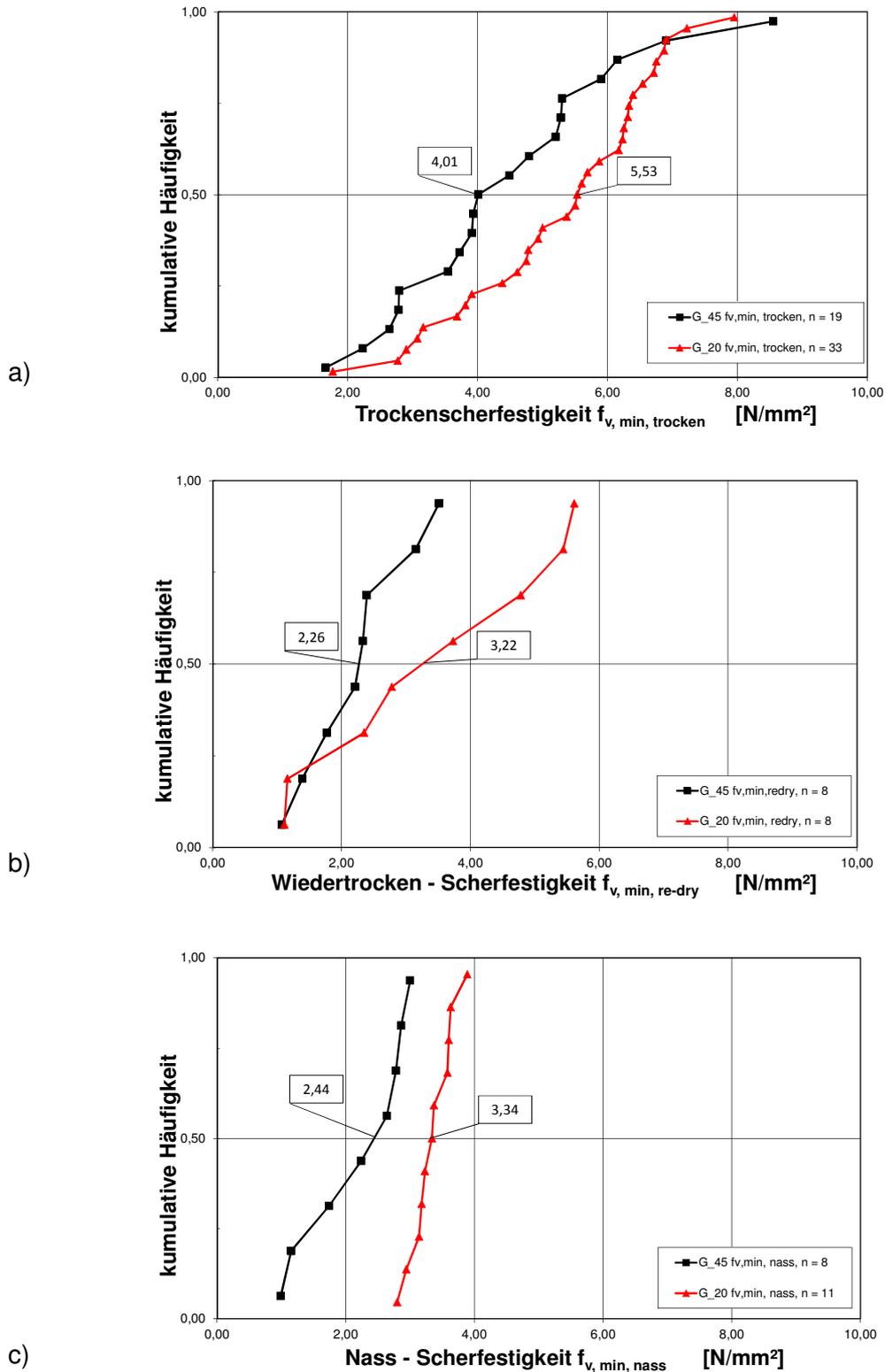


Bild 22.8a-c: Häufigkeitsverteilungen der Minimalwerte der Trocken-, Nass- und Wiedertrocken- Scherfestigkeiten aller Gebäude der Gebäudegruppen KF, B und C getrennt nach den Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45

a) $f_{v,trocken}$

b) $f_{v, re-dry}$

c) $f_{v,nass}$

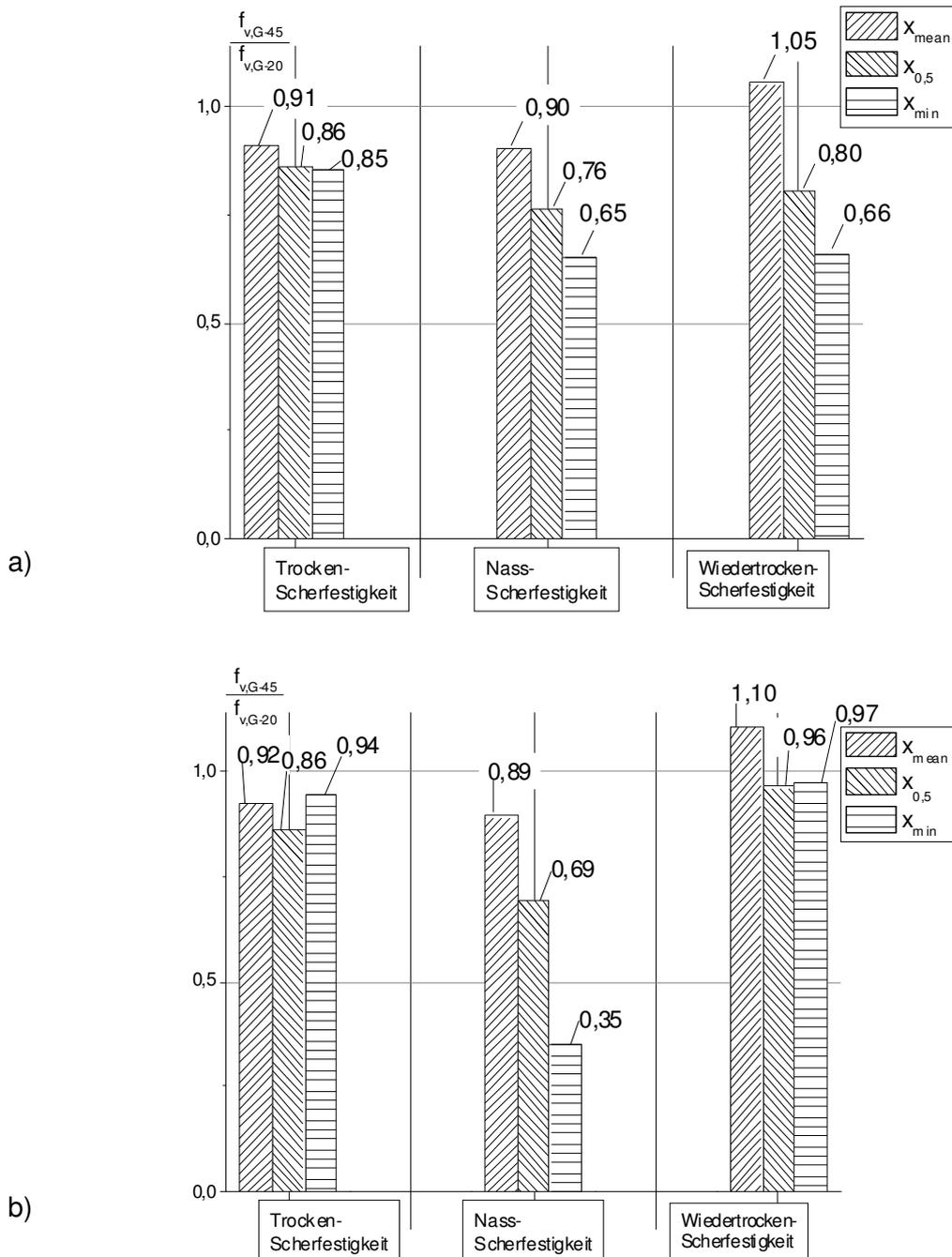
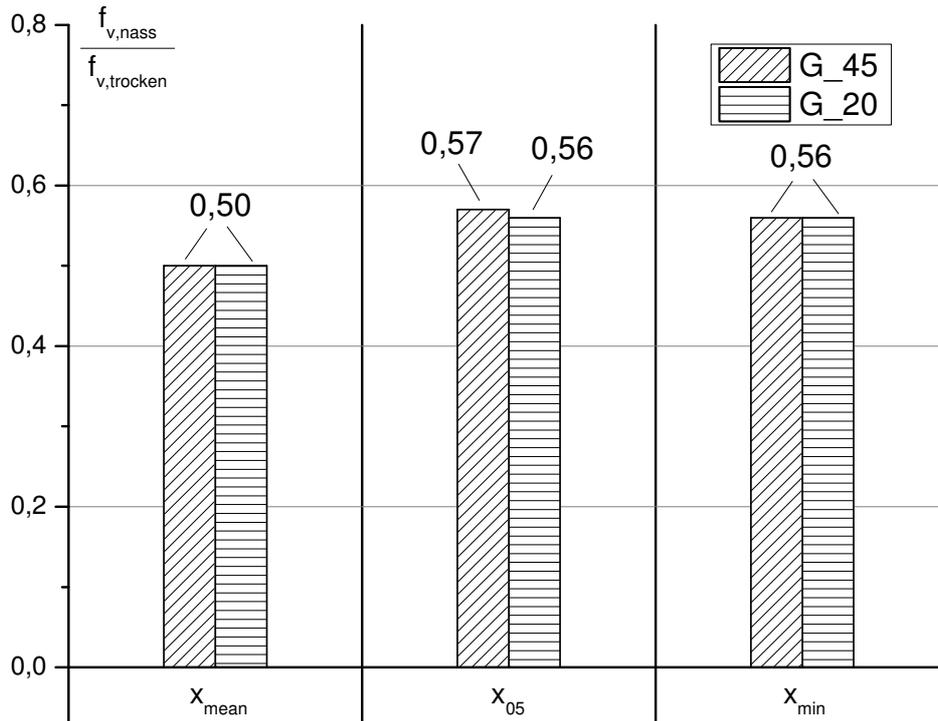
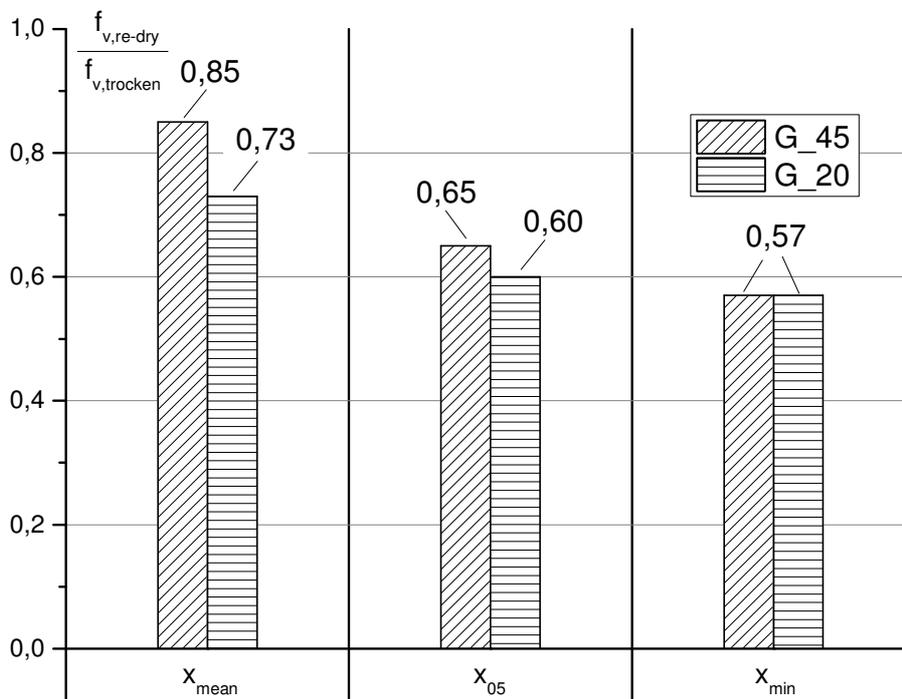


Bild 22.9a,b: Verhältnismerte der Festigkeiten der “alten” Gebäude (Gebäudealtersgruppe G_45) bzgl. der Festigkeiten der jüngeren Gebäude (Gebäudealtersgruppe G_20) betreffend Trocken-, Nass- und Wiedertrockenscherfestigkeiten der zusammengefassten Gebäudegruppe KF + B + C. Die Festigkeitsverhältnisse $f_{v,G_{45}} / f_{v,G_{20}}$ sind jeweils für das Mittelwert-, 5%-Quantil- und Minimalwertniveau angegeben.

- a) auf Basis der Gebäude-Festigkeitsverteilungen
- b) auf Basis der Einzelwerte der Bohrkernabschnitte



a)



b)

Bild 22.10a,b: Festigkeitsverhältnisse bzw. -abnahmen der Nass-Scherfestigkeiten bzw. der Wiedertrockenfestigkeiten bezüglich der Trockenscherfestigkeiten auf dem Niveau der Mittelwerte, der 5%-Quantilwerte und der Minimalwerte, getrennt für die Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45 der zusammen-

gefassten Gebäudegruppe KF und B; Basis Gebäudemittelwerte, siehe
 Tabelle 22.3a-c. a) $f_{v,nass} / f_{v,trocken}$ b) $f_{v,re-dry} / f_{v,trocken}$

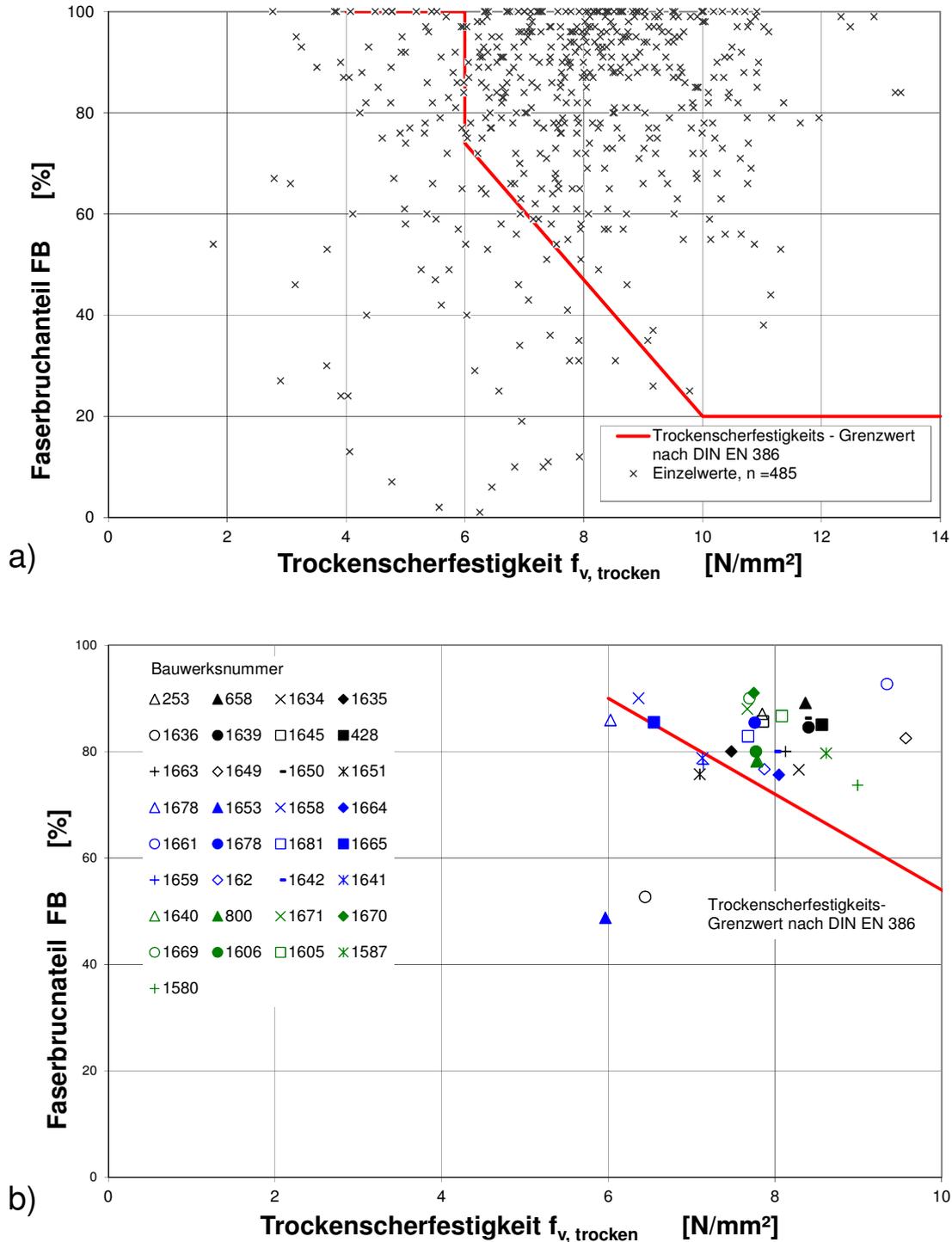


Bild 22.11a,b: Zusammenhang zwischen Trockenscherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudealtersgruppe G_20
 a) Einzelwerte b) Gebäudemittelwerte

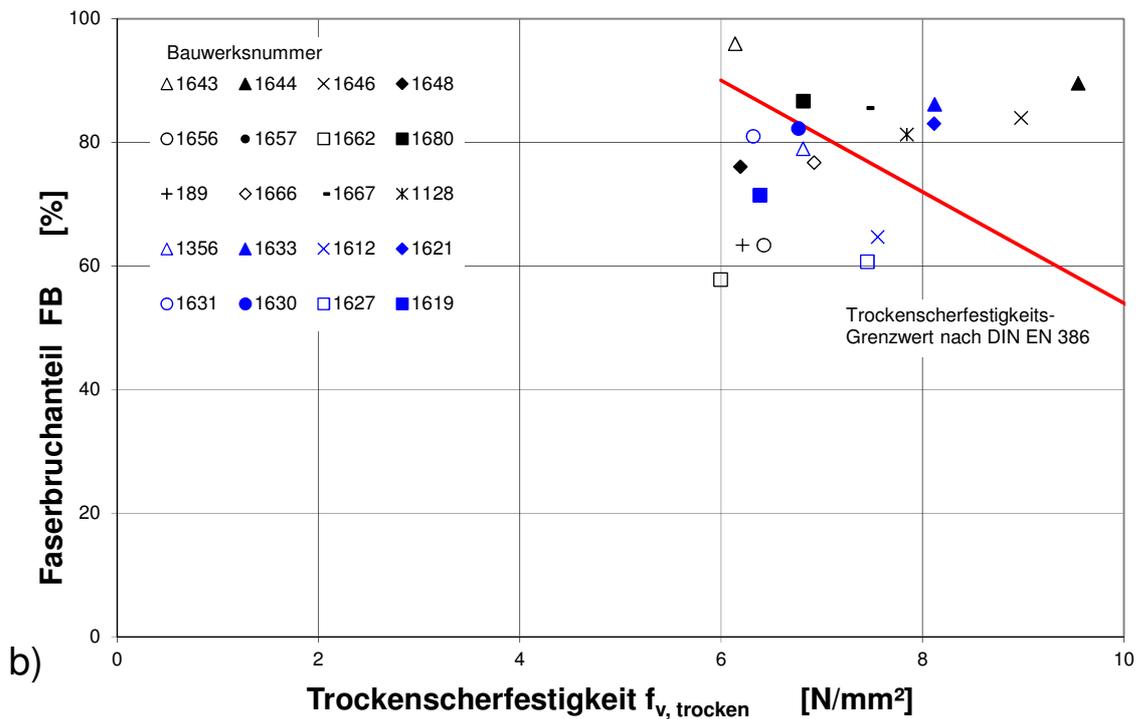
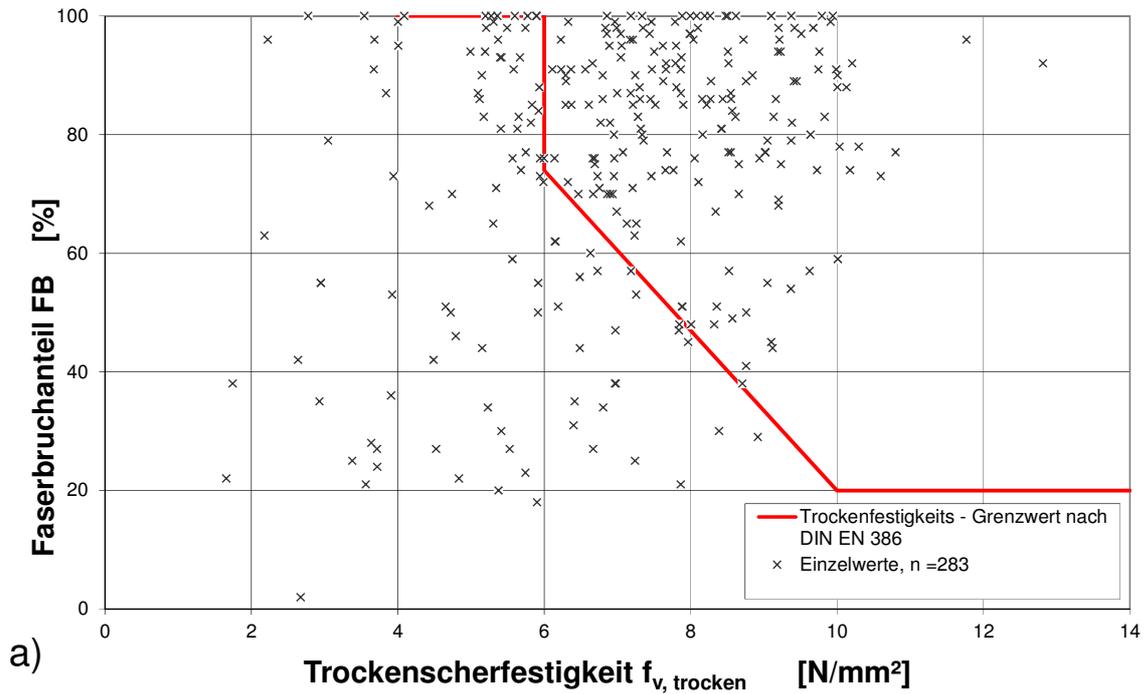


Bild 22.12a,b: Zusammenhang zwischen Trockenscherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudealtersgruppe G_45
 a) Einzelwerte b) Gebäudemittelwerte

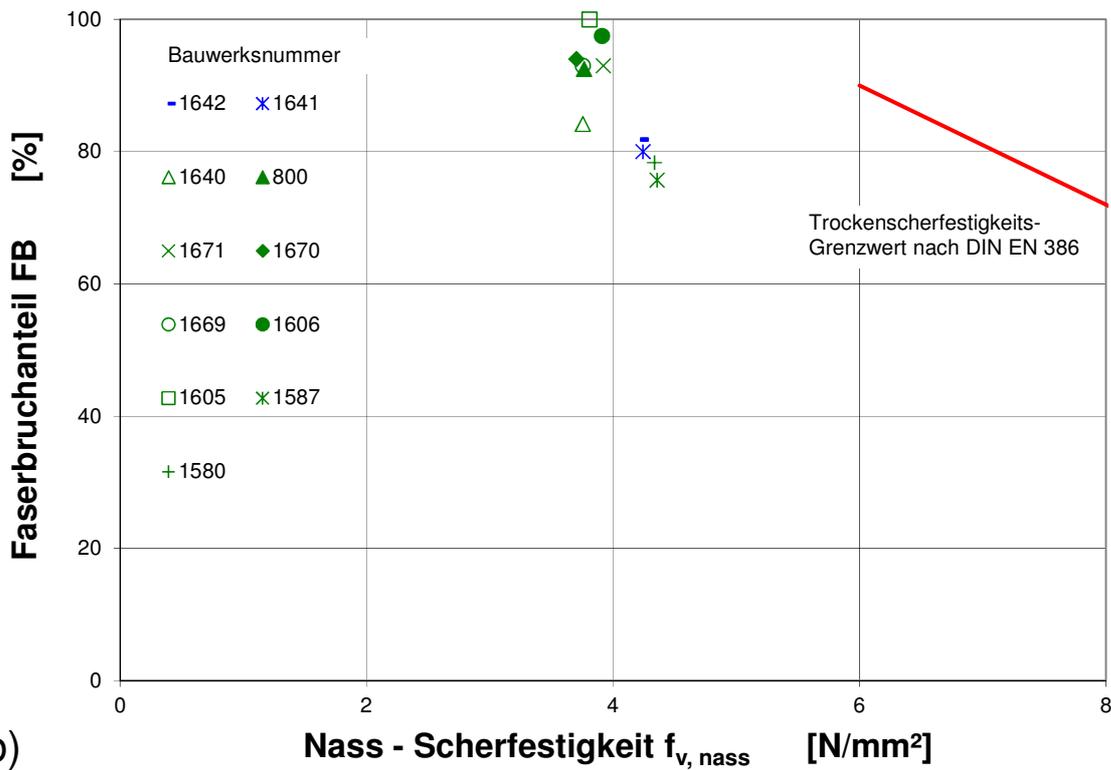
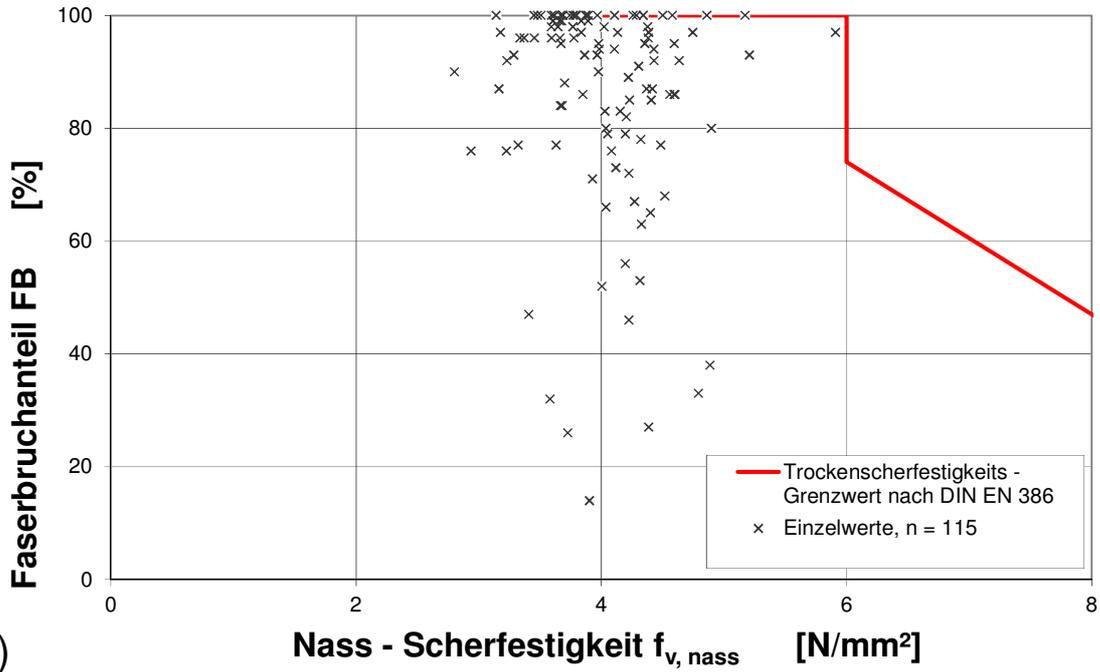


Bild 22.13a,b: Zusammenhang zwischen Nass- Scherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudealtersgruppe G_20
 a) Einzelwerte b) Gebäudemittelwerte

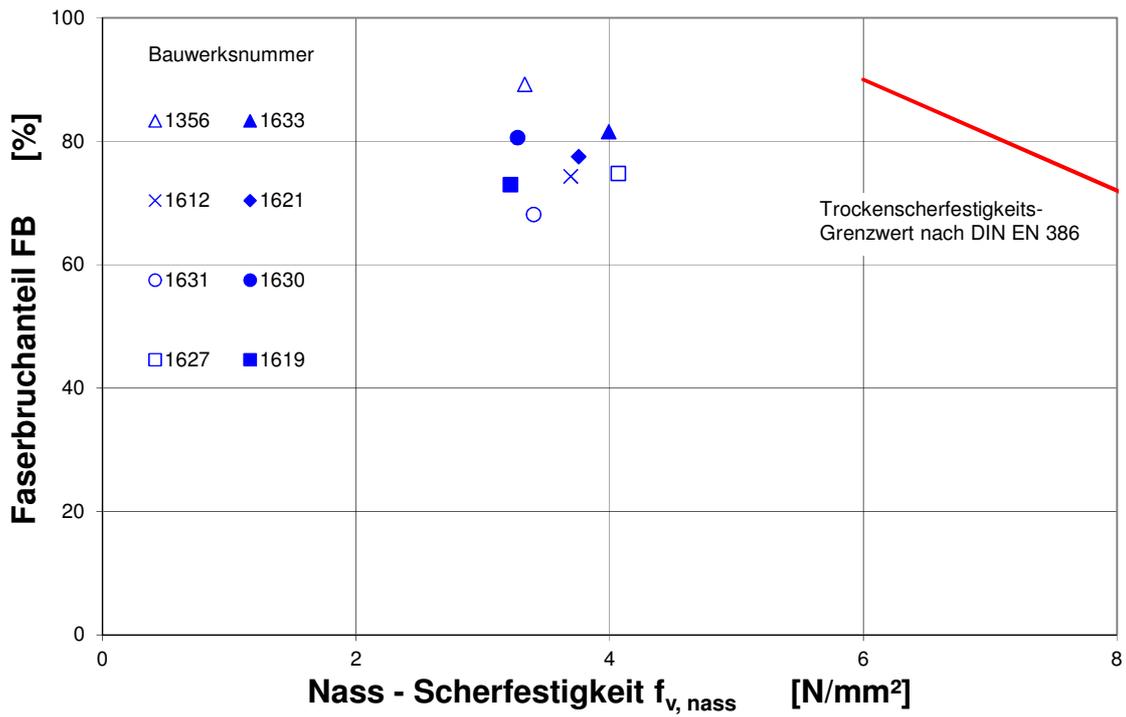
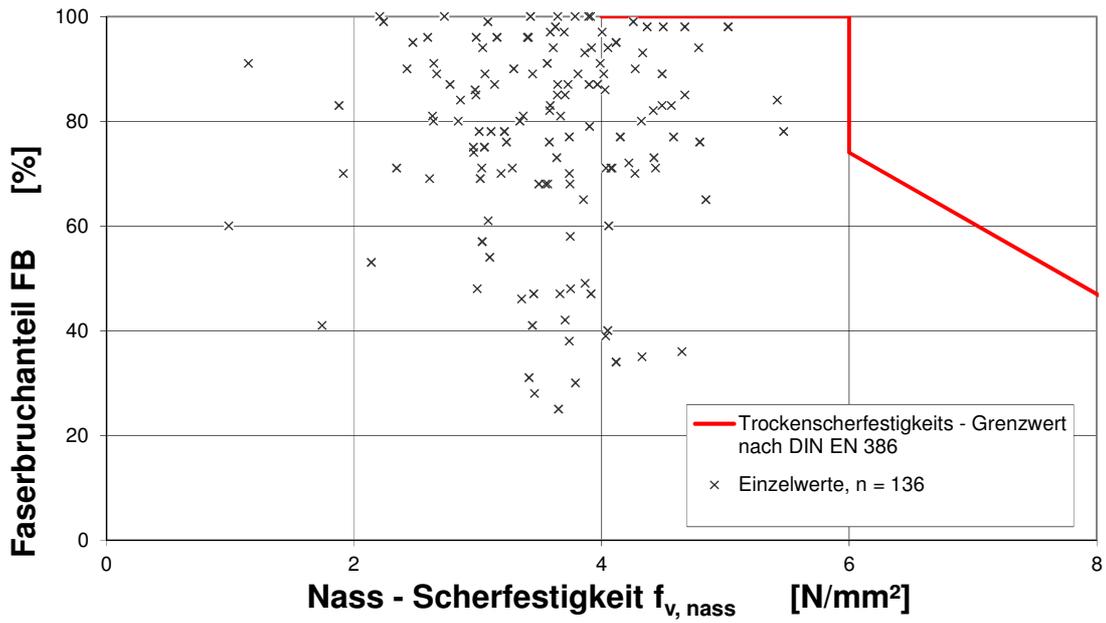


Bild 22.14a,b: Zusammenhang zwischen Nass- Scherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudealtersgruppe G_45
 a) Einzelwerte b) Gebäudemittelwerte

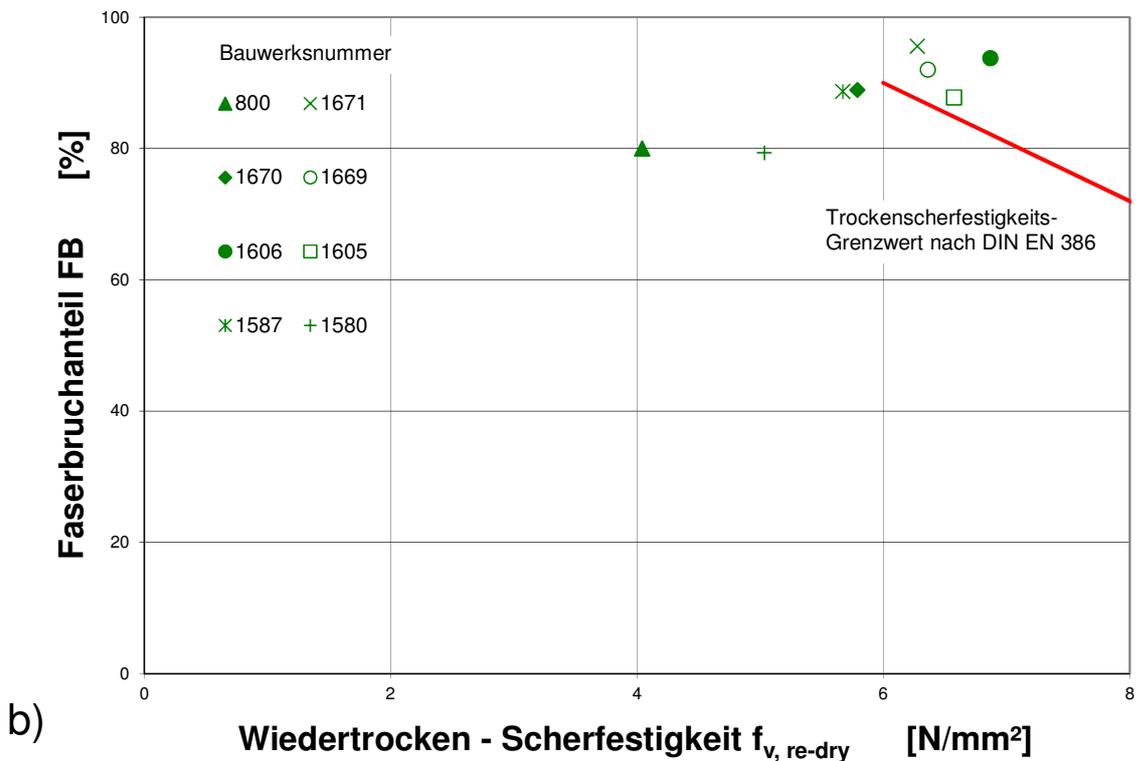
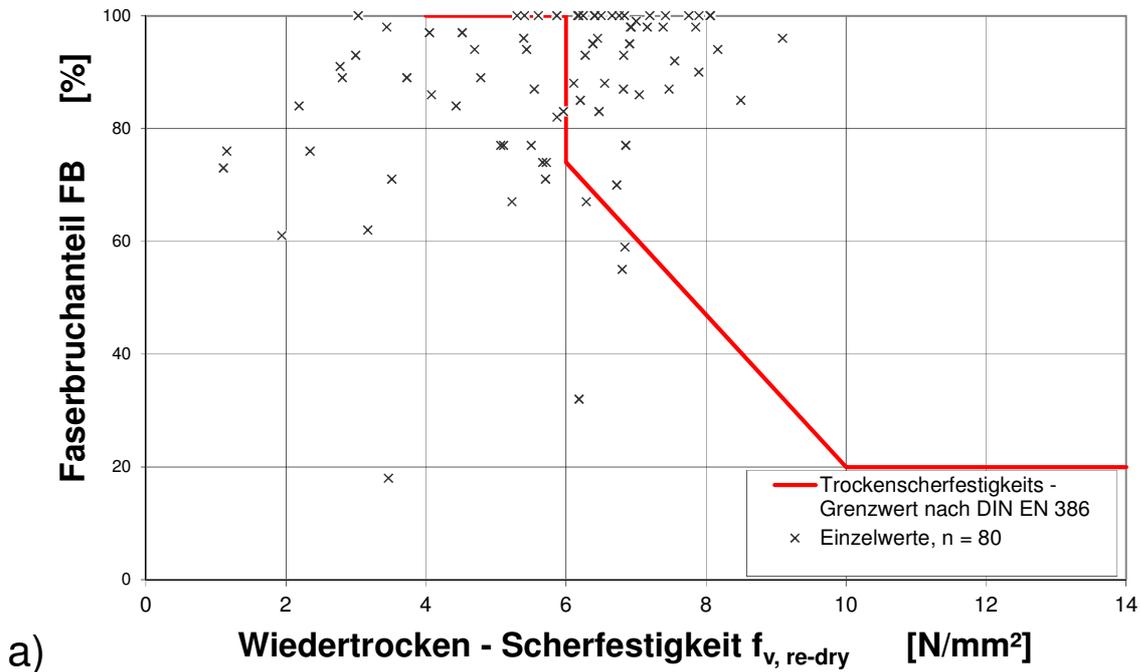


Bild 22.15a,b: Zusammenhang zwischen Wiedertrocken- Scherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudealtersgruppe G_20
 a) Einzelwerte b) Gebäudemittelwerte

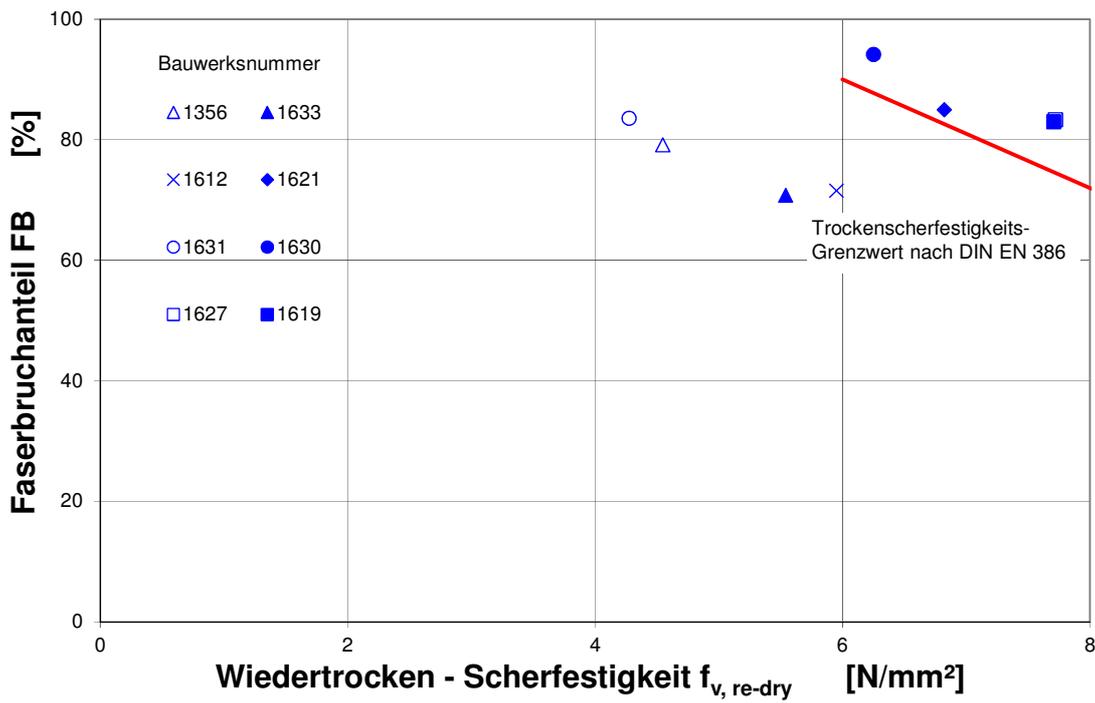
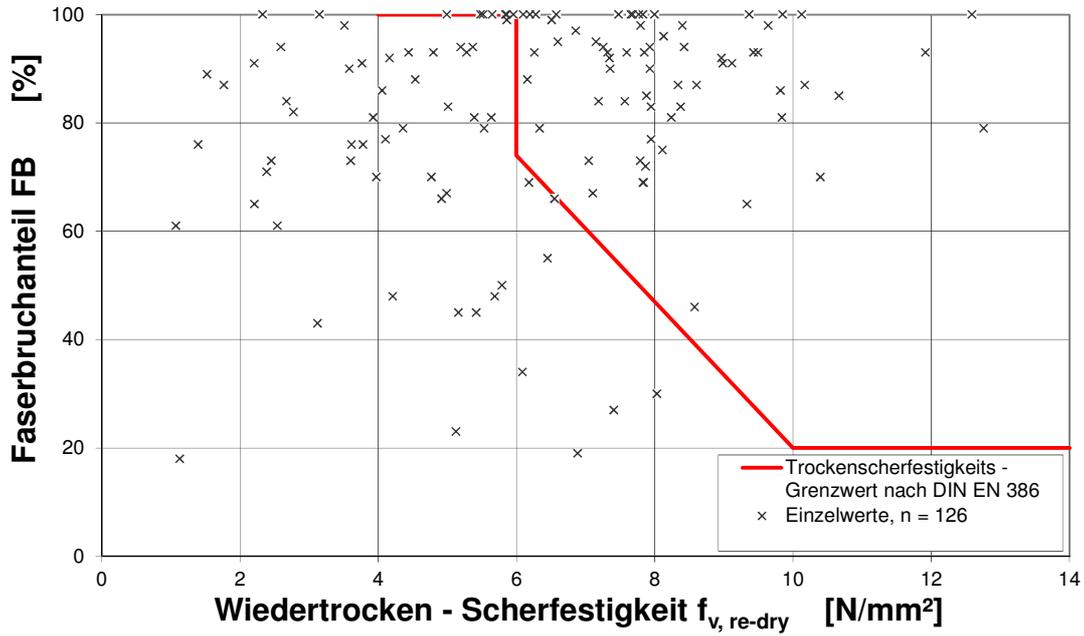


Bild 22.16a,b: Zusammenhang zwischen Wiedertrocken- Scherfestigkeit und Faserbruchanteil aller Bohrkernabschnitte der Gebäudealtersgruppe G_45
 a) Einzelwerte b) Gebäudemittelwerte

23 Vergleich der Bohrkern-Scherfestigkeitsergebnisse der Gebäudegruppen KF, B und C der Gebäudealtersgruppen G_20 und G_45 mit neu hergestellten nicht gealterten Blockscherproben

Für eine Bewertung der Niveaus der Scherfestigkeiten der Bohrkern der gealterten Gebäude liegt es nahe, diese mit den Scherfestigkeiten der Blockscherversuche an den nicht gealterten, neu verklebten UF-Klebstoffkonfigurationen (Abschnitt 10 des Forschungsberichts) zu vergleichen (siehe Bilder 23.1a,b). Einer Bewertung der absoluten Festigkeitshöhen werden die in den Abschnitten 10.3 bzw. 15.3 benannten Anforderungen zugrunde gelegt.

Wie aus Bild 23.1a ersichtlich, liegen die Trockenscherfestigkeiten der gealterten G_20 und G_45-Proben hinsichtlich der Mittelwerte im Rahmen der Festigkeitswerte der „neuen“ nicht gealterten Verklebungen und erfüllen hierbei die normativen Anforderungen unschwer. Betrachtet man die 5%-Quantilen und die Minimalwerte, so befinden sich die Scherfestigkeitsergebnisse der G_20-Bauwerke ebenfalls noch im Rahmen der Festigkeiten der nicht gealterten Verklebungen. Im Gegensatz dazu liegen die x_{05} - und x_{min} -Werte der G_45-Bauwerke wesentlich unter den Festigkeiten der nicht gealterten Proben.

Bei den Nass-Scherfestigkeiten entsprechen die G_20-Resultate soeben den Versuchsergebnissen der nicht gealterten Verklebungen. Im Gegensatz dazu liegen die $f_{v,nass}$ -Werte der G_45-Gebäude auf allen Verteilungsniveaus merklich bzw. sehr deutlich unter den Festigkeiten der nicht gealterten Verklebungen. Auf dem Niveau der Mittelwerte liegen die G_45-Nass-Scherfestigkeiten um 12 % bis 22 % unter den Ergebnissen der nicht gealterten Verklebungen und bei den Minimalwerten betragen die Abweichungen 37 % bis 50 %. Die Anforderungswerte an die Festigkeitsmittelwerte werden jedoch auch von den Ergebnissen der G_45-Gebäude erfüllt. Dies gilt sowohl in Bezug auf die Fugendicke 0,1 mm wie bezüglich der Fugendicke 0,5 mm.

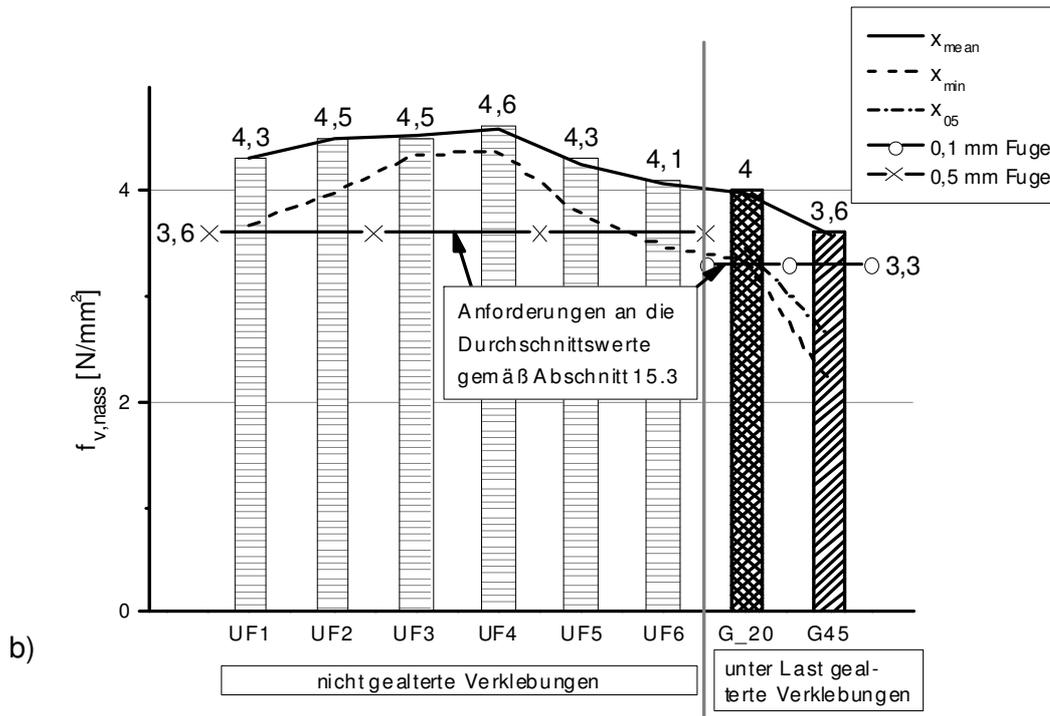
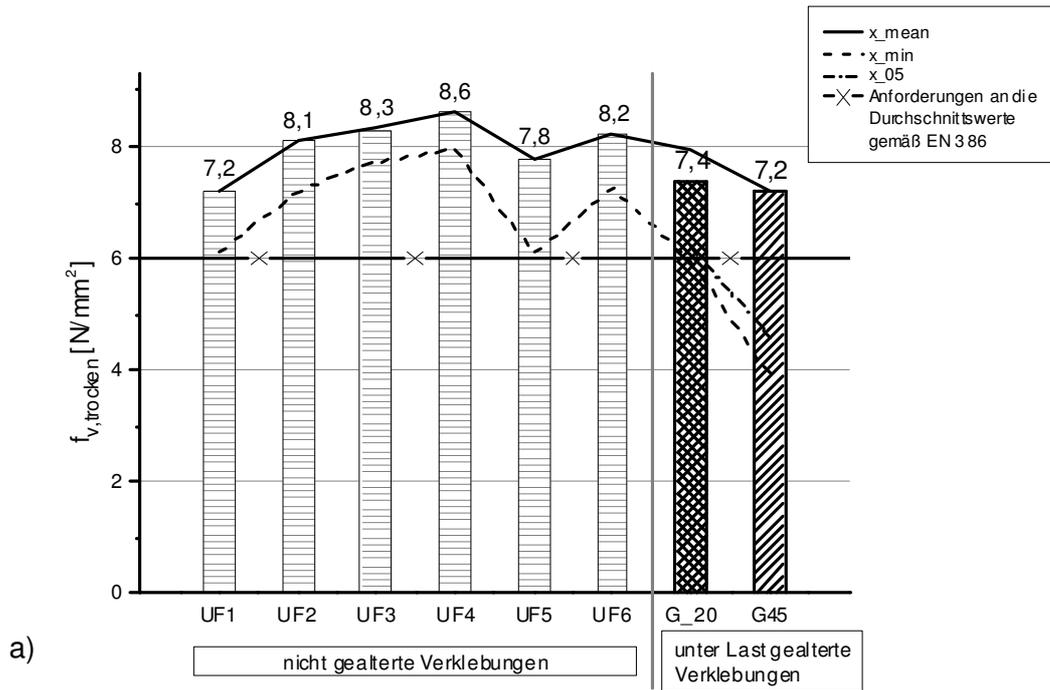


Bild 23.1a,b: Vergleich der Blockscherfestigkeiten von nicht gealterten Proben (hergestellt mit sechs verschiedenen UF-Klebstoffen UF1 – UF6) mit den Bohrkern-Scherfestigkeiten der unter Last in Bauwerken über unterschiedliche Zeiträume (G_20; G_45) gealterten Proben sowie normative bzw. normbezogene Anforderungswerte

a) Trockenscherfestigkeit $f_{v,trocken}$

b) Nass-Scherfestigkeit $f_{v,nass}$

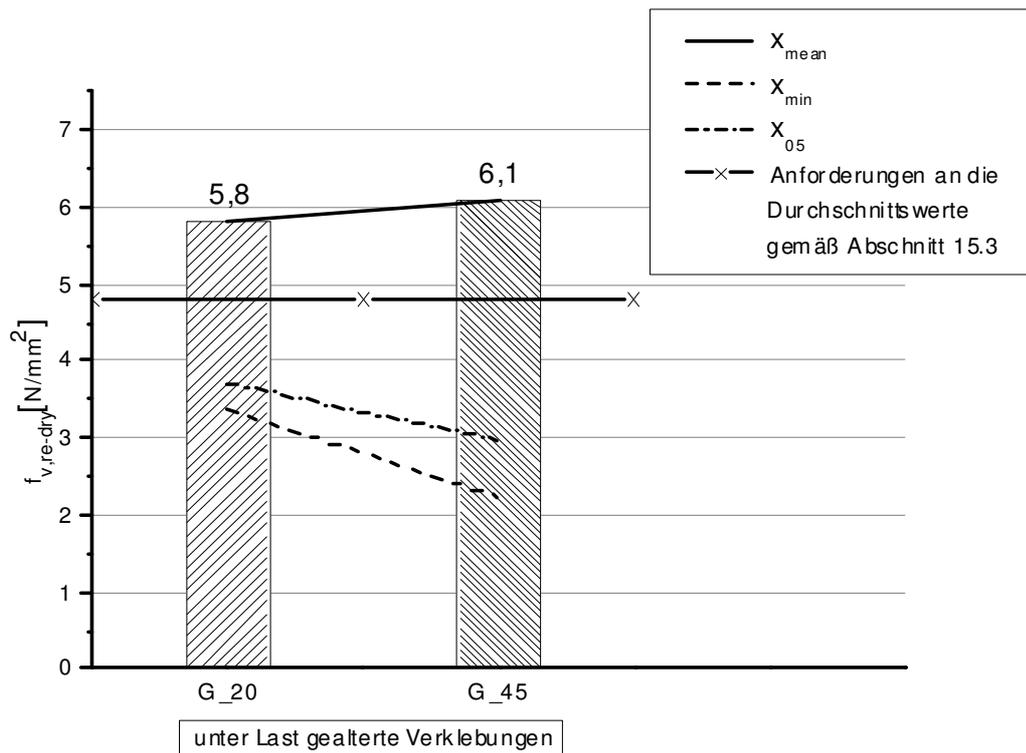


Bild 23.2

Gegenüberstellung der Wiedertrockenscherfestigkeiten der unter Last in Bauwerken über unterschiedliche Zeiträume (G_20; G_45) gealterten Proben mit an Normen angelehnten Anforderungswerten

24 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. Nachstehend werden die wesentlichen Untersuchungsabschnitte respektive deren Ergebnisse in knapper Form angegeben und sodann, hierauf aufbauend, ein Gesamt-Resümee gezogen.

Einführend werden in den Kapiteln 3 bis 5 des Schlussberichts grundlegende Ausführungen zu Harnstoff-Formaldehyd(UF-)Harzen, Härtern, Streck- und Füllmitteln sowie zu typischen Eigenschaften dieser Klebstofffamilie gemacht. Am Beispiel der in Deutschland am häufigsten verwendeten Kaurit-Harnstoffharzleime wird sodann die technische Entwicklungsgeschichte der UF-Leime dargestellt. Im Detail werden Eigenschafts- und Anwendungsprofile einiger in der 2ten Hälfte des letzten Jahrhunderts häufig verwendeter Kaurit-UF-Fabrikate erläutert.

Im Kapitel 6 werden aus der Menge von rd. 200 analysierten öffentlichen und institutsinternen Publikationen und Prüfberichten sechs zentrale Arbeiten des internationalen Schrifttums ausführlich dargestellt und im Detail bewertet. Hierbei werden auch Inkonsistenzen und diskussionsbedürftige Schlussfolgerungen aufgezeigt.

Die Kapitel 7 bis 11 des Forschungsvorhabens umfassen eingehende mechanisch-technologische Untersuchungen zur Klebfugenfestigkeit und –beständigkeit ausgewählter UF-Klebstoffe, die durch mikroskopische Aufnahmen ergänzt werden. Für die Untersuchungen wurden fünf häufig verwendete UF-Harz-Fabrikate unterschiedlicher Hersteller 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 Klebstoffflotte vermischt werden. Bei einer Harz- Härter Füllstoffkombination erfolgte der Klebstoffauftrag sowohl im Untermischverfahren, als 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-Vorstrichverfahren gilt, dass heute im Falle von getrenntem Auftrag die Harz- und Härterlösungen in flüssigem Zustand in eng beieinander liegenden Raupen auf dasselbe Füge teil aufgetragen / gegossen werden und die Vermischung und chemische Reaktion sodann in Gegenwart von „vergleichsweise“ hohem Druck unter Gewährleistung einer dünnen Klebstoff fuge von höchstens 0,3 mm erfolgt.

Insgesamt standen somit sechs unterschiedliche Klebstoffkonfigurationen für die vergleichenden mechanisch-technologischen Untersuchungen nach heutigen (Klebstoff-)Prüfnormen an neu hergestellten UF-Verklebungen zur Verfügung.

Zur vergleichenden Bewertung des Leistungsspektrums aller Konfigurationen wurden insgesamt 600 Proben für Längszugscher-, Blockscher- und Delaminierungsprüfungen nach bzw. in Anlehnung an heutige europäische Klebstoff- bzw. Brettschichtholzprüfnormen herstellt und geprüft. Die Untersuchungen zeigten die folgenden wesentlichen Ergebnisse auf:

- i) **Längszugscherprüfungen nach DIN EN 302-1:** Keine der geprüften Klebstoffkonfigurationen erreichte bei den Nass- und Wiedertrockenprüfungen nach Kochwasserlagerung bei den geprüften Fugendicken von 0,1 mm und 1,0 mm auch nur annähernd die normativen Anforderungen der DIN EN 301 an den Klebstofftyp I. Dieses Versuchsergebnis bestätigt den bekannten Sachverhalt, dass UF-Harze nicht kochfest sind. Durch die Heißwassereinwirkung erfolgt eine irreversible Bindungsspaltung, 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 neben der Delaminierungsprüfung mit hoher Rücktrocknungs-Temperatur den zentralen Unterschied zu den Prüfungen respektive Anforderungen an den Klebstofftyp II darstellt, dem UF-Harz-Klebstoffe durchweg zugeordnet sind.

Die normativen Festigkeitsanforderungen an die Nass-Prüfergebnisse nach Kaltwasserlagerung wurden hingegen von allen Klebstoffen sowohl bei den dünnen (0,1 mm) wie bei den dicken (1,0 mm) Fugen deutlich erfüllt, sofern der Klebstoffauftrag im Untermischverfahren erfolgte. Bei getrenntem Harz-Härterauftrag nach dem erläuterten Härter-Vorstreichverfahren wurden im Falle der dicken Klebstoffugen die Anforderun-

gen an die Nassfestigkeit nach Kaltwasserlagerung in extremem Umfang nicht erfüllt und die Kaltwasser-Wiedertrockenfestigkeitsanforderung wurden ebenfalls deutlich verfehlt. Die genannten, bei der 1,0 mm Fuge stark ausgeprägten Unzulänglichkeiten der im Vorstreich-Verfahren hergestellten UF-Klebstofffugen bei Kaltwasserbehandlung 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, im Vorstreichverfahren hergestellten Fugen lagen sodann jedoch wieder auf demselben sehr hohen Niveau wie die Trockenfestigkeiten.

- ii) **Blockscherprüfungen nach DIN EN 392:** Die jeweils paarweise hergestellten Prüfkörper wurden zum einen trocken und zum anderen nass (nach vorheriger 4tägiger Kaltwasserlagerung) geprüft. Alle Prüfkörper wurden mit einer dünnen Klebefuge mit Fugendicken im Bereich von rd. 0,05 – 0,15 mm hergestellt.

Die Trockenscherfestigkeiten aller Klebstoffkonfigurationen (unterschiedliche Klebstofffabrikate und unterschiedlichen Auftrags/Mischverfahren) 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. Mit Ausnahme einer im Untermischverfahren hergestellten Konfiguration wurden auch die Anforderungen an die Durchschnittswerte erfüllt.

Im Falle der Nass- Blockscherfestigkeiten existieren keine Normanforderungen. In dem Forschungsvorhaben wurden daher plausible Anforderungswerte aus den in DIN EN 301 implizit festgelegten Nass-Trocken-Zugscherfestigkeitsverhältnissen abgeleitet. Das Verhältnis von Nass- zu Trockenblockscherfestigkeiten aller Klebstoffkonfigurationen betrug auf dem Mittelwert- und 5%-Quantilniveau gleichermaßen rd. 0,55 und entsprach damit den festgelegten Anforderungen.

Betrachtet man die Ergebnisse der im Untermisch- und Vorstreichverfahren hergestellten Prüfkörper 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 wird jedoch zusätzlich durch deutlich geänderte Verhältnisse bei den Faserbruchanteilen verstärkt. So beträgt bei den im Untermischverfahren hergestellten Klebstoffkonfigurationen das mittlere Verhältnis des Holzfaserbruchanteils der Nassbezüglich der Trockenprüfungen rd. 1,2. Im Gegensatz dazu wurde bei den im Vorstreichverfahren hergestellten Verklebungen ein deutlich abweichendes Verhältnis von rd. 0,8 erhalten.

- iii) **Delaminierungsversuche nach EN 302-2:** Die Delaminierungsversuche wurden sowohl mit dem Verfahren mit niedriger (Rücktrocknungs-)Temperatur zum Nachweis des Klebstofftyps II als auch mit dem Verfahren mit hoher (Rücktrocknungs-) 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.

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

Nachweis der Klebstofftyps I - 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/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 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 Vorstreichverfahren hergestellten Klebstoffkonfiguration sowohl bei normgemäßer wie 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 mit Abstand größte, in den Kapiteln 12 bis 23 dargestellte Arbeitspaket des Forschungsvorhabens umfasste eingehende Zustandsuntersuchungen von insgesamt 71 Bauwerken mit UF-Harz-verklebten Brettschichtholz(BSH)- Trägern sowie von vier Bauwerken mit Kämpf-Trägern bzw. I- oder kastenförmigen Trägern mit Stegen aus Kämpf- oder Wolff-Stegplatten. Die BSH-Träger repräsentierten weit überwiegend Vollwandträger (66 Bauwerke), sowie je zwei Tragwerke mit Fachwerk- bzw. I-Trägern und eine BSH-Kastenträgerkonstruktion. Die Untersuchungen an den Bauteilen der Bestandsbauten umfassten umfangreiche visuelle und haptische Inspektionen einschließlich Rissvermessungen sowie Bohrkernentnahmen und -prüfungen.

Mit Blick auf die Auswahl von relevanten Bauwerken mit einer möglichst großen Spanne von Nutzungszeiten oberhalb von rd. zehn Jahren, wurden zunächst umfangreiche Recherchen bei Holzleimbaubetrieben, in Institutsgutachten, Veröffentlichungen sowie insbesondere in den Leimgenehmigungsakten des Otto-Graf-Instituts vorgenommen (Kap. 12). 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 Klebstofffabrikat (sofern eruierbar), 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 Bauteile bzw. Träger der Gebäudegruppen KF, B, C und D repräsentieren Brettschichtholzträger. Die Querschnittsbreiten der Träger variierten von rd. 10 cm bis 22 cm und die Querschnittshöhen reichten von rd. 40 cm bis 240 cm. Die Spannweiten lagen im Bereich von rd. 6 m bis 36 m. Die Klimata aller Gebäudegruppen waren abgesehen von einer Ausnahme (Salzlagerhalle) den Nutzungsklassen 1 und 2 zuzuordnen.

Zu den unterschiedlichen Gebäudegruppen sind die folgenden Angaben angezeigt:

- a) Die Gebäudegruppe KF mit insgesamt sechs Bauwerken mit Bauwerksaltern von 44 bis 51 Jahren zum Zeitpunkt der Untersuchungen spielt eine zentrale Rolle bei den Bauwerksbegutachtungen und Probenahmen. Ursächlich hierfür ist, dass in den Gebäuden der Gruppe KF bereits 1977 im Rahmen einer Untersuchung zur Güte von UF-verklebten Bauteilen von Kolb und Frech umfangreiche Bohrkern-Probenahmen erfolgt waren. Aus der Gesamtmenge der damals seitens der genannten Autoren 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 „neuen“ Bohrkernkerne wurden vor den mechanischen Prüfungen mit denselben Klima- bzw. Wasser- vorbehandlungen wie vormalig beaufschlagt.
- b) Die Gebäudegruppe B umfasste insgesamt 13 voll umfänglich genutzte große Bauwerke mit Bauwerksaltern zwischen 7 und 41 Jahren. Gemeinsames Merkmal der Probenuntersuchungen der Gebäudegruppe B ist vergleichbar wie bei der Gebäudegruppe KF, dass die Bohrkernkerne nach dem gleichen Schema wie bei den früheren Untersuchungen von Kolb und Frech aufgetrennt wurden und sodann vor den Prüfungen denselben Trocken-, Nass- und Wechselklimalagerungen wie bei den vormaligen Untersuchungen unterzogen wurden.
- c) Die Gebäudegruppe C beinhaltete 38 eingehend begutachtete und beprobte Gebäude mit UF-verklebten BSH-Trägern. Die Bohrkernkerne dieser Gebäudegruppe wurden ebenso wie die Bohrkernkerne der Gebäudegruppe E ausschließlich nach Trockenlagerung geprüft.

- d) Die Gebäudegruppe D bestand aus 14 Gebäuden bei denen weit überwiegend auf Wunsch der Gebäudeinhaber bzw. –betreiber keine Bohrkernproben entnommen wurden. Eine Teilmenge von 10 Bauwerken waren baugleiche Tennishallen mit BSH-Vollwandträgern, die von den Auflagerbereichen bis in rd. 2,5 m Höhe handnah untersucht wurden. Vier weitere Bauwerke repräsentierten große Produktions- und Lagerhallen, bei denen meist umfangreiche Begutachtungen und Rissaufnahmen stattfanden.
- e) 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.

Insgesamt wurden in den Gebäudegruppen KF, B, C, D und E rd. 800 Bauteile umfassend handnah untersucht und aus 240 Trägern wurden 639 Bohrkern für Klebefugen-Festigkeits- und Beständigkeitsprüfungen entnommen.

Die Befunde der visuellen und haptischen Bauwerksinspektionen einschließlich der Rissvermessungen und der Feuchtemessungen sind für jedes Bauwerk in Form einer Kurzbeschreibung dokumentiert (Kap. 14 sowie Anhänge X und Y). 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 im Wesentlichen 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 und hierbei im engeren Sinne deren Dachtragwerke, 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 ausschließliche oder wesentliche Ursache die Degradation der Klebfugen bzw. des Holz-

Klebfugen-Interfaces festgemacht wurde, so reduziert sich die Schadensmenge auf insgesamt zehn Bauwerke.²⁹

Die visuellen, haptischen und mittels Rissvermessungen quantifizierten 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 führen 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 sehr häufig Kaltdächer ursächlich für Schäden.

Ungeachtet der benannten, in einigen Fällen grundlegend schadensursächlichen Klebfugen-Degradationen ist darauf hinzuweisen, dass bei den meisten Schäden Querkzugspannungen 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- Klebfugeninterfaces 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 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 Tragwerkuntersuchung ergab. Schäden infolge erheblicher Feuchteeinwirkung lagen bei den untersuchten Kämpf-Trägern bzw. bei den Kämpf- und Wolff-Steg-Bauteilen nicht vor. Bei den festgestell-

²⁹ unter Berücksichtigung einer noch nicht gänzlich abgeschlossenen Untersuchung sodann 11 Bauwerke

ten 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-Steg-Verklebungen zu differenzieren. Die begutachteten Fugenrisse in den Schmalkantenverklebungen der Stegplatten waren durchweg auf die äußeren Lagen der um rd. $\pm 15^\circ$ bzw. $\pm 90^\circ$ verschränkten Stegbrettlagen beschränkt. Durchrisse waren in den Stegplatten, ausgenommen bei überbeanspruchten Durchbruchbereichen, nicht festzustellen. Die Scherfestigkeiten der breittseitigen Verklebungen der Stegbrettlagen waren durchweg ausreichend hoch.

Das Kapitel 15 enthält Details der Bohrkernprüfungen und der Grundlagen der Ergebnisbewertungen sowie Einzelheiten der Klima-/Wasservorbehandlungen der Prüfkörper. In den Kapiteln 16 und 17 werden Ergebnisse der Messungen der Klebfugendicken an den Bohrkernen und der mittels IR-Spektroskopie bestimmten Klebstofffabrikate aufgeführt.

Die Kapitel 18 bis 20 des Forschungsberichts enthalten eine umfassende Darstellung der Ergebnisse der Scherfestigkeits- und Faserbruchanteil-Untersuchungen an den Bohrkernen aus den BSH-Vollwandträgern der Gebäudegruppen KF, B und C. Die Versuchsergebnisse werden entsprechend dem unterschiedlichen Prüfumfang und den hiermit jeweils möglichen Korrelationsbeziehungen zunächst getrennt für jede Gebäudegruppe aufgeführt. Die Scherfestigkeits- und Faserbruchergebnisse jeder Gebäudegruppe werden hierbei insbesondere 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 34 und 68 Jahren. Die mittleren Gebäudealter der beiden Gebäudealtersgruppen betragen rd. 20 Jahre bzw. rd. 45 Jahre.

Die in Kapitel 18 dargestellten Bohrkern-Versuchsergebnisse der Gebäudegruppe KF werden nachstehend in größerer Detailliertheit wiedergegeben. Die besondere Bedeutung der KF-Bohrkerne folgt aus der unmittelbaren Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit den Resultaten der „vormaligen“ von Kolb und Treck durchgeführten Untersuchungen. Eine Differenzierung der Ergebnisse der Gebäudegruppe KF nach Gebäudealtern ist nicht erforderlich, da alle Gebäude zum Zeitpunkt der Untersuchungen ein Bauwerkalter von mehr als 44 Jahren aufwiesen und damit der Gebäudealtersgruppe G_45 zuzuordnen sind. Es werden zunächst die Trocken- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten und sodann die Nass-Scherfestigkeiten angesprochen:

- Die bei den „alten“ und „neuen“ Untersuchungen erhaltenen mittleren Trocken- und Wiedertrocken-Scherfestigkeiten stimmten mit Werten von $7,1 \text{ N/mm}^2$ bzw. $6,4 \text{ N/mm}^2$ nahezu vollständig überein und lagen auf ausreichend hohen Festigkeitsniveaus. Betrachtet man die alterungsbedingten Unterschiede auf dem Niveau der 5%-Quantil- und Minimalwerte, so lagen die Ergebnisse der „neuen“ Untersuchungen jedoch durchweg signifikant niedriger. Im Falle der Trockenscherfestigkeiten 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 der 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 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. $2,0 \text{ N/mm}^2$. Zumindest eines der beiden Bauwerke, das über rd. 40 Jahre als Salzlagerhalle gedient hatte, wies in den Querschnitts-Randbereichen sehr hohe Holzfeuchten über 30 % auf.

Die in den Kapiteln 19 und 20 aufgeführten Bohrkern-Versuchsergebnisse 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 34 abschließend ausgewerteten Gebäude der Gebäudegruppe C ausschließlich Einfluss auf die Bewertung der Trockenscherfestigkeiten haben. Die Versuchsergebnisse zeigen eindeutig die folgenden Sachverhalte auf:

- Ohne Differenzierung nach Bauwerksaltern (G_20 bzw. G_45) war erwartungsgemäß eine signifikante Abnahme der Wiedertrocken- und der Nass-Scherfestigkeiten im Vergleich zu den Trockenscherfestigkeiten festzustellen. Die Festigkeitsverteilungen, d.h. die kumulative Häufigkeiten der Trocken- und Wiedertrockenscherfestigkeiten verlaufen hierbei weitgehend affin, während die Nass-Scherfestigkeitsverteilung infol-

ge geringerer Ergebnisstreuungen wesentlich steiler verläuft. Im Mittel aller Versuchsergebnisse lagen die Wiedertrocken- und Nass-Scherfestigkeiten um rd. 20 % bzw. 50 % unter den Trockenfestigkeiten. Das Niveau der Trockenfestigkeiten lag bezüglich der Anforderungen der DIN EN 386 mit Mittel- und 5%-Quantilwerten von 7,5 N/mm² bzw. 4,0 N/mm² ausreichend hoch. Das kombinierte Trockenscherfestigkeits- Faserbruchanteilkriterium wurde bezüglich der Einzelwerte von rd. 80 % aller ca. 770 Proben erfüllt. Bei den Gebäudemittelwerten wurden die Anforderungen zu zwei Drittel erfüllt.

- Bei Differenzierung der Versuchsergebnisse nach Gebäudealtern bzw. Gebäudealtersgruppen von im Mittel 20 bzw. 45 Jahren Bauwerksalter, hier „jüngere“ bzw. „ältere“ Bauwerke genannt, lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen treffen:
 - 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-Scherfestigkeitsniveaus der „älteren“ Gebäude lagen jedoch noch auf deutlich ausreichend hohem Niveau, gemessen an den Anforderungen der DIN EN 386 und der DIN EN 301 (relevant für die Bewertung der Festigkeitsminderung bei Nass-Lagerung). 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 Minimalwerte (Einzelwerte oder mittlere Minimalwerte der jeweiligen Gebäude-Festigkeitsverteilungen) zeigt, dass die Nass-Scherfestigkeiten der „älteren“ Gebäude noch ausgeprägter, d. h. um rd. 1/3 unterhalb der Werte der „jüngeren“ Gebäude liegen.
 - ii) Bei den Wiedertrockenscherfestigkeiten war im Gegensatz zu den Trocken- und Nass-Scherfestigkeiten auf dem Niveau der Mittelwerte unerwartet kein Festigkeitsunterschied zwischen den „älteren“ und „jüngeren“ Gebäuden feststellbar. Dies gilt bezüglich der Einzelwerte aller Gebäude auch für das 5%-Quantil- und das Minimalwert-Niveau. Bei Zugrundelegung der Mittelwerte der

5%-Quantilen und der Minimalwerte der einzelnen Gebäude ergaben sich jedoch gut übereinstimmend mit den Nass-Scherfestigkeiten bei den „älteren“ Gebäuden Festigkeitsabnahmen von rd. 20 % bzw. 34 %.

Die im Vergleich zu den Mittelwerten auf dem Niveau der 5%-Quantilen und insbesondere der Minimalwerte 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 schlagen die erhöhten alterungsbedingten Festigkeitsminderungen einzelner Klebstofffabrikate in Verbindung mit dickeren Klebstofffugen durch und hierbei insbesondere von solchen, die im Härter-Vorstreichverfahren hergestellt wurden.

In einer abschließenden summarischen Bewertung aller vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist auszuführen, dass fachgerecht mittels UF-Klebstoffen hergestellte und bestimmungsgemäß³⁰ 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 alterungsbedingte Abnahme der Trockenfestigkeiten von UF-Klebefugen liegt im Falle bestimmungsgemäßer Verwendung, wie im Forschungsvorhaben nachgewiesen, unabhängig vom jeweiligen Klebstofffabrikat eindeutig auf einem vertretbaren Niveau.

Als Bestätigung der notwendigen Berücksichtigung der bestimmungsgemäßen Einsatzbedingungen belegten die Untersuchungen jedoch ebenfalls eindeutig, dass auch im Falle weitgehend fachgerecht hergestellter UF-verklebter Holzbauteile zwei Klima-

³⁰ 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“*

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-Vorstrichverfahren 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 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 wärme gedämmten 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 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) stringent umzusetzen. Dies gilt vor allem bei Vorliegen der genannten für UF-Klebfugen abträglichen Nutzungsrandbedingungen.

Bei allen anderen, wesentlich häufigeren Nutzungsbedingungen kann die langfristige Beständigkeit und Sicherheit harnstoffharzverklebter Holzbauteile wie für anderweitig verklebte Holzkonstruktionen ohne erhöhten Nachdruck im Rahmen der erforderlichen und etablierten Standsicherheitsbewertungen gewährleistet werden.

25 Literatur

25.1 Veröffentlichungen

Aicher, S., Dill-Langer, G., Ranta-Maunus, A. (1998): Duration of load effect in tension perpendicular to the grain of glulam in different climates. Holz Roh- und Werkstoff, 56, S. 295 – 305

Aicher, S., Dill-Langer, G. (1999): Cumulative damage modelling of wood. In: Werkstoffe im Bauwesen – Theorie und Praxis, Hrsgb. R. Eligehausen, S. 21 – 30, ibidem-Verlag, Stuttgart

Aicher, S., Dill-Langer, G. (2011): Modellierung und Reduzierung feuchtebedingter Spannungen und Rissbildungen in Bauteilen aus geklebten Vollholz-Verbundwerkstoffen. Schlussbericht BMBF-PTJ-Forschungsvorhaben FKZ 0330822A „Improved Moisture“, MPA Universität Stuttgart, veröffentl. von TIB Hannover

Aicher, S. (2012): Failures in large glulam members – major causalities and adhesive-based repair. Proceedings 14th Int. Conference Structural Faults & Repair 2012, Book of Abstracts, S. 99 – 100 und CD-ROM, Edinburgh

Aicher, S., Rothkopf, C., Stapf, G., Hezel, J. (2012): Ageing and duration of load effect in glued structural timber joints. EURADH 2012, 9th European Adhesion Conference, Book of Abstracts, S. 45 und CD-ROM

Bergin, E.G. (1958): Durability of Urea-Formaldehyde and Casein adhesives at elevated temperatures. Techn. Note 8, Forest Products Lab., Madison, WI

Blaß, H.J., Frese, M. (2010): Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz. T 3246 Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

Blömer, A. (1958): Ein Beitrag zur Geschichte des Leimes und Leimbaues unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung in Deutschland. Deutscher Zimmermeister, 60, H. 22, S. 533 – 535; H. 23/24, S. 553 – 559

Blomquist, R. F., Olson, W. Z. (1957): Durability of urea-resin glues at elevated temperatures. Forest Products J., H. 8, S. 266 – 272

Chugg, W. A. (1962): Report and visit to Switzerland to inspect glued laminated timber structures over ten years old. Timber Research and Development Association. Informations Bulletin E/JB/7

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

Clad, W. (1964): Über das Wesen einer Verklebung und die Fugelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen. Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart

Clad, W. (1978): Harnstoffverleimte Träger nach 35 Jahren. Bauen mit Holz, H. 1, S. 17 – 19

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

Deppe, H.J., Schmidt, K. (1987): Untersuchungen zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau. BAM Forschungsbericht 136, Berlin

Dill-Langer, G. (2004): Schädigung von Brettschichtholz bei Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung. Dissertation, Schriftenreihe Heft 88, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut

Dorn, H., Egner, K. (1961): Untersuchungen von Keilzinkenstößen in tragenden Holzbauteilen nach langjähriger Verwendung. Holz Roh- und Werkstoff, 9. Jg., S. 100 – 112

Ebewele, R. O., Myers, G. E., River, B. H., Kotsky J. A. (1991): Polyamine-modified urea-formaldehyde resins. I. Synthesis, structure and properties. J. Applied Polymer Science, Vol. 47, S. 2997 – 3012

Ebewele, R. O., River, B. H., Myers, G. E., (1993): Polyamine-modified urea-formaldehyde-bonded wood joints. III. Fracture toughness and cyclic stress and hydrolysis resistance. J. Applied Polymers Science, Vol. 49, S. 229 – 245

Ebewele, R. O., River, B. H., Myers, G. E. (1994): Behavior of amine-modified urea-formaldehyde-bonded wood joints at low formaldehyde/urea molar ratios. J. Applied Polymer Science, Vol. 52, S. 689 – 700

Ebewele, R. O., River, B. H., Myers, G. E., Kotsky, J. A. (1991): Polyamine-modified urea-formaldehyde resins. II. Resistance to stress induced by moisture cycling of solid wood joints and particleboard. J. Applied Polymers Science, Vol. 43, S. 1483 – 1490

Egner, K., Brüning, H., Kolb, H. (1963): Verleimte Voll- und Lagenhölzer - Verhalten unter extremen Klimabedingungen und zerstörungsfreie Prüfung. Luftfahrt-Forschungsberichte, Heft 20, VDI-Verlag

Egner, K., Dorn, H. (1962): Untersuchungen von geleimten tragenden Holzteilen nach längerer Gebrauchsdauer. Sonderdruck aus Heft 25 Holzleimbau, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Egner, K., Jagfeld, P. (1962): Untersuchungen an Harnstoffharzleimen mit Streck- und Füllmitteln für die Leimung von tragenden Holzbauteilen. Holzzentralblatt Nr. 143

Egner, K., Jagfeld, P., Kolb, H. (1969): Alterungsuntersuchungen an gestreckten Harnstoffharzleimen für die Herstellung tragender Holzbauteile. Sonderdruck aus Holz-Zentralblatt, Nr. 17

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

Egner, K., Sinn, H. (1954): Einführung in die Leimung tragender Holzbauteile. Bruderverlag, Karlsruhe.

Feldmeier, F. (2006): Wer weiß was? Ein Beitrag zur Bauphysik. Bauen mit Holz, H. 9, S. 46 - 49

Fritzen, K. (2006): Zur Problematik bei Eissporthallen. Bauen mit Holz, H. 3, S. 44 - 46

Gaber, E. (1938): Leimuntersuchungen, insbesondere über den Einfluss von Zusätzen zur Verbesserung von Kunstharzleim (Klemm-Leim). Holz Roh- und Werkstoff, 1. Jg., H. 8, S. 297 – 298

Graf, O., Egener, K. (1938): Versuche mit geleimten Laschenverbindungen aus Holz. Holz Roh- und Werkstoff, 1. Jg., H. 12, S. 460 – 464

Holzbau-Taschenbuch (1996): Band 1, Grundlagen, Entwurf, Bemessung und Konstruktion, 9. Auflage 1996, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Kinloch, A., Young, R. J. (1983): Fracture behaviour of polymers. Applied Science Publishers, Essex, England

Klemm, H.: (1937): Untersuchungen und Erkenntnisse über den Einfluss von Zusätzen zur Verbesserung des Kauritleims (Klemm-Leim). Private Schrift, Univ. Bib. Stuttgart

Klemm, H. (1938): Neue Leim-Untersuchungen mit besonderer Berücksichtigung der Kalt-Kunstharzleime. Verlag von R. Oldenbourg, München und Berlin

Klemm, H. (1967): Ein Stück Technikgeschichte. Die Entwicklung des ersten Konstruktionsleims. Holz-Zentralblatt 93, 140/141, S. 2203 – 2205

Kolb, H., Frech, P. (1978): Alterungsbeständigkeit von harnstoffharzverleimtem Brettschichtholz. Bauen mit Holz, H.3, S. 1 – 4

Kolb, H. (1995): Geklebte Holzkonstruktionen. In: Übersicht über den Stand des Klebens. Haus der Technik E.V. Essen, Vortragsveröffentlichungen, H. 42, S. 43 – 49, Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, Essen

Kollmann, F., Clad, W., Wittmann, D. (1964): Vergleichsversuche über die Festigkeit von Holzverbindungen mit Harnstoff-Formaldehyd-Harzen. Holz Roh- und Werkstoff, 22. Jg., H. 9, S. 325 - 332

Küch, W. (1954): Über die Feuchtbindefestigkeit von Holzleimen. Holz Roh- und Werkstoff, 12. Jg., H. 11, S. 434 – 442

Mörath, E. (1937): Eigenschaften und Verwendung von Kunstharzleimen. Holz Roh- und Werkstoff, 1. Jg., H. 1/2, S. 21 – 26

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

N.N. (2000): Vergleichende Untersuchungen an Brettschichtholz (BSH)-Verleimungen mit Natur- und Kunstharzen im Kurzzeitversuch nach internationalen Standards und vergleichende Untersuchungen an Brettschichtholz (BSH)-Verleimungen mit Natur- und Kunstharzen zur Ermittlung der Langzeitbeständigkeit. Bericht T 2901, Fraunhofer IRB Verlag

N.N. (2006): Liste der geprüften Klebstoffe, Ausgabe vom 03.01.2006, MPA Universität Stuttgart

N. N. (2006): Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten. Fassung September 2006, Bayerisches Staatsministerium des Inneren

Okkonen, E. A, River, B. H. (1989): Factors affecting the strength of block-shear specimens. Forest Products J., Vol. 39, No. 1, S. 43 – 50

Perry, Th. (1948): Durability of urea-formaldehyde adhesives. Modern Plastics, Bd. 25, H. 7, S. 88 – 91

Preising, R. (2006): Otto Hetzer – Pionier des Holzleimbau. Bauen mit Holz, H. 6, S. 34-36

Raknes, E. (1968): Langtidsbestandighet ev lim for baerende trekonstruksjoner – Resultater etter 2 ars eksponering. Jg. 4, Bd. 22, S. 119 – 132, Norsk Skogindustri

Raknes, E. (1971): Langtidsbestandighet ev lim for baerende trekonstruksjoner – Resultater etter 6 ars eksponering. Jg. 11, Bd. 25, S. 325 – 335, Norsk Skogindustri

Raknes, E. (1976): Langtidsbestandighet ev lim for baerende trekonstruksjoner – Resultater etter 10 ars eksponering. Jg. 6, Bd. 30, S. 168 – 176, Norsk Skogindustri

Raknes, E. (1981): Langtidsbestandighet ev lim for baerende trekonstruksjoner – Resultater etter 15 ars eksponering. Jg. 10, Bd. 35, S. 270 – 273, Norsk Skogindustri

Raknes, E. (1995): Long-term durability of structural adhesives for wood. Norwegian Inst. Wood Techn., Rep. 28

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

River, B. H., Okkonen, E. A. (1993): Contoured wood double cantilever beam specimen for adhesive joint fracture tests. J. Testing and Evaluation, Vol. 21, No. 1, S. 21 – 28

River, B.H., Ebewele, R. O., Myers, G.E (1994): Failure mechanisms in wood joints bonded with urea-formaldehyde adhesives. Holz Roh- und Werkstoff, 52. Jg., S. 179 –184

Steinger, G. (1997): Die Alterungsbeständigkeit von Holzverleimungen. Sonderdruck aus: „Holz- und Tiefbau“, Schweizerische Baumeister- und Zimmermeister-Zeitung, Nr. 28, 23. Juni 1967

Strickler, M. D. (1968): Specimen designs for accelerated tests. Forest Prod. J., Vol. 14, (1), S. 84 – 90

Supf, P. (1955): Hanns Klemm – der Schöpfer des Leichtflugzeuges. Drei Brunnen Verlag, Stuttgart

Turkulin, H., Sell, J. (1997): Structural and fractographic study on weathered wood. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/36, EMPA Abteilung Holz, Oktober 1997, Dübendorf (CH).

Voormann, F., Pfeifer, M. (2007): Die Kämpf-Stegträger der Eissporthalle Bad Reichenhall – Eine typische Holzkonstruktion der 1950er und 1960er Jahre? Bautechnik 84, H. 1, S. 1 - 7

Wangaard, F. F. (1946): Summary of information on the durability of woodworking glues. Report No. 1530, USDA, FPL, Madison, WI, USA

Ward, I. M. (1971): Mechanical properties of solid polymers. Wiley-Interscience, New York

Williams, J. G. (1984): Fracture mechanics of polymers. John Wiley and Sons. New York

Winter, S., Kreuzinger, H. (2008): The Bad Reichenhall ice-arena collapse and the necessary consequences for wide span timber structures. Proceedings (Abstracts) of 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2008), S. 314 und CD-Rom

Zeppenfeld, G. (1991): Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie, 1. Auflage, (1991), Fachbuchverlag, Leipzig

25.2 Normen

ASTM D 905-49 (1949): Standard method for strength properties of adhesives in shear by compression loading

ASTM D 1101-59 (1959): Standard method for integrity of glue joints in structural laminated wood products for exterior use

BS 1204-Part 1 (1979): Synthetic resin adhesives (phenolic and aminoplastic) for wood – Specification for gap-filling adhesives

BS 1204-Part 2 (1979): Synthetic resin adhesives (phenolic and aminoplastic) for wood – Specification for close-contact adhesives

DIN 1052 (1947): Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung, 4. Ausgabe, Oktober 1947.

DIN 53254 (1964): Prüfung von Holzleimen und Holzverleimungen - Bestimmung der Bindefestigkeit von Längsverleimungen im Zugversuch

DIN 53254 (1987): Prüfung von Holzklebstoffen – Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebung im Scherversuch

DIN 68141 (1969): Holzverbindungen - Prüfung von Leimen und Leimverbindungen für tragende Holzbauteile, Gütebedingungen

DIN EN 391 (2002): Brettschichtholz – Delaminierungsprüfung von Klebstoffugen. Deutsche Fassung EN 391:2001

DIN EN 386 (2002): Brettschichtholz, Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung. Deutsche Fassung EN 386:2001

DIN EN 302-1 (2004): Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Längszug-Scherfestigkeit. Deutsche Fassung EN 302-1:2004

DIN EN 302-2 (2004): Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 2: Bestimmung der Delaminierungsbeständigkeit. Deutsche Fassung EN 302-2:2004

DIN EN 302-4 /2004): Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 4: Bestimmung des Einflusses von Holzschwindung auf die Scherfestigkeit. Deutsche Fassung EN 302-4:2004

DIN EN 301 (2006): Klebstoffe für tragende Holzbauteile, Phenoplaste und Aminoplaste – Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Deutsche Fassung EN 301:2006

DIN EN 923 (2005): Klebstoffe – Begriffe und Definitionen. Deutsche Fassung EN 923:2005.

DIN EN 15425 (2008): Klebstoffe – Einkomponenten-Klebstoffe auf Polyurethanbasis für tragende Holzbauteile – Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Deutsche Fassung EN 15425:2008

25.3 Patentschriften, Zulassungen

N.N. (1908) Deutsches Reichspatent Nr. 233 803: Verfahren zur Herstellung von Kondensationsprodukten aus Phenolen und Formaldehyd. Patentveröffentlichung am 31.01.1908. Erfinder: L. H. Baekeland

N. N. (1918): Deutschoesterreichisches Patentamt – Patentschrift Nr. 78251: Verfahren zur Herstellung von Kondensationsprodukten aus Formaldehyd und Harnstoff bzw. Thioharnstoff oder anderen Harnstoffderivaten. Patentanmeldung am 16. Mai 1918; Patentveröffentlichung am 10. Sept. 1919. Erfinder: H. John

N. N. (1929): Deutsche Patentschrift Nr. 550 647. Verfahren zum Verleimen von Holz, insbesondere von Sperr- und Furnierholz. Patentanmeldung durch I. G. Farbenindustrie. Patentiert am 25. Juli 1929. Tag der Bekanntmachung: 28. April 1932. Erfinder: K. Vierling, M., Schmihing und H. Klingenberg

N. N. (1946): Eidgenössisches Amt für geistiges Eigentum – Patentschrift Nr. 254319: Verfahren zur Verleimung aus einzelnen Teilen zusammengesetzter Holzträger. Patentveröffentlichung am 30.04.1948. Erfinder: G. Kämpf

N. N. (1948): Schweizerische Patentschrift Nr. 254319 „Verfahren zur Verleimung aus einzelnen Teilen zusammengesetzter Holzträger. Patentanmeldung beim Eidgenössischen Amt für geistiges Eigentum am 7. September 1946, Patentveröffentlichung am 16. Dezember 1948, Einreicher und Erfinder: G. Kämpf, Rapperswil, Schweiz

N. N. (1952): Deutsche Patentschrift 1653394 „Verleimte Holzträger“, vom 25.08.1952, Deutsches Patentamt, Anmelder: H. Gerlach, Erfinder: G. Kämpf

N. N. (1955): Zulassungsbescheid Nr. IVB 5-9129 K11 des Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 30. März 1955 betreffend den Zulassungsgegenstand „Kämpf-Träger“. Geltungsdauer: 31. März 1958, Zulassungsinhaber: G. Kämpf, Rapperswil, Schweiz

N. N. (1958): Zulassungsbescheid, Aktenzeichen Bauaufsicht – II A4-2.420-Nr.: 3506/58, des Ministeriums für Wiederaufbau des Landes Nordrhein-Westfalen vom 23. Dez. 1958 betr. den Zulassungsgegenstand „Wolff-Stegträger“. Geltungsdauer: 30. November 1963, Zulassungsinhaber: J. Wolff, Ottenberg, Westfalen

N. N. (1961): Zulassungsbescheid Nr. IVB 5-9151/2-56 des Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 21. Juni 1961 betreffend den Zulassungsgegenstand „Kämpf-Träger“. Geltungsdauer: 31. Juli 1962, Zulassungsinhaber: G. Kämpf, Rapperswil, Schweiz

N. N. (1962): Zulassungsbescheid, Aktenzeichen II B2 – 2.420 Nr. 3042/62, des Ministeriums für Landesplanung, Wohnungsbau und öffentliches Arbeiten, des Landes Nordrhein-Westfalen vom 13. Dezember 1962 betreffend den Zulassungsgegenstand „Verleimter Stegträger „System Wolff K““. Geltungsdauer: 31. Dezember 1967, Zulassungsinhaber: Wolff-Hallenbau, Ottenberg / Westfalen

N.N. (1962): Bescheid Nr. IVB 5-9150/3-95 des Bayerischen Staatsministeriums des Innern vom 10. Juli 1962 über die Verlängerung der Geltungsdauer und die Änderung der besonderen Bestimmungen der allgemeinen Zulassung für den Kämpf-Träger. Geltungsdauer bis: 31.07.1963, Zulassungsinhaber: G. Kämpf, Rapperswil, Schweiz

N. N. (1963): Bescheid Nr. IVB 5-9151/2-140 des Bayerischen Staatsministeriums des Innern vom 11.09.1963 über die Verlängerung der Geltungsdauer und die Änderung der besonderen Bestimmungen der allgemeinen Zulassung für den Kämpf-Träger. Geltungsdauer bis: 31.07.1964, Zulassungsinhaber: G. Kämpf, Rapperswil, Schweiz

N. N. (1964): Zulassungsbescheid Nr. IVB 5-9151/2-11 des Bayerischen Staatsministeriums des Innern über die Verlängerung der Geltungsdauer und die Änderung der besonderen Bestimmungen der allgemeinen Zulassung vom 10.04.1964 betreffend den Zulassungsgegenstand „Kämpf-Träger“. Geltungsdauer bis: 31.07.1969, Zulassungsinhaber: G. Kämpf, Rapperswil, Schweiz

25.4 Technische Merkblätter – Industrie-Veröffentlichungen

BASF (1959): vorläufige Arbeitsanweisung – Kaurit-Leim WHK 220 Pulver. Ausgabedatum 12/1959

BASF (1960): Technisches Merkblatt M 796 d, 84603 (559) – Kaurit-Leim W 234 Pulver, Ausgabedatum 03/1960

BASF (1961): Technisches Merkblatt M 1178 d, 84952 – Kaurit-Leim WHK 220 Pulver. Ausgabedatum 01/1961

BASF (1971): Technisches Merkblatt M 2076 d – Kaurit-Leim 234 Pulver, Ausgabedatum 06/1971

BASF (1976): Technisches Merkblatt M 2076 d – Kaurit-Leim 234 Pulver, Ausgabedatum 03/1976

BASF (1978): Technisches Merkblatt M 2076 d – Kaurit-Leim 234 Pulver, Ausgabedatum 08/1978

BASF und Klemm-Technik (1980): Technisches Merkblatt – Kaurit-Leim 234 Pulver im Holzleimbau. Ausgabedatum 06/1980. Vertrieb: Klemm-Technik GmbH & Co KG, Böblingen

BASF (1981): Verbindungen – 50 Jahre ® Kaurit-Leim. Hrsgsb. BASF Aktiengesellschaft

BASF und Türmerleim Werke GmbH (1983): Verarbeitungshinweise – Kaurit-Leim 234 Pulver im Holzleimbau. Ausgabedatum 01/1983

BASF (1982): Technisches Merkblatt – Kauresin 440 flüssig, Ausgabe März 1982

BASF (1984): Technisches Merkblatt M 2076 d – Kaurit-Leim 234 Pulver, Ausgabedatum 07/1984

BASF (1888): Verarbeitungshinweise – Kaurit-Leim 234 Pulver im Holzleimbau. Ausgabedatum 05/1988; Vertrieb: Türmerleim-Werke GmbH

BASF (1991): Technische Information, Holzverleimung allgemeine Hinweise. TI-CIL/E 015 d, Juli 1991, BASF Industriechemikalien, Marketing Leime und Tränkharze, Ludwigshafen

25.5 Interne unveröffentlichte Prüfungsberichte

Graf, O., Knobloch, J. (1938): Ermittlung der Trockenbindefestigkeiten von Klemm-Leim. Interner Prüfungsbericht der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, Institut für die Materialprüfungen des Bauwesens, Stuttgart

Graf, O., Sinn, H. (1939): Versuche über den Einfluss von Holzschutzmitteln auf die Bindefestigkeit von Kauritleim. Interner Prüfungsbericht 171 der Materialprüfanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart

Graf, O. (1940): Holzverwertung, interne Korrespondenz der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, Institut für die Materialprüfungen des Bauwesens, Stuttgart

Brenner, E., Sinn, H. (1944): Leimuntersuchungen. 1. Bericht. Interner Prüfungsbericht 142 der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, August 1944, Institut für die Materialprüfungen des Bauwesens, Stuttgart

Graf, O., Sinn, H. (1945): Kauritleim WHK / Korngröße des verwendeten Bakelitpulvers, 2. Bericht. Interner Prüfungsbericht 211 der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, Institut für die Materialprüfungen des Bauwesens, Stuttgart

Brenner, E., Sinn, H. (1945): Fehlleimungen mit Kauritleim WHK bei Birkenperrholz. Interner Prüfungsbericht 174 der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, Institut für die Materialprüfungen des Bauwesens, Stuttgart

Weil, G., Egener, K., Sinn, H. (1947): Untersuchung des Leims ML XII. Interner Prüfungsbericht 230 der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, Institut für die Materialprüfungen des Bauwesens, Stuttgart

Weil, G., Sinn, H., Abele, S. (1949): Versuche mit Kauritleim, interner Prüfungsbericht 358 der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, Institut für die Materialprüfungen des Bauwesens, Stuttgart

Brenner, E., Sinn, H., Abele, S. (1952): Prüfung von Kauritleim. Interner Prüfungsbericht 788 der Staatlichen Materialprüfanstalt an der Technischen Universität Stuttgart, Institut für technische Holzforschung, Stuttgart

Egener, K., Sinn, H. (1954): Untersuchung der Leime K120 K2 und K120 K4. Interner Prüfungsbericht 1300, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egener, K., Sinn, H. (1954): Untersuchung der Leime K120. Interner Prüfungsbericht 1144, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egener, K., Sinn, H. (1955): Technische Holzforschung; Kauritleim B 10. Interner Prüfungsbericht 1503, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egener, K., Sinn, H. (1955): Untersuchung der Kunstharzleime Kaurit K 120/K, Kaurit K120/2 und Kaurit K120/4 – zusammenfassender Bericht. Interner Prüfungsbericht 1539, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egener, K., Sinn, H., Abele, S. (1955): Untersuchung des Leims Kaurit K120/4. Interner Prüfungsbericht 1538, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egner, K., Abele, S. (1955): Untersuchung der Leime K120/2 und K120/4. Interner Prüfungsbericht 1611a, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egner, K., Abele, S. (1960): Prüfung von Kauritleim WHK 220 Pulver als fugenfüllender Leim für tragende Bauteile. Interner Prüfungsbericht 2531, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egner, K., Abele, S. (1961): Prüfung des „AHAMA-Leimträgers B“ auf seine Eignung als Leim-Streckmittel. Interner Prüfungsbericht 2715, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Abele, S. (1961): Prüfung des Holzleimes Aerolite FFD auf Eignung zum Leimen tragender Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht 3161, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egner, K., Abele, S. (1962): Prüfung des „Kaurit-Leims 270 flüssig“ in Verbindung mit den Leimstreckmehlen „AHAMA-IB“ und „EB“ auf Eignung zum Leimen tragender Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht 2953, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egner, K., Abele, S. (1963): Prüfung der Streckmittel „Bonit IB“ und „Bonit TR“ auf die Eignung als Leim-Füllmittel. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egner, K., Abele, S. (1963): Prüfung des Leimes Melocol 300. Interner Prüfungsbericht 3160, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Egner, K., Abele, S. (1964): Prüfung von Kaurit-Leim WHK 220 – Pulver als fugenfüllender Leim für tragende Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Weil, G., Abele, S. (1964): Prüfung des Leimes Aerolite FFD in Verbindung mit Härter 200 und EB-Mehl auf Eignung zum Leimen tragender Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht 3390, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1966): Prüfung des Kaurit-Leims 220 Pulver (Kaurit KR 4052 Pulver) in Verbindung mit Härter 70 auf Eignung zum Leimen tragender Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht 3766, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1966): Prüfung des Kaurit-Leims 234 in Verbindung mit dem neuentwickelten Bonit-Leim-Modifikator 125 und Härter 70 auf Eignung zum Leimen tragender Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Jagfeld, P., Goth, H. (1968): Prüfung von Cascosinol- und Cascorit-Leim auf Eignung zum Leimen tragender Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht 3380, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1971): Prüfung des Leimes „Melocol 400 B“ in Verbindung mit Industriemehl EB und Härter 205 auf Eignung zum Leimen tragender Holzbauteile. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1976): Prüfung von Kaurit-Leim 270 in Verbindung mit Walzit W 250 und Härter 70. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Frech, P. (1977): Langfristige Beständigkeit von Brettschichtholz verleimt mit Harnstoffharzleim. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1980): Prüfung des Harnstoffharzleimes Aerolite KL in Verbindung mit Härter L58, Walzit 250 und Wasser. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1980): Prüfung des Harnstoffharzleimes Aerolite KL in Verbindung mit Härter L58, Industriemehl EB und Wasser. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1980): Prüfung des Harnstoffharzleimes Synteko 1206 in Verbindung mit Härter 2747 und Wasser. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1982): Prüfung des Harnstoff-Harz-Leims Dynorit L-103 in Verbindung mit Härter H-225, Bonit Leimmodifikator 260 und Wasser nach DIN 68141. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1983): Prüfung des Harnstoff-Harz-Leims Dynorit L-103 in Verbindung mit Härter H-225, Bonit Leimmodifikator 260 und Wasser nach DIN 68141. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1983): Prüfung des Harnstoff-Harz-Leims Dynorit L-503 in Verbindung mit Härter H-226, Bonit 260 und Wasser nach DIN 68141. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Kolb, H., Goth, H. (1983): Prüfung von Walzit 250 im Vergleich zu Bonit-Leimmodifikator 260 in Verbindung mit Dynorit L-103 und Härter H-225 nach DIN 68141. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

Radovic, B., Goth, H. (1992): Prüfung von Dynorit-L-103 in Verbindung mit Härter H-120 und Wasser nach DIN 68141. Interner Prüfungsbericht, Otto-Graf-Institut, Stuttgart



Universität Stuttgart

www.mpa.uni-stuttgart.de

