

Berufsakademie Sachsen

ETH Zürich

Staatliche Studienakademie Dresden

Institut für Baustoffe/ Holzphysik

Studienrichtung Holztechnik

8093 Zürich

Einfluss der chemischen Vorbehandlung auf die Verklebungsgüte von Holz

Diplomarbeit

zum Erlangen des Grades

Diplom - Ingenieur (BA)

in der Studienrichtung Holztechnik

Eingereicht von

Sven Schlegel

01.10.1987

1. Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz

2. Gutachter:

Tag der Themenübergabe:

Tag der Einreichung:

Danksagung

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz für die Möglichkeit, diese Arbeit an dem Institut für Baustoffe der ETH Zürich zu schreiben.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Hänsel für die Vermittlung an die ETH Zürich und das damit verbundene Vertrauen in meine Fähigkeiten.

Ich danke meinen Betreuern Philipp Haß und Oliver Kläusler für die zahlreichen konstruktiven Gespräche und Hilfestellungen, die zur Anfertigung dieser Arbeit beitrugen. Ebenso danke ich meinen Betreuern für die Anleitung während den Experimenten.

Weiterhin danke ich der gesamten Arbeitsgruppe Holzphysik der ETH Zürich. Sie ermöglichte mit der freundlichen Aufnahme und den Ratschlägen das Gelingen dieser Arbeit.

Autorenreferat

SCHLEGEL, Sven: Einfluss der chemischen Vorbehandlung auf die Verklebungsgüte von Holz, Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Dresden, Studienrichtung Holztechnik, Diplomarbeit, 2012.
60 Seiten, 50 Literaturquellen, 7 Anlagen.

Diese Arbeit befasst sich mit der Festigkeit von Klebungen. Der Einfluss verschiedener Primer und Quellmittel auf die Nassfestigkeit soll näher betrachtet werden. Hierfür wird die Wirkung von drei Polymer– MDI- Primern, zwei Polyisocyanat- Primern und vier Quellmitteln auf die Verklebungsgüte des Einkomponenten Polyurethanklebstoffes PURBUND® HB S309 verglichen. In den Versuchen wird die Zugscherfestigkeit und der Holzbruchanteil der Proben, unter den in DIN prEN 302-1: 2011 beschriebenen Lagerfolgen, ermittelt.

Inhalt

	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole	6
1	Aktualität und Zielstellung	8
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Primer	9
2.2	Haftvermittler	10
2.3	Klebstoffe	10
2.3.1	Definition und Einteilung	10
2.3.2	Polyurethanklebstoffe	13
2.4	Kleben	16
2.4.1	Kleben als Fügeprozess	16
2.4.2	Adhäsion und Kohäsion	17
2.5	Adhäsionstheorien	20
2.6	Einfluss ausgewählter Holzeigenschaften auf die Verklebungsgüte	24
2.6.1	Faserrichtung	24
2.6.2	Holzfeuchte	25
2.6.3	Rohdichte	25
2.6.4	Chemische Bestandteile	26
3	Material und Methoden	28
3.1	Prüfkörperherstellung	28
3.2	Primer	28
3.3	Klebstoff	30
3.4	Vorbehandlung nach DIN	30
3.5	Prüfungen	31
3.5.1	Holzfeuchte	31
3.5.2	Rohdichte	32
3.5.3	Jahrringwinkel	32
3.5.4	Zugscherfestigkeit	33
3.5.5	Holzbruchanteil	34
4	Darstellung der Ergebnisse	35

4.1	Rohdichte, Jahrringwinkel und Holzfeuchte	35
4.2	Zugscherfestigkeit	36
4.3	Holzbruch	38
5	Diskussion	40
6	Zusammenfassung	49
7	Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen	51
8	Literaturverzeichnis	52
9	Verzeichnis der Abbildungen	57
10	Verzeichnis der Tabellen	59
11	Verzeichnis der Anlagen	60

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

%	Prozent
°	Grad
°C	Grad Celsius
1 K PUR	Einkomponenten Polyurethan Klebstoff
Abb.	Abbildung
b	Breite
b _N	Nutbreite
cm	Zentimeter
cm ²	Quadratzentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
DMF	Dimethylformamid
DMSO	Dimethylsulfoxid
EMIMAc	Ethylmethylimidazolium acetat
F	Kraft
f.	und folgende
ff.	und fortfolgende
f _{sv}	Energieänderung
g	Gramm
g/m ²	Gramm pro Quadratmeter
h	Stunde
HDI	Hexamethylendiisocyanat
HMR	hydroxymethyliertes Resorcinol
IPDI	Isophorondiisocyanat
kg	Kilogramm
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
kJ	Kilojoule
l _N	Nutlänge
m	Masse
m ₀	Masse des darrtrockenen Holz
m ₁	Masse der Holzprobe vor dem Trocknen
MDI	Methylendiphenyldiisocyanat
Min	Minute
mm	Millimeter

mm^2	Quadratmillimeter
MPa	Megapascal
MPa*s	Megapascalsekunden
N	Newton
N/mm^2	Newton pro Quadratmillimeter
PMDI	Diphenylmethandiisocyanat
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
rLF	relative Luftfeuchte
t	Zeit
t_B	Zeit bis zum Bruch der Prüfkörper
TDI	Toluoldiisocyanat
u.a.	unter anderem
V	Volumen
vgl.	vergleiche
V_k	Volumen der Probekörpers
V_N	Volumen der Nut
W_A	spezifische Adhäsionsarbeit
$W_{A'}$	Adhäsionsarbeit
W_c	Kohäsionsarbeit
γ_{LV}	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
γ_s	Oberflächenenergie des Festkörpers im Vakuum
γ_{SL}	Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper
γ_{SV}	Oberflächenenergie des Festkörpers
θ	Kontaktwinkel
ρ	Rohdichte
ω	Holzfeuchte

1 Aktualität und Zielstellung

Bereits sehr früh in der Geschichte wurde Holz zum Bau grosser Gebäude, Schiffe und Brücken genutzt. Vor allem ästhetische Ansprüche und das Verlangen nach gestalterischer Vielfalt lenkten die Aufmerksamkeit auf den Baustoff Holz. Die Entwicklung von Holzwerkstoffen, die Einführung moderner Messmethoden sowie die strenge Überwachung der Bauwerke ermöglichen dem modernen Holzbau gleichwertige Konstruktionen wie Stahl oder Beton. Zudem weist Holz gleichzeitig hohe Widerstände gegen Druck, Zug und Biegebeanspruchung auf. Weitere Vorteile liegen in dem guten Verhältnis zwischen Eigengewicht und statischer Belastbarkeit sowie der einfachen Bearbeitbarkeit. Auch das ökologische Umdenken in der heutigen Zeit trägt zu der steigenden Beliebtheit bei. Die Weiterentwicklung des Leimholzbaus ist unumgänglich, um der Nachfrage nach verbesserten Eigenschaften gerecht zu werden. Die eingeschränkten Verbesserungsmöglichkeiten der Festigkeitseigenschaften des Holzes lenken dabei die Aufmerksamkeit auf die Verbindungsmittel. Klebstoffe bilden hierbei die Grundlage, um stoffschlüssige Bauteile zu erzeugen. Eine Vielzahl an Forschungsarbeiten belegt, dass vor allem die Beschaffenheit der Fügefläche einen grossen Einfluss auf die Verklebungsgüte hat. Durch mechanische und chemische Behandlungen können die Eigenschaften der Fügefläche positiv beeinflusst werden. In dieser Arbeit soll deshalb der Einfluss der chemischen Vorbehandlung auf die Qualität von Holzverklebungen untersucht werden. Vor allem die Wirkung von formaldehydfreien Primern auf Polyurethan-Reaktionsklebstoffe und die damit verbundene Nassfestigkeit sollen im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen. Neun verschiedene Primer bzw. Quellmittel werden hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Klebungen von Rotbuchenbrettern verglichen. Grundlage dazu bildet die Norm DIN prEN 302-1: 2011. Zur Verklebung kommt der Einkomponenten Polyurethanklebstoff PURBOND HB S309 der Firma Henkel AG & Co. KGaA zum Einsatz. Durch die Lagerbedingungen A1 (keine Vorbehandlung, Prüfung im Normalklima), A4 (Wasserlagerung, Prüfung im nassen Zustand) und A5 (Wasserlagerung, Prüfung nach Rücktrocknung) (genau beschrieben in DIN prEN 302-1: 2011) soll vor allem die mögliche Verbesserung der Nassfestigkeit erörtert werden. Als Kriterium für die Qualität der Verklebung sollen die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Zugscherfestigkeit und ihres Holzbruchanteils verglichen werden. Für weiterführende Untersuchungen wird auf Verbesserungsmöglichkeiten und Modifikationen des Klebstoffsystems hingewiesen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Primer

Unter einem Primer versteht man einen Stoff, der vor dem Fügeprozess auf die Fügefläche aufgetragen wird. Das Ziel dieser Vorbehandlung ist die Verbesserung der Adhäsion oder der Schutz vor schädigenden Umwelteinflüssen. Bei den meisten formaldehydfreien Primern handelt es sich um verdünnte Polymerlösungen, die neben der Steigerung der Benetzbarkeit der Fügeteiloberfläche auch meist eine reinigende Wirkung haben. Um die Emission von Lösemitteln zu verringern, kommen aber immer häufiger Dispersionen auf Wasserbasis bzw. Systeme in pulvriger Form, nach lösen in Wasser, zum Einsatz. Der chemische Aufbau des Primers ähnelt meist dem des später zu verwendenden Klebstoffes. Durch den Schutz der Oberfläche kann der eigentliche Klebevorgang zeitlich von der mechanischen Vorbehandlung entkoppelt werden, da die Alterung der Oberfläche verhindert wird¹.

Die Anwendungsgebiete von Primern reichen vom Schutz vor Unterwanderungskorrosion im Flugzeugbau² über die Verbesserung der Alterungsbeständigkeit bei Kunststoffverklebungen³ bis hin zur Automobilindustrie, um als Lackadditiv die Haftung der Beschichtung zu verbessern⁴.

Bei der Anwendung von hydroxymethyliertes Resorcinol (HMR), als Primer, sind für die Verklebung von Holz bereits umfassende Forschungen durchgeführt worden⁵. Eine Hypothese erklärt die erhöhte Festigkeit durch die Reaktion des HMR- Primers mit der Holzoberfläche. Durch die chemische Reaktion des Primers mit der Zellwand entstehen kovalente Bindungen, die wiederum die Anzahl an Hydroxylgruppen erhöhen. Die im Polyurethanklebstoff vorhandenen Isocyanatgruppen können mit den Hydroxylgruppen eine chemische Bindung eingehen welche die Festigkeit der Klebung erhöht⁶.

Durch den Einsatz der chemischen Substanzen soll durch kontrolliertes Anquellen der Holzsubstanz die Klebstoffpenetration in die Zellwand verbessert werden. Weiterhin verspricht die Anwendung von Primern eine vermehrte Bildung von reaktiven Gruppen an der Holzoberfläche, wodurch die chemische Adhäsion begünstigt wird. Infolge der Benetzung durch die liquiden Substanzen soll sich die

¹ vgl. BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. (2005), Seite 39

² vgl. HABENICHT, G. (2006), Seite 166

³ vgl. ebenda, Seite 21

⁴ vgl. DA SILVA, L./ OCHSNER, A./ ADAMS, R. D. (2011), Seite 1283

⁵ vgl. VICK, C. / OKKONEN, A. (2000), S.69ff.

⁶ vgl. CHRISTIANSEN, A. W. (2005), Seite 73 ff.

durch mechanische Oberflächenbearbeitung komprimierte Holzoberfläche vergrössern. Die Vergrösserung der Oberfläche beeinflusst sowohl die mechanische Adhäsion da mehr Porenraum zur Verfügung steht als auch die chemischen Bindungen da eine grössere Anzahl an Reaktionspartnern vorhanden ist.

2.2 Haftvermittler

Niedermolekulare Stoffe organischen Ursprunges, die sowohl mit der Fügeiteiloberfläche als auch mit dem Klebstoff chemische Bindungen eingehen können, werden als Haftvermittler bezeichnet. Die erste schriftliche Erwähnung von Haftvermittlern findet man bereits im 18. Jahrhundert. Dabei handelt es sich um eine Arbeit des Franzosen MONCEAU der die Verwendung von Knoblauch zur Vorbehandlung von Klebeflächen empfahl, um die Festigkeit der Klebung zu verbessern⁷.

Wegen der grossen Anzahl an Materialien und Klebstoffsystemen in der Industrie ist auch die Auswahl an Haftvermittlern sehr gross. Entscheidend für die Wahl des richtigen Haftvermittlers ist neben dem Material des Substrats, dessen Oberflächenbeschaffenheit, und das Verhalten gegenüber Umweltveränderungen wie Temperatur und mechanischer Beanspruchung⁸.

2.3 Klebstoffe

2.3.1 Definition und Einteilung

DIN EN 923 (2008) definiert einen Klebstoff als einen nicht- metallischen Stoff dessen Flächenhaftung und Kohäsionskräfte Fügeiteile miteinander verbinden können. Um als Klebstoff zu wirken ist eine hohe Beweglichkeit der Moleküle einer Substanz beim Fügevorgang Voraussetzung, um den Stoffschluss mit der unebenen, festen Fügefläche zu ermöglichen. Andererseits muss die Substanz nach dem Aushärten eine möglichst geringe molekulare Beweglichkeit aufweisen um Kräfte zwischen den beiden Fügeflächen übertragen zu können⁹.

Die grosse Anzahl an unterschiedlichen Klebstoffen ermöglicht zahllose Einteilungsmöglichkeiten. Grundlegend kann man Reaktivklebstoffe, Lösemittelklebstoffe, Dispersions- und Schmelzklebstoffe unterscheiden. Da für die

⁷ vgl. BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. (2005), Seite 7

⁸ vgl. BIELMAN, J. (1998), Seite 117

⁹ vgl. BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. (2005), Seite 31

Untersuchung in dieser Arbeit nur die PUR- Reaktivklebstoffe von Bedeutung sind, sollen die anderen drei Gruppen nicht genauer erläutert werden.

Eines der gebräuchlichsten Ordnungsprinzipien ist die Unterscheidung nach dem chemischen Grundstoff. Dabei unterscheidet man organische und anorganische Verbindungen und die Sondergruppe der Silikone (Abb.: 2.1).

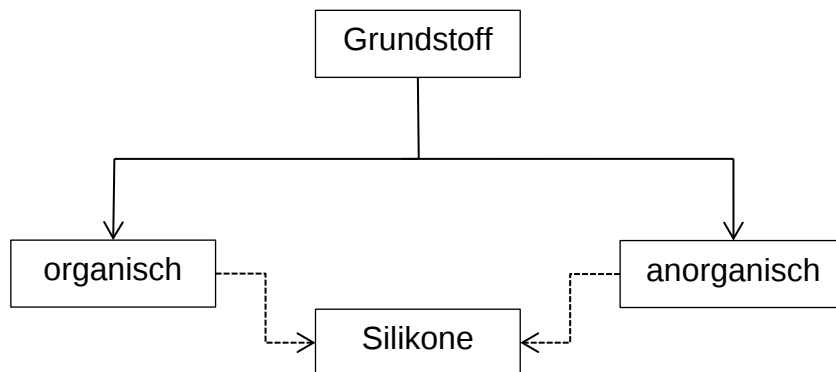


Abb.: 2.1 Einteilung der Klebstoffe nach dem chemischen Klebgrundstoff (Quelle: modifiziert nach HABENICHT, G. 2006, Seite 5)

Bei dem grössten Teil der organischen Klebstoffe wird der Klebgrundstoff künstlich hergestellt. Unterschieden wird bei dieser Einteilung nach der unterschiedlichen Klebfestigkeit und Alterungsbeständigkeit. Dabei weisen die synthetisch hergestellten Klebstoffe bessere Eigenschaften auf. Eine andere Möglichkeit ist die Unterscheidung nach der Abbinde­temperatur. Durch die geringere thermische Beständigkeit der organischen Verbindung werden diese überwiegen bei Raumtemperatur verarbeitet. Durch die Sonderstellung der Silikone können diese sowohl Merkmale der organischen als auch der anorganischen Klebstoffe aufweisen¹⁰.

Üblicherweise unterteilt man die sehr umfassende Gruppe der organischen Klebstoffe nach ihrem Vorkommen. Es wird unterschieden ob die Basis des Klebstoffs natürlich vorkommt oder synthetisch hergestellt wird. Dabei basieren natürliche Klebstoffe auf Eiweissen bzw. Kohlenhydraten und die künstlichen Klebstoffe auf Reaktionsprodukten einer Polymerisation, einer Polykondensation oder einer Polyaddition (Abb.: 2.2).

¹⁰ vgl. HABENICHT, G. (2006), Seite 4f.

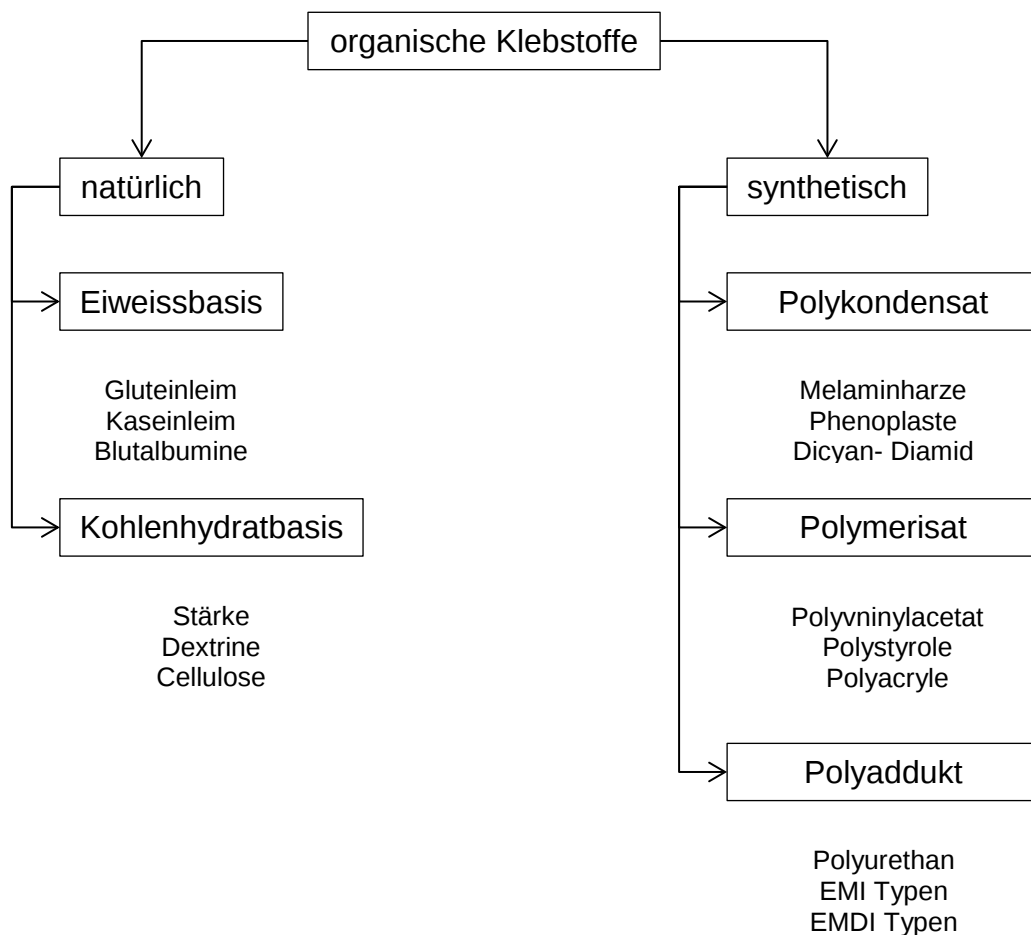


Abb.: 2.2 Einteilung der organischen Klebstoffe (Quelle: modifiziert nach MÖMBÄCHER, R. 1988, Seite 649)

Das letzte Ordnungsprinzip, das hier vorgestellt werden soll, ist die Einteilung nach den Härtungsmechanismen. Grundlegend unterscheidet man dabei die physikalisch härtenden Klebstoffe, die chemisch härtenden Klebstoffe und die Haftklebstoffe¹¹. Physikalisch härtende Klebstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass der Übergang vom flüssigen Zustand bei der Applikation zum ausgehärteten Zustand allein durch physikalische Vorgänge geschieht. Im chemischen Sinn ändert sich die Polymerstruktur des Klebers nicht, die Verfestigung beruht allein auf Verdampfungs-, Erstarrungs- oder Diffusionsvorgängen. Im Gegensatz dazu beinhalten chemisch härtende Systeme reaktive Gruppen, die unter speziellen Voraussetzungen, nach der Applikation miteinander reagieren. Durch diese Reaktion entstehen aus unvernetzten Polymeren hoch vernetzte Molekülstrukturen, die sich durch eine hohe mechanische Widerstandsfähigkeit auszeichnen¹². Haftklebstoffe bilden in gewisser Weise eine Sondergruppe der Klebstoffe. Da sie weder durch physikalische noch durch chemische Vorgänge eine ausreichende

¹¹ vgl. BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. (2005), Seite 32f.

¹² vgl. ebenda, Seite 33ff.

Haftung erzeugen. Die, bereits vor dem Auftragen, hochviskosen Haftklebstoffe erzeugen ausreichend starke zwischenmolekulare Kräfte, in dem sich die Moleküle durch den aufgetragenen Pressdruck bis auf den atomaren Abstandsbereich annähern. Zur Erklärung der ausreichenden Klebschichtfestigkeit gibt es zwei Modellansätze. Da Haftklebstoffe nicht Gegenstand dieser wissenschaftlichen Arbeit sind, wird auf diese Ansätze hier nicht näher eingegangen. Der Vollständigkeit halber werden sie jedoch nachfolgend kurz benannt: Das Modell nach STEFAN erklärt, die „Klebschichtfestigkeit als Folge des strömungsmechanischen Verhaltens von Flüssigkeiten“¹³. Die andere Theorie begründet die Klebschichtfestigkeit durch das Grenzflächenverhalten von liquiden Substanzen¹⁴. Zur Veranschaulichung des Ordnungsprinzips nach dem Aushärtungsmechanismus soll Abb.: 2.3 dienen.

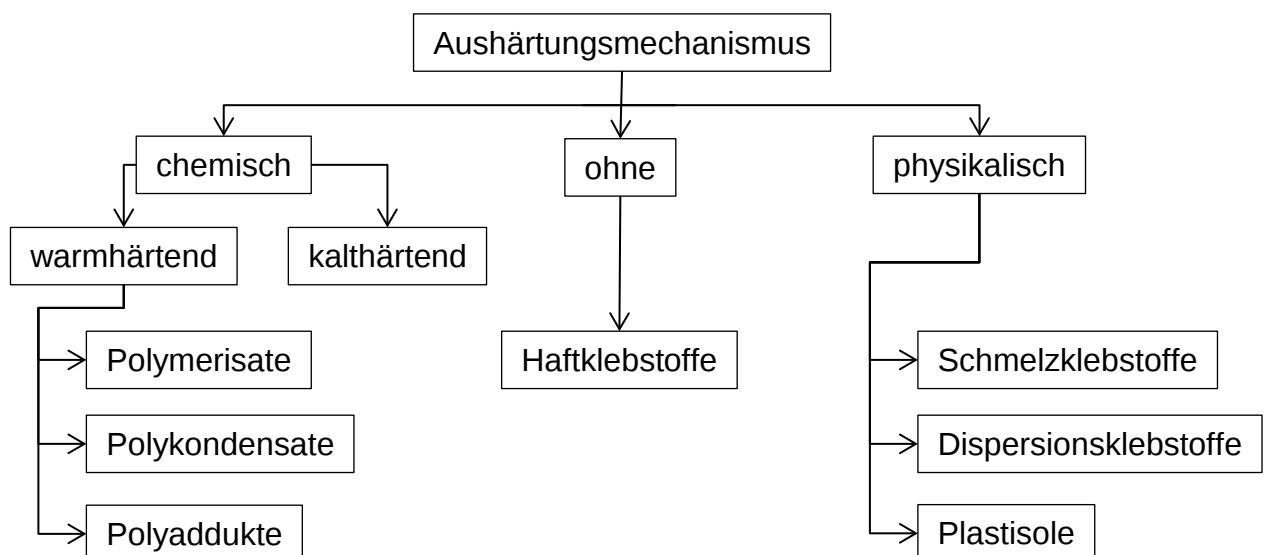


Abb.: 2.3 Einteilung der Klebstoffe nach dem Aushärtungsmechanismus (Quelle: modifiziert nach BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. 2005, Seite 33)

2.3.2 Polyurethanklebstoffe

Polyurethanklebstoffe (PUR-Klebstoffe) besitzen ein breit gefächertes Einsatzspektrum. Mit ihnen lassen sich die unterschiedlichsten Werkstoffe aus Metall, Kunststoff oder Holz verbinden. Durch die Kombination der richtigen Ausgangsstoffe lassen sich die elastomechanischen Eigenschaften der Klebfuge gezielt beeinflussen. Die Grundlage für alle Polyurethanklebstoffe bilden, durch

¹³ vgl. STEFAN, J. (1874), Seite 713ff.

¹⁴ vgl. KÖHLER, R. (1972), Seite 43ff.

Polykondensation hergestellte, Polyole und durch Phosgenierung gewonnene, Isocyanate¹⁵.

Je nach Verwendungszweck des Isocyanates werden für die Einkomponenten Polyurethanklebstoff (1K PUR) Herstellung aromatische oder aliphatische Polyisocyanate verwendet. Aromatische Isocyanate sind kostengünstiger und gleichzeitig reaktiver, dafür sind aliphatische Isocyanate wesentlich lichtunempfindlicher. Zu den am häufigsten verwendeten Diisocyanaten gehören Diphenylmethandiisocyanate (MDI), Toluoldiisocyanate (TDI), Isophorondiisocyanate (IPDI) und Hexamethylendiisocyanate (HDI).

Charakteristisch für alle Polyole sind deren reaktive Hydroxylgruppen. Anhand der chemischen Basis differenziert man zwischen Polyetherpolyolen, Polypropylenoxiden, Polyesterpolyolen, Polybutadienen und dem in diesem Zusammenhang einzigen Polyol natürlichen Ursprungs, dem Rizinusöl¹⁶.

Charakteristisch für PUR- Reaktionsklebstoffe ist die Aushärtung zu Elastomeren oder Duromeren. Je nachdem welche Rohstoffe man kombiniert, ergeben sich unterschiedliche Vernetzungsgrade und Festigkeitseigenschaften der resultierenden Polymere¹⁷.

Bei den PUR– Reaktivklebstoffe unterscheidet man die Ein- bzw. Zweikomponentensysteme. Letztere sind lösungsmittelfreie Klebstoffe. Bei den Zweikomponenten Klebstoffen beeinflusst die Polyesterkomponente die Adhäsions- und Kohäsionskräfte, wobei unter Verwendung von Polyesterpolyol härtere und unelastischere Klebfugen entstehen. Hingegen bilden Systeme mit Polyetherpolyolen elastischere Klebfugen¹⁸.

1K- PUR- Klebstoffe härten allein durch die Umgebungsfeuchte und die Holzfeuchte. Diese reagieren mit der vorhandenen Luftfeuchte und der Feuchte im Substrat unter Bildung von Polyharnstoffen. Bei der Reaktion der Isocyanatgruppen entsteht Kohlendioxyd welches an die Umgebung abgegeben wird (Abb.: 2.4). Bis zur vollständigen Härtung des Klebstoffs werden die Fügeflächen in der gewünschten Position fixiert¹⁹.

¹⁵ vgl. ZEPPENFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005), Seite 176f.

¹⁶ vgl. MÜLLER, B./ RATH, W. (2004), Seite 115ff.

¹⁷ vgl. WESTHUES, U. M. (2007), Seite 241ff.

¹⁸ vgl. ZEPPENFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005), Seite 179f.

¹⁹ vgl. WESTHUES, U. M. (2007), Seite 251

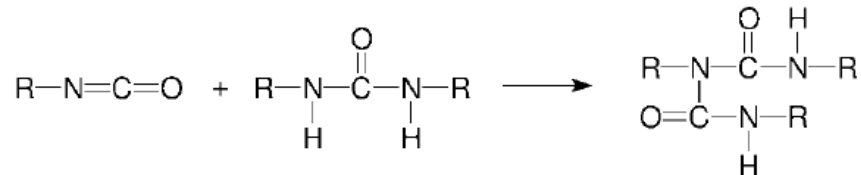
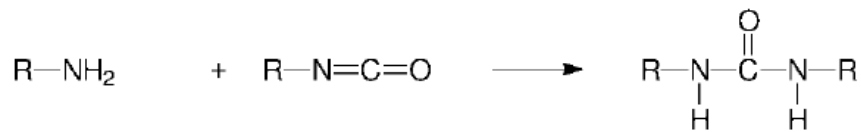
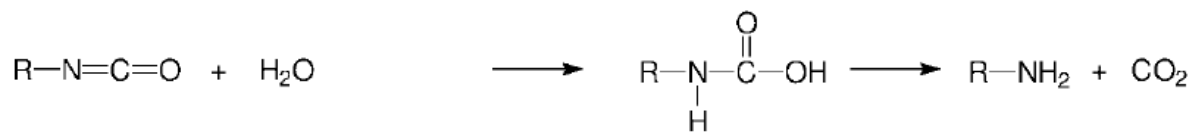


Abb.: 2.4 Reaktionsmechanismus 1K- PUR- Klebstoff (Quelle: BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. (2005), Seite 64)

Um den Reaktionsmechanismus zu beschleunigen können Katalysatoren eingesetzt werden. Diese verringern nicht nur die Härtingszeit sondern sorgen meist auch für eine bessere Vernetzung von Holz und Klebstoff. Durch die kontrollierte Anordnung der Polyharnstoffmoleküle kann sich eine optimale Gitternetzstruktur in der Klebfuge bilden. Somit können die maximale Festigkeit und das Maximum an chemischer Beständigkeit erreicht werden²⁰.

²⁰ vgl PIZZI, A. (1983), Seite 293

2.4 Kleben

2.4.1 Kleben als Fügeprozess

Die DIN 8593-8 ordnet Kleben dem Fertigungsverfahren Fügen unter (Abb.: 2.5). Dabei werden die entsprechenden Kohäsions- und Adhäsionskräfte durch einen Klebstoff realisiert.

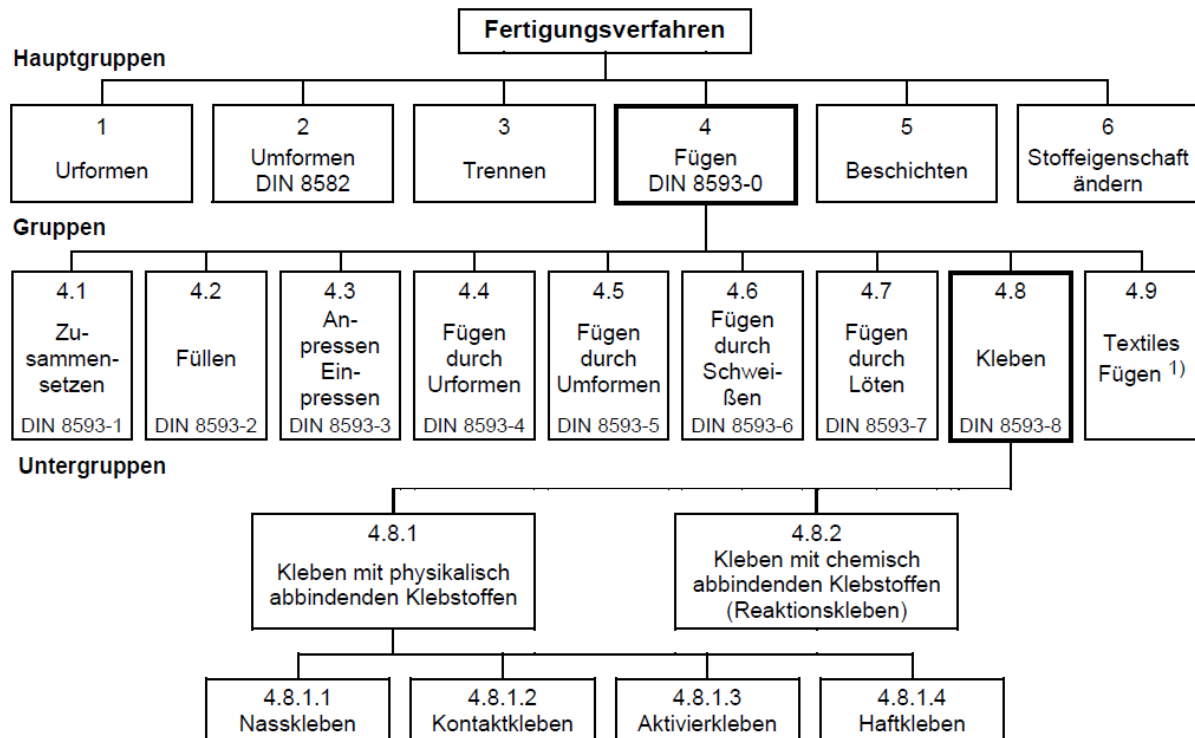


Abb.: 2.5 Einordnung von Kleben in die Fertigungsverfahren (Quelle: DIN 8593-8 (2003), Seite 5)

Der grösste Vorteil beim Kleben von Bauteilen besteht darin, dass die eigentliche Geometrie / der Querschnitt des Werkstücks nicht durch Bohrungen, das Eindringen von Schrauben o. ä. geschwächt wird.

In der Klebfuge werden vor allem Scherkräfte übertragen. Dabei übersteigt bei richtiger Anwendung die Festigkeit der Klebfuge die Festigkeit der Fügeteile²¹.

Nach MARRA besteht die Hauptaufgabe einer Klebefuge in der Übertragung von mechanischen Kräften. Um die Vorgänge in einem gefügten Bauteil zu erläutern, teilt MARRA die Klebstofffuge in neun Teile auf (Abb.: 2.6).

²¹ vgl. GÖTZ, K. H. /HOOR, D./ MÖHLER, K./NATTERER, J. (1978), Seite 54

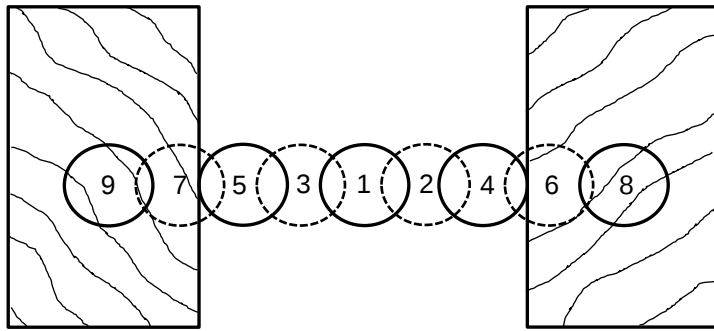


Abb.: 2.6 Aufbau der Leimfuge (Quelle: modifiziert nach MARRA, A. A. 1992, Seite 37).

Der stark vereinfachte, symmetrische Aufbau entspricht dabei nur selten der Realität. Zum Beispiel können sich die Fügeflächen in Material (Punkt 8 und 9) und Oberflächenqualität (Punkt 6 und 7) unterscheiden, oder es werden unterschiedliche Substanzen auf die beiden Fügeflächen aufgetragen. Unter Berücksichtigung dieser Ungenauigkeit kennzeichnen die Bereiche 8 und 9 das unveränderte Holz mit dessen typischen Festigkeitswerten.

Die Bereiche 4 und 5 markieren die Bereiche der Adhäsion, d. h. die eigentliche Verbindung von Holz und Klebstoff. Stellvertretend für den reinen Klebstoff steht der Bereich 1. Dieser verbindet die zwei Holzflächen und überträgt alle Kräfte zwischen den beiden Teilen. Direkt unter der Fügeiloberfläche liegen die durch Oberflächenbehandlung geschädigten Zonen 6 und 7. Sollte der eindringende Klebstoff diese Schädigungen nicht kompensieren, bilden diese Stellen das schwächste Glied in der gesamten Klebfuge. Für den Fall einer inhomogenen Klebfuge, bedingt durch verschiedene Holzeigenschaften oder Holzinhaltstoffe, vervollständigte MARRA sein Schema mit den Bereichen 2 und 3. Diese Bereiche können durch die Wirkung der Holzinhaltstoffe auf den Klebstoff im chemischen Aufbau variieren. Somit markieren die Bereiche 2, 3, 6 und 7 die Schwachstellen die in fast allen Klebfugen vorkommen²².

2.4.2 Adhäsion und Kohäsion

LOHMANN definiert Kohäsion als die innere Widerstandsfähigkeit eines Körpers resultierend aus der Gesamtheit aller wirkenden Kräfte²³. Diese bestehen aus chemische Bindungen und Nebenvalenzkräften²⁴. Bei Klebstoffen haben dabei die chemischen Bindungen einen stärkeren Einfluss auf die Festigkeit des Klebstoffes

²² vgl. MARRA, A. A. (1992), Seite 37f.

²³ vgl. LOHMANN, U. (2010), Seite 700

²⁴ vgl. FRITZ, A. H./ SCHULZE, G. (2010), Seite 236

als die Nebenvalenzkräfte. Es existieren drei verschiedene Arten von chemischen Primärbindungen: die Metallbindung, die Ionenbindung und die kovalente Bindung. Für die Kohäsionskräfte in Klebstoffen sind die Metallbindungen von untergeordneter Bedeutung, da nach Definition Klebstoffe nicht- metallische Substanzen sind. Lediglich bei der Verklebung von Metallen müssen diese berücksichtigt werden. Weitaus bedeutender sind die kovalenten Bindungen die auch als Elektronenpaarbindungen bezeichnet werden. Nach dem Prinzip von CHATELIER²⁵ bilden sich Elektronenpaare zwischen den gebundenen Atomen, die zum Energieminimum streben. Die Energie zum Trennen dieser Verbindung heisst Dissoziationsenergie. Diese ist um einiges höher als die thermische Energie die üblicherweise zur Verarbeitung von Klebstoffen benötigt wird. Somit ist die Energie der kovalenten Bindung ein Mass für die thermische Beständigkeit von Klebfugen. Nur durch Überschreitung der Verarbeitungstemperatur und genügend Sauerstoff kann es zur Oxidation und somit zur Zerstörung der Bindung kommen. Auch durch Pyrolyse ist es möglich, die Verbindung zu trennen. Dafür müssen aber Temperaturen von mindestens 400°C auf den Klebstoff einwirken. Vergleichbare zerstörende Wirkung wird u.a. auch durch energetische Strahlung und Ultraschall erzeugt. Übertroffen wird die Bindungsenergie kovalenter Bindungen nur noch durch Ionenbindungen. Diese entstehen durch den Elektronenübergang von einem Atom auf ein anderes. Die entgegengesetzt geladenen Ionen ziehen sich gegenseitig an. Der Elektronenaustausch bewirkt die Sättigung der Aussenelektronenschale, wodurch die Ionen einen edelgasähnlichen Zustand erreichen. Das entstandene Kristallgitter ist bis zum Schmelzpunkt thermisch stabil. Somit sind Ionenbindungen der zweite Faktor für die thermische Beständigkeit des Klebstoffs. Sie sind jedoch seltener und treten meist nur in anorganischen Verbindungen auf.

Unter dem Begriff der Nebenvalenzkräfte fasst man die Gruppe der physikalischen Wechselbeziehungen zusammen, die in einer Substanz zwischen Atomen und Molekülen wirken. Physikalische Bindekräfte unterteilen sich in Dispersionskräfte, Dipolkräfte, Induktionskräfte und Wasserstoffbrückenbindungen. Diese besitzen jedoch, im Gegensatz zu chemischen Bindungen, um ein vielfaches geringere Bindungsenergien (Tabelle 2.1)²⁶. Daher scheint es naheliegend, diese eher schwachen Bindungskräfte zu vernachlässigen. Die hohe Anzahl an funktionellen

²⁵ vgl. LATSCHA, H. P./ KAZMEIER, U./ KLEIN, H. A. (2005), Seite 205

²⁶ vgl. ZEPPEFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005), Seite 19ff.

Gruppen im Klebstoff sowie im Holz kann in der Summe jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss der Nebenvalenzkräfte bewirken.

Tabelle 2.1 Vergleich der Bindungsenergien

Bindungsart	Chemische Bindung	Wasserstoffbrückenbindung	Dispersions-, Dipol- und Induktionskräfte
Dissoziationsenergie in kJ	335 - 420	21	8,4

Verantwortlich für die Qualität der Verleimung ist nicht allein die Kohäsion. Die Summe aller chemischen und physikalischen Kräfte, die auf molekularer Ebene den Zusammenhalt von verschiedenen Flächen / Materialien ermöglichen wird als Adhäsion bezeichnet²⁷. Intensive Forschungen in den letzten Jahrzehnten zeigten, dass die Adhäsion eines der wichtigsten Phänomene bei der Haftung von Stoffen ist. Jedoch ist es bis heute noch nicht gelungen, alle Mechanismen vollständig zu erklären. Durch die grosse Anzahl an Einflussfaktoren, wie den Eigenschaften der Fügeiteiloberfläche, den Bestandteilen des Klebstoffs, seiner chemischen Struktur und den chemischen und physikalischen Wechselwirkungen entstanden in den letzten Jahren verschiedene Adhäsionstheorien (Abb.: 2.7). Alle diese Theorien sind aber nur unter bestimmten Voraussetzungen anwendbar. Meist werden mehrere Modelle benötigt, um das Verklebungsergebnis zu erklären²⁸. Infolgedessen werden die einzelnen Mechanismen im Abschnitt 2.5 differenziert betrachtet und beschrieben.

²⁷ vgl. LOHMANN, U. (2003), Seite 18

²⁸ vgl. DUNKY, M. / NIEMZ, P. (2002), Seite 615ff.

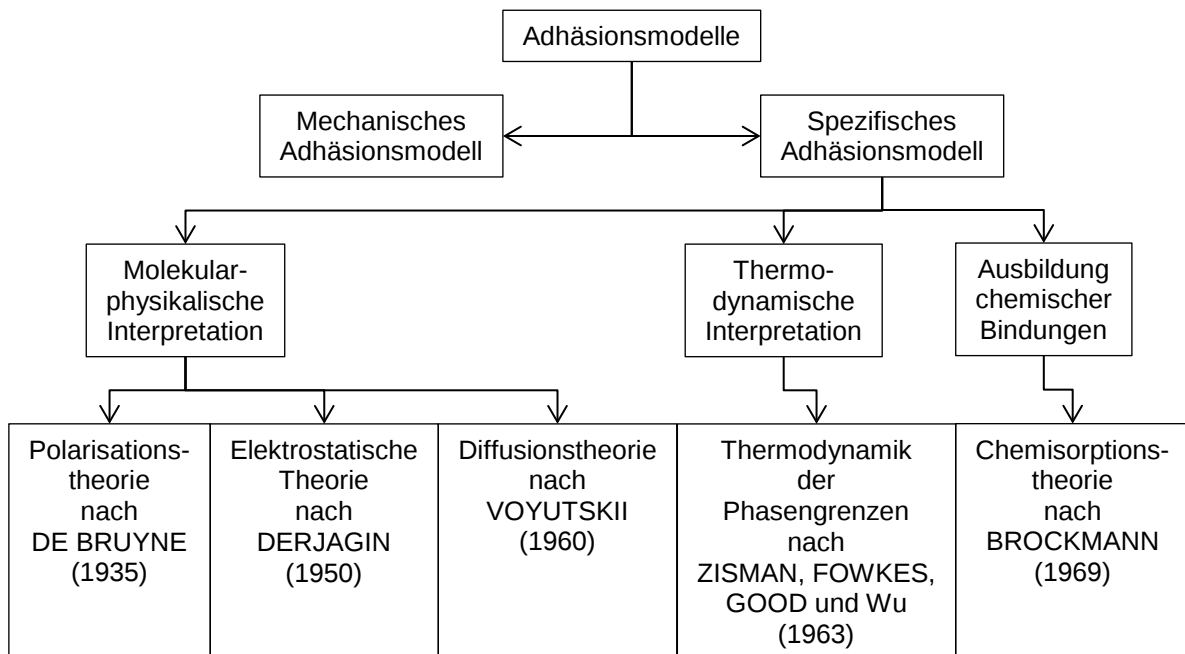


Abb.: 2.7 Adhäsionstheorien (Quelle: modifiziert nach BISCHOF, C./ POSSART, W. (1983), Seite 27)

2.5 Adhäsionstheorien

Die Wechselwirkungen in den Phasengrenzschichten der Adhäsion sind bereits seit dem 18. Jahrhundert Gegenstand der Forschung. Dabei verteilen sich die Untersuchungen auf einzelne Teilgebiete der Chemie, der Physik und der Werkstoffkunde. Deshalb entstanden mehrere theoretische Modelle um das Aneinanderhaften zweier Körper durch die Beschreibung der Phasengrenzen zu erklären²⁹.

STAVERMAN teilt die Moleküle in vier Gruppen. Er unterscheidet zwischen unpolaren Molekülen, negativ oder positiv geladenen Teilchen und polaren Stoffen³⁰. Die Polarisierungstheorie nach DE BRUYNE erklärt die Haftung durch die Anziehung verschiedenartig geladener Teilchen. Dabei lässt sich aber keine Beziehung zwischen der Polarität der Substanzen und der Güte der Verklebung erstellen. Des Weiteren eignet sich dieser Ansatz auch nicht, um die Klebeeigenschaften von Haftklebstoffen erklären³¹.

Die Elektrostatische Theorie wurde 1948 von DERJAGIN erstellt³². Nach dieser Theorie ist die Haftung des gehärteten Klebstoffs auf der Fügeteiloberfläche auf eine Potentialdifferenz zurückzuführen. Leider konnte dies bisher nur bei der Verklebung

²⁹ vgl. BISCHOF, C./ POSSART, W. (1983), Seite 9ff.

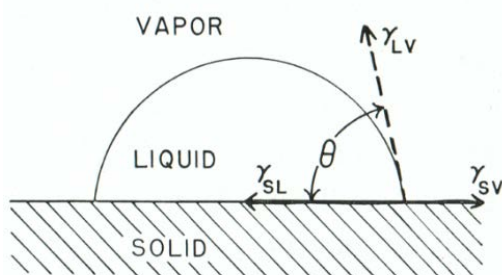
³⁰ vgl. DE BRUYNE, N. A./HOUWNIK, R. (1951), Seite 22 ff.

³¹ vgl. ZEPPENFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005), Seite 6f.

³² vgl. DERJAGIN, B. V./ KROTAOVA, N. A. (1978), Seite 24

von Metallen mit Elastomeren beobachtet werden³³. Der Nachweis für die Anwendung auf Verklebungen von Holz konnte bisher noch nicht erbracht werden. Das erste, bedingt auf Holzverklebungen anwendbare Modell ist die Diffusionstheorie nach VOYUTSKII. Hierbei wird vermutet, dass es zur Diffusion von Molekülen in die Zellwand kommt. Durch das gegenseitige Durchdringen von Klebstoff und Zellwand entsteht ein Mischbereich, der die Eigenschaftsunterschiede zwischen den beiden Materialien zu einem gewissen Mass ausgleicht, wodurch idealerweise die Grenze zwischen Holz und Klebstoff aufgelöst wird. Bei Holzverklebungen ist dies unter anderem zwischen Lignin und dem amorphen Klebstoffanteil denkbar. Jedoch kann dieser Platzwechselprozess bei dem kristallinen Teil der Zellulose ausgeschlossen werden³⁴.

Seit vielen Jahren ist bekannt, dass zwei glatte und ebene Flächen, die durch eine dünne Flüssigkeitsschicht getrennt sind, stark aneinander haften. Dieser Effekt beruht auf der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und der konkaven Flüssigkeit-Luft- Grenzschicht. Nach den thermodynamischen Betrachtungen von ZISMAN hat die Benetzbarkeit der Oberfläche einen wesentlichen Einfluss auf die Adhäsionskraft. Als Mass für die Benetzbarkeit benennt er den Winkel, der zwischen der festen Oberfläche, der Flüssigkeit und der Gasphase entsteht. Diesen Winkel bezeichnet YOUNG als Kontaktwinkel θ (Abb.: 2.8). Die Grösse des Kontaktwinkels hängt dabei von den Wechselwirkungen an den Grenzflächen der Stoffe ab. Er ergibt sich aus der Oberflächenspannung der Flüssigkeit (γ_{LV}), der Oberflächenenergie des Festkörpers (γ_{SV}) und der Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper (γ_{SL})³⁵.



CONTACT ANGLE

Abb.: 2.8 Kontaktwinkel nach YOUNG (Quelle: WEISS, P. (1962), Seite 177)

³³ vgl. ZEPPENFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005), Seite 7

³⁴ vgl. DUNKY, M. / NIEMZ, P. (2002), Seite 618f.

³⁵ vgl. WEISS, P. (1962), Seite 176ff.

SUMMER leitet aus dieser Beziehung die Gleichung zur Berechnung des Kontaktwinkels ab, indem er die von YOUNG genutzte Oberflächenspannung durch das thermodynamische Äquivalent der Oberflächenenergie ersetzt³⁶.

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cdot \cos \theta \quad (\text{Gleichung nach SUMMER}) \quad (1)$$

γ_{SV} Oberflächenenergie des Festkörpers

γ_{SL} Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper

γ_{LV} Oberflächenspannung der Flüssigkeit

θ Kontaktwinkel

Über ein halbes Jahrhundert später nutzt DUPRE diese Abhängigkeit um die Adhäsionsarbeit, W_A zu berechnen. Sie gibt an, wie viel Energie nötig ist, um die Flüssigkeit von der Oberfläche zu trennen³⁷.

$$W_A = \gamma_S + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (\text{DUPRE – Gleichung}) \quad (2)$$

W_A spezifische Adhäsionsarbeit

Dabei bezieht sich γ_S auf einen Feststoff im Vakuum. Für die Berechnung der Adhäsionsarbeit in einer beliebigen Dampfphase muss man γ_S durch γ_{SV} ersetzen und erhält:

$$W_{A'} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (3)$$

Setzt man jetzt Gleichung (1) in Gleichung (3) ein und eliminiert die Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper, so erhält man die Adhäsionsarbeit in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit.

$$W_{A'} = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta) \quad (4)$$

Überträgt man diese Beziehung auf die Grenzschicht, zweier identischer Flüssigkeiten, ergibt sich die Kohäsionsarbeit.

$$W_C = 2 \cdot \gamma_{LV} \quad (5)$$

³⁶ vgl. WEISS, P. (1962), Seite 179f.

³⁷ vgl. BANGHAM, D. H./ RAZOUK, R. I. (1937), Seite 1459

W_c Kohäsionsarbeit

BANGHAM und RAZOUK erkannten, dass man den Energieverlust durch die Absorption von Dampf in die feste Oberfläche nicht vernachlässigen kann und leiteten daher folgende Beziehung durch Einsetzen von Gleichung (1) in Gleichung (2) ab:

$$W_A = (\gamma_S - \gamma_{SV}) + \gamma_{LV} (1 + \cos \theta) \quad (6)$$

Dabei ist γ_{SV} das Mass für die Oberflächenenergie des Feststoffes beim Übergang in die gesättigte Dampfphase der Flüssigkeit. Ebenso ist $\gamma_S - \gamma_{SV}$ der Energieverlust durch den Übergang vom Feststoff in die gesättigte Dampfphase der Flüssigkeit. Die Energieänderung wird durch f_{SV} dargestellt.

$$f_{SV} = \gamma_S - \gamma_{SV} \quad (7)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (7) und (4) in Gleichung (6) erhält man schlussendlich die Abhängigkeit der Energieänderung von der Adhäsionsarbeit³⁸.

$$W_A - W_{A'} = f_{SV} \quad (8)$$

Voraussetzung für die Chemiesorptionstheorie ist das Vorhandensein von reaktiven Gruppen auf der Holzoberfläche sowie im Klebstoff. Durch diese Gruppen entsteht eine Reihe kovalenter Bindungen zwischen den Grenzschichten. Diese Bindungsart, entstanden aufgrund verschiedener Oxidationsvorgänge oder Polymerisationen, stellt die wasserbeständigste Verbindung der Fügepartner dar. Jedoch konnte sich die Wissenschaft bis heute noch nicht einigen, ob diese Art der Bindung beim Aushärten der Klebstoffuge überhaupt entsteht. Unter anderem gibt es verschiedene Quellen, die diese Art der Reaktion von Klebstoff und Fügeteil bei Klebstoffsystemen mit Isocyanaten bzw. bei der Reaktion mit Kondensationsharzen vermuten³⁹.

Die Theorie zur Verankerung des ausgehärteten Klebstoffs in Hohlräumen, Poren und Hinterschneidungen der Oberfläche (Abb.: 2.9) wird als mechanische Adhäsion bezeichnet.

³⁸ vgl. WEISS, P. (1962), Seite 179f.

³⁹ vgl. DUNKY, M. / NIEMZ, P. (2002), Seite 622ff.

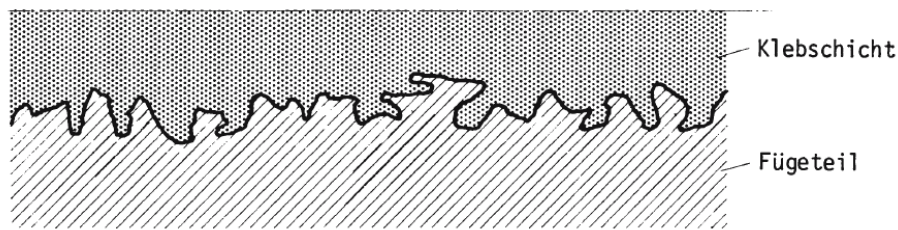


Abb.: 2.9 Mechanische Adhäsion (Quelle: HABENICHT, G. (2006), Seite 333)

Dabei kann die Festigkeit nur so hoch wie die Festigkeit der Klebstofffuge bzw. wie die Festigkeit der verschiedenen Oberflächenstrukturen sein. Dieses Modell findet vor allem Anwendungen bei dem Fügen von Werkstoffen mit porösen Oberflächen und ist somit gut auf die Verklebung von Holz anwendbar⁴⁰. Durch das Penetrieren von Klebstoff in die angeschnittenen Holzzellen bildet sich eine Grenzschicht, bei der unzweifelhaft eine mechanische Verankerung zur Verklebungsgüte beiträgt⁴¹.

2.6 Einfluss ausgewählter Holzeigenschaften auf die Verklebungsgüte

2.6.1 Faserrichtung

Holz ist ein anisotroper Werkstoff, der sich grundlegend von anderen Materialien unterscheidet. Seine Porosität sowie standortbedingte strukturelle Eigenheiten müssen berücksichtigt werden, wenn man Fügeteile aus Holz erfolgreich verkleben will⁴².

Zu berücksichtigen ist unter anderem der Faserwinkel. SWIETLICZNY⁴³ ermittelte, dass in Verklebungen der höchste Zugscherfestigkeitswert erreicht wird, wenn sowohl die Holzfasern als auch der Kraftangriff parallel zur Klebefuge ist.

SWIETLICZNY stellt folgende Abhängigkeiten fest: Wenn die Fasern der Fügeflächen einen Winkel bilden, so nimmt mit grösser werdender Abweichung von der parallelen Ausrichtung die Festigkeit ab. Dabei wird das Minimum bei orthogonalem Faserverlauf erreicht.

⁴⁰ vgl. HABENICHT, G. (2006), Seite 332f.

⁴¹ vgl. DUNKY, M. / NIEMZ, P. (2002), Seite 619f.

⁴² vgl. ZEPPEFELD, G. / GRUNWALD, D. (2005), Seite 34

⁴³ vgl. SWIETLICZNY, M. (1980), Seite 83ff.

2.6.2 Holzfeuchte

Die Zugfestigkeit von Holz hat bei einer Holzfeuchte von 5 % - 10 % ihr Maximum und fällt bis zum Fasersättigungsbereich ab⁴⁴. ZEPPENFELD bezeichnet den Einfluss der Holzfeuchte auf die Beständigkeit der Verklebung als besonders bedeutend⁴⁵.

Durch die Änderung der Holzfeuchte unterhalb des Fasersättigungsbereiches kommt es zu Volumen- und Geometrieänderungen im Holz. Aufgrund der Anisotropie des Holzes geschieht dies aber nicht gleichmässig⁴⁶. Durch diese unregelmässigen Formänderungen entstehen Spannungen im Holz, welche sich negativ auf die Festigkeit der Verklebung auswirken können.

Neben dem Einfluss der Holzfeuchte auf das Quellen und Schwinden muss im Speziellen in dieser Arbeit noch der Holzfeuchtegehalt und sein Einfluss auf 1 K PUR Klebstoffe betrachtet werden. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, hängt der Härungsmechanismus von 1 K PUR Systemen von der Umgebungsfeuchte und der Substratfeuchte ab. Untersuchungen von KÄGI/ NIEMZ und MANDALLAZ zeigen, dass für die Qualität der Klebstofffuge, je nach verwendetem Klebstoff, eine Mindestmenge an Holzfeuchte nötig ist, um den Reaktionsmechanismus zu ermöglichen. Dies führt im Winter oft zu Problemen bei der Härtung von 1K- PUR Klebstoffen, weil durch die geringeren Luftfeuchte die Mindestholzfeuchte von ca. 6%- 8% nicht erreicht wird⁴⁷.

2.6.3 Rohdichte

Umfassende Untersuchungen zum Einfluss der Holzdichte auf die Qualität von Verklebungen wurden bereits 1979 von CHOW durchgeführt. Aus den Ergebnissen seiner Untersuchungen lassen sich zwei grundlegende Abhängigkeiten ableiten: Mit steigender Rohdichte nimmt auch die Zugscherfestigkeit von Holz zu (Abb.: 2.10), jedoch steigt die Zugscherfestigkeit nur bis zu einer Rohdichte von $0,8 \text{ g/cm}^3$. Bei höheren Rohdichten fällt die Zugscherfestigkeit wieder ab. Auch der Holzbruch von Klebfugen zeigt bei einer Rohdichte von $0,8 \text{ g/cm}^3$ ein typisches Verhalten. Unterhalb dieser Rohdichte liegt der Holzbruchanteil im Bereich von 80% - 100%, bei höherer

⁴⁴ vgl. NIEMZ, P. (2003), Seite 156

⁴⁵ vgl. ZEPPENFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005), Seite 43

⁴⁶ vgl. WAGENFÜHR, R./ KÜHNEN, R. (2002), Seite 57ff.

⁴⁷ vgl. KÄGI, A./ NIEMZ, P./ MANDALLAZ, D. (2006), Seite 261ff.

Dichte ist jedoch ein starker Abfall des Holzbruchanteils zu verzeichnen⁴⁸. Aus den Ergebnissen von CHOW leitet ZEPPENFELD folgende Beziehungen ab: Entspricht die Festigkeit der Verklebung der Festigkeit des Holzes, so ist mit einem Holzbruchanteil von 50 % - 60 % zu rechnen. Übersteigt die Festigkeit des Klebstoffs die Festigkeit des Holzes um 20 % - 30 % wird sich ein Holzbruchanteil von 80 % - 100 % ergeben. Diese Abhängigkeiten bestehen, nachweislich, auch unter veränderten Umweltbedingungen (Wasserlagerung und Wechselklima). Demnach ist der Holzbruch ein Mass für die Qualität der Klebefuge⁴⁹, bzw. für die Qualität des Holzes.

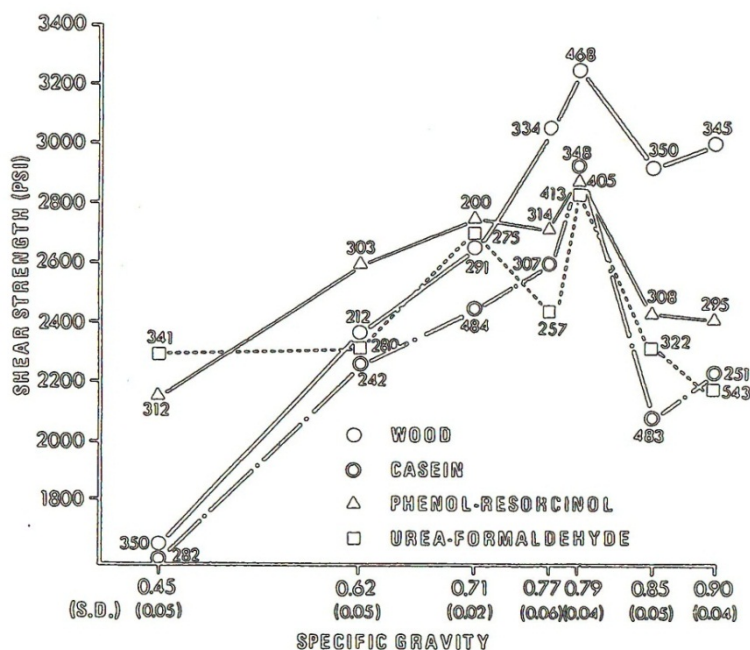


Abb.: 2.10 Einfluss der Rohdichte auf die Zugscherfestigkeit (Quelle: CHOW, S. (1979), Seite 128)

2.6.4 Chemische Bestandteile

Chemisch kann man Holz in Haupt- und Nebenbestandteile gliedern. Die Hauptbestandteile sind Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Bei den Nebenbestandteilen unterscheidet man primäre und sekundäre Holzinhaltsstoffe. Je nach Holzart und Standort variiert der Anteil der Hauptbestandteile, kann aber wie in Abb.: 2.11 dargestellt erwartet werden. Die chemische Bindung zwischen Klebstoff und Holz wird dabei überwiegend durch die Hydroxylgruppen der Holocellulose ermöglicht.

⁴⁸ vgl. CHOW, S.(1979), Seite 125ff.

⁴⁹ vgl. ZEPPENFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005), Seite 46ff.

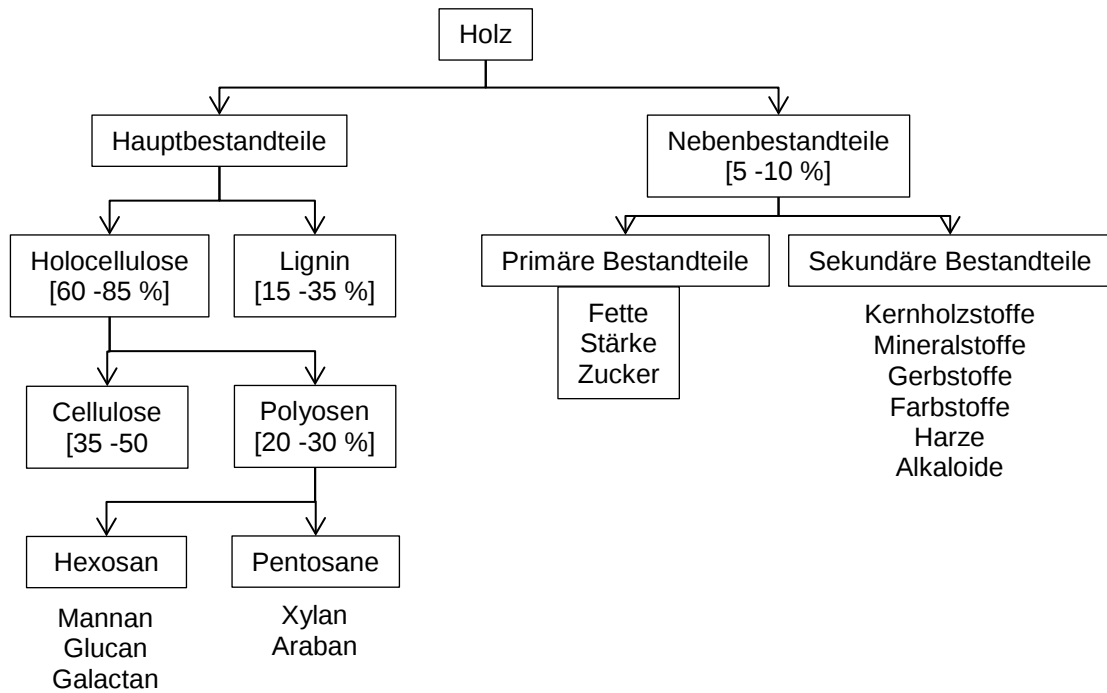


Abb.: 2.11 Chemische Bestandteile von Holz (Quelle: modifiziert nach WAGENFÜHR, R./ KÜHNEN, R. (2002), Seite 46)

Die Nebenbestandteile sind ebenfalls von der Holzart, dem Alter und dem Standort abhängig, müssen aber im Gegensatz zu den Hauptbestandteilen nicht immer alle vorhanden sein. Diese beeinflussen die Festigkeit der Klebstofffuge eher indirekt. Je nach reaktivem Charakter blockieren sie die chemisch aktiven Gruppen im Klebstoff bzw. zerstören bereits gebildete Bindungen. Diese Wechselwirkung kann die Kohäsions- und Adhäsionsvorgänge in einer Klebstofffuge beeinträchtigen.

3 Material und Methoden

3.1 Prüfkörperherstellung

Alle Prüfkörper wurden aus Rotbuche (*Fagus silvatica* L.) nach den Anweisungen der Norm DIN prEN 302-1 hergestellt. Alle Oberflächen wurde mit dem Dickenhobel der ETH Zürich bearbeitet. Vor der Verarbeitung wurden die Bretter mehrere Wochen im Normalklima bis zur Massenkonzanz konditioniert.

Je nach vorgesehener Vorbehandlung wurde der entsprechende Primer, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, appliziert. Sowohl Vorbehandlung, Klebstoffauftrag als auch Pressvorgang wurden bei einer Raumtemperatur von ca. 22°C durchgeführt. Durch die Lagerung der Primer und des Klebstoffs im selben Labor in dem die Verklebung erfolgte, ist davon auszugehen, dass auch diese eine Verarbeitungstemperatur von 22°C hatten. Alle weiteren Press- und Klebstoffparameter können der Anlage 1 entnommen werden.

3.2 Primer

Zur chemischen Vorbehandlung der Fügefläche wurden neun verschiedene Primer ausgewählt. Diese unterscheiden sich nicht nur in ihren chemischen Aufbau, sondern auch in der Art der Applikation.

Bei der ersten eingesetzten Gruppe handelt es sich um MDI - Primer der Firma BAYER. Für die Behandlung wurden die drei Primer Desmodur® VK10, VKS20 und VKS70 verwendet. Die Gemische aus Diphenylmethan-4,4'-diisocyanat und Isomeren sowie PMDI unterscheiden sich vorrangig in ihrer Viskosität und der Acidität. Nach Herstellerangaben sollen sich diese drei Polyisocyanatgemische zum Aufbau von PUR- Klebeverbindungen eignen⁵⁰.

Weiterhin wurden die Primer Bayhydur® 304 und 305 von BAYER auf ihren Einfluss auf die Klebstofffuge getestet. Diese aliphatischen Polyisocyanate, basierend auf Hexamethyldiisocyanat, sollen sich ebenfalls nach Herstellerangaben als Additiv für wässrige Klebstoffsysteme eignen⁵¹.

Klebstoffe folgen beim Eindringen in die Holzstruktur dem Weg des geringsten Widerstandes⁵². Deswegen wurde für die chemische Vorbehandlung nach

⁵⁰ vgl. Materialdatenblatt VK10 (2011), Seite 1f. ; Materialdatenblatt VKS20 (2011), Seite 1f. ; Materialdatenblatt VKS70 (2011), Seite 1f. ;

⁵¹ vgl. Materialdatenblatt B304 (2011), Seite 1; Materialdatenblatt B305 (2011), Seite 1

⁵² vgl. HASS, P. u.a. (2012), Seite 250f.

Substanzen gesucht, die es dem Klebstoff erleichtern besser bzw. tiefer in die Zellwand einzudringen und dadurch die Festigkeit der Klebefuge verbessern. LUCAS bezeichnet das Anquellen der Holzzellen als eine Grundvoraussetzung, um chemische Substanzen in die Holzstruktur einzubringen⁵³. Daher war es naheliegend, die Wirkung von geeigneten Quellmitteln zu testen. Durch die Untersuchungen von LUCAS konnte die ionische Flüssigkeit 1-Ethyl-3-methylimidazoliumacetat (EMIMAc) als solche identifiziert werden. Dieses fluide Salz bewirkt ein Anquellen der Holzstruktur und die gleichzeitige Auflösung von Wasserstoffbrücken, wodurch sich der Abstand der Polymerketten vergrößert. Durch diesen Effekt konnte LUCAS nanoskalige Gold- und Silberpartikel in die Holzstruktur einbringen⁵⁴. Um zu ergründen, ob dies auch für Klebstoffe anwendbar ist kommt die ionische Flüssigkeit EMIMAc der Firma Ionic Liquids Technologies GmbH zur Anwendung.

Bei der letzten Gruppe von Primern handelt es sich um organische Quellmittel, bei denen MANTANIS bereits 1994 nachwies, dass sie die Quellung von Buchenholz verstärken können⁵⁵. Für Dimethylsulfoxid (DMSO) und Dimethylformamid (DMF) wurde, die quellende Wirkung bereits 1973 von ASHTON beschrieben⁵⁶. 1991 wies MANTANIS diese Wirkung auch bei dem Lösungsmittel Dioxan nach⁵⁷.

Für die Anwendung wurden diese Substanzen von der Firma Sigma- Aldrich Chemie GmbH bezogen.

Alle genannten Primer wurden indirekt appliziert. Die Ausnahme stellt hier die Applikation von EMIMAc dar. Dieser wurde mit Hilfe einer Airbruschpistole aufgetragen. Von den anderen Primern wurden 4g möglichst homogen auf einer PVC - Folie verteilt. Um den Primer auf die Fügefläche zu bringen, wurden die entsprechenden Probekörper auf die Folie gelegt und durch leichten Druck konnte die Fügefläche benetzt werden. Die resultierende spezifische Auftragsmenge wurde über die Massendifferenz bestimmt und kann aus Anlage 1 entnommen werden. Wegen der chemischen Unverträglichkeit von DMF, DMSO und Dioxan mit der PVC - Folie wurde hier die Folie gegen eine Edelstahlplatte getauscht. An dem Auftragsverfahren wurde jedoch nichts geändert. Anschliessend wirkte der Primer entsprechend der vorgesehenen Trockenzeit auf die Holzoberfläche ein (siehe Anlage 1).

⁵³ vgl. LUCAS, M. u.a. (2010), Seite 2201

⁵⁴ vgl. ebenda, Seite 2198ff.

⁵⁵ vgl. MANTANIS, G.I./ YOUNG, R. A./ ROWELL, R. M. (1994), Seite 121

⁵⁶ vgl. ASHTON, H. E. (1973), Seite 159ff.

⁵⁷ vgl. MANTANIS, G.I./ YOUNG, R. A./ ROWELL, R. M. (1994), Seite 121

Zur eindeutigen Kennzeichnung der Proben werden die Vorbehandlungen wie in Tabelle 3.1 abgekürzt.

Tabelle 3.1 Abkürzung der Vorbehandlung

Primer	Einwirkdauer	Abkürzung
ohne	Keine	Kontrolle
Desmodur® VK10	30 Minuten	VK1030m
Desmodur® VK10	1 Tag	V101d
Desmodur® VKS20	30 Minuten	V2030m
Desmodur® VKS20	1 Tag	V201d
Desmodur® VKS70	30 Minuten	V7030m
Desmodur® VKS70	1 Tag	V701d
Bayhydur® 304	30 Minuten	B4
Bayhydur® 305	30 Minuten	B5
Dimethylsulfoxid	30 Minuten	DO
Dimethylformamid	30 Minuten	DF
Dioxan	30 Minuten	DN
1-Ethyl-3-methylimidazolium	30 Minuten	E

3.3 Klebstoff

Zur Verklebung der Fügeflächen wurde der PUR Reaktionsklebstoff PURBOND HB S309 der Firma Henkel AG & Co. KGaA eingesetzt. Alle physikalischen Eigenschaften sowie Verarbeitungs- und Lagerbedingungen dieses Klebstoffes können den Herstellerangaben entnommen werden⁵⁸.

Nach EN 14080, EN 386 und EN 385 ist Purbond HB S309 als Klebstoff für den tragenden Holzbau auf nationaler Ebene zugelassen. Der als Typ I klassifizierte Klebstoff wurde nach DIN EN 301 / DIN prEN 302, DIN 68141, EN 15425 / EN 15416, EN 14080 und Annex C geprüft⁵⁹.

3.4 Vorbehandlung nach DIN

Für die Erfassung der Zugscherfestigkeit werden in DIN prEN 302-1 fünf verschiedene Vorbehandlungen beschrieben⁶⁰. Von diesen Varianten wurden die Behandlungen A1, A4, A5 ausgewählt und durchgeführt. Bei den Lagerfolgen A1 und A5 wurde sich strikt an die Vorgaben der Norm gehalten. Um die Zeitspanne

⁵⁸ vgl. Holzleimbau Technik, (2011), Seite 1

⁵⁹ vgl. Zulassung Klebstoff (2011)

⁶⁰ vgl. DIN EN 13183, (2002), Seite 10

zwischen Wasserlagerung und Prüfung zu minimieren, wurde bei der Behandlung A4 von der Norm abgewichen. Die Proben wurden nicht wie vorgeschrieben bei einer Temperatur von $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ in das Wasserbad gegeben, sondern direkt in das kochende Wasser bei nahezu 100°C .

Die durchgeführten Vorbehandlungen sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 3.2 Behandlung vor der Zugscherprüfung (Quelle: modifiziert nach DIN prEN 302-1, (2011), Seite 10)

	Behandlung
A1	Konditionierung im Normalklima [20/65] bis zur Massenkonstanz
	Zugscherprüfung
A4	6 h in Wasser bei 100°C lagern
	2 h in Wasser bei $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ lagern
	Prüfung im feuchten Zustand
A5	Wasserlagerung bei $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
	nach maximal 15 Minuten Wasser auf 100°C erhitzt
	6 h bei 100°C Wassertemperatur lagern
	2 h in Wasser bei $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ lagern
	Konditionierung im Normalklima [20/65]
	Prüfung nach Erreichen der Ausgangsmasse (+2%; -1%)

3.5 Prüfungen

3.5.1 Holzfeuchte

Der prozentuale Anteil an freien und gebundenen Wasser im Verhältnis zum wasserfreien Holz wird als Holzfeuchte ω definiert. Nach DIN EN 13183 berechnet sich dieser wie folgt⁶¹.

$$\omega = [(m_1 - m_0) / m_0] \cdot 100\% \quad (9)$$

ω Holzfeuchte [%]

m_1 Masse der Holzprobe vor dem Trocknen [g]

m_0 Masse des darrtrockenen Holz [g]

Zur Bestimmung der Holzfeuchte können verschiedene Messverfahren verwendet werden, unter anderen Titration, elektrische Widerstandsmessung oder das

⁶¹ vgl. DIN EN 13183, (2002), Seite 4

Mikrowellenverfahren. Die Holzfeuchte wurde mittels der Darmmethode⁶² bestimmt und ergibt sich nach Gleichung (9).

3.5.2 Rohdichte

Die Rohdichte von Holz ist als Quotient aus Masse und Volumen definiert⁶³. Diese ist abhängig von der Holzfeuchte, sodass der Quotient aus Messwerten berechnet werden muss die bei gleiche Holzfeuchte aufgenommen wurden.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (10)$$

ρ Rohdichte [kg/m³]

m Masse der Probe [kg]

V Volumen der Probe [m³]

Zur Berechnung der Rohdichte der Prüfkörper wurden von 90 Proben die Masse und das Volumen bestimmt (vgl. Anlage 3), wobei die Nut in den Prüfkörpern bei der Volumenbestimmung berücksichtigt wurde.

3.5.3 Jahrringwinkel

Zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit setzt die DIN prEN 302-1 einen Jahrringwinkel zwischen 30° und 90° voraus⁶⁴. Dieser wurde mit Hilfe der Software analySIS work der Firma Olympus Soft Imaging Solutions GmbH ermittelt. Dafür wurden über die Jahrringe und Klebefugen, der digitalen Fotografien der Hirnholzflächen, virtuelle Linien gezeichnet (Abb.: 3.1).

⁶² vgl. WAGENFÜHR, A./ SCHOLZ, F. (2012), Seite 84

⁶³ vgl. LANGENDORF, G./ SCHUSTER, E./ WAGENFÜHR, R. (1990), Seite 71f.

⁶⁴ vgl. DIN prEN 302-1, (2011), Seite 6



Abb.: 3.1 Beispiel für die Jahrringwinkelbestimmung

Durch diese Hilfslinien kann die Software den Winkel bestimmen. Zur statistischen Sicherheit wurde der Jahrringwinkel an 65 Stichproben bestimmt (Anlage 4).

3.5.4 Zugscherfestigkeit

Die Ermittlung der Bruchkraft erfolgte mit einer Prüfmaschine der Firma Zwick/ Roell (Abb.: 3.2). Bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit der Traverse wurde mit Hilfe der Kraftmessdose die maximal aufgebrachte Kraft bis zum Bruch des Prüfkörpers aufgezeichnet. Als Bruchkriterium wurde ein Kraftabfall von 30% definiert. Der Kraftverlauf wird dazu über die Kraftmessdose, welche an der oberen Spannzange montiert ist, aufgezeichnet. Zur Auswertung wurden Kraft, Traversenweg und Prüfzeit direkt in die mitgelieferte Software testXpert II eingelesen. Damit der Bruch, wie in DIN prEN 302-1: 2011 gefordert zwischen 30 und 90 Sekunden eintrat, wurde eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,8mm/min gewählt.

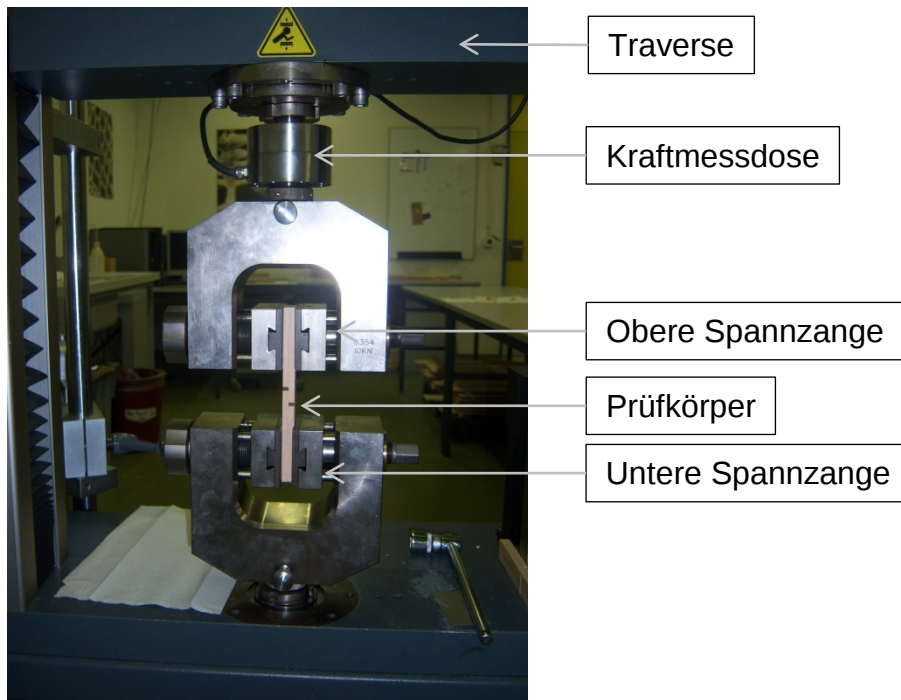


Abb.: 3.2 Zugscherprüfmaschine

Nach NIEMZ⁶⁵ und DIN EN 302- 2 ist die Zugscherfestigkeit als Quotient aus Bruchkraft und Scherfläche definiert (Gleichung 11).

$$\text{Zugscherfestigkeit} = \text{Bruchkraft} / \text{Scherfläche} [\text{N/mm}^2] \quad (11)$$

3.5.5 Holzbruchanteil

Nach erfolgter Zugscherprüfung fordert die DIN prEN 302-1 die visuelle Schätzung des prozentualen Holzaustrisses⁶⁶.

Hierzu wurden die zusammengehörigen Prüfkörper nach dem Zugscherversuch paarweise angeordnet und eine Sichtprüfung durchgeführt. Um eine höhere Objektivität zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse der Holzbruchbeurteilung (Anlage 5) zur Bestätigung mehreren Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Holzphysik vorgelegt und deren Einschätzungen mit derjenigen des Verfassers verglichen. Die hohe Übereinstimmung bestätigt die erfassten Daten, die somit als hinreichend genau angesehen werden können.

⁶⁵ vgl. NIEMZ, P. (1993), Seite 162

⁶⁶ vgl. DIN prEN 302-1, (2011), Seite 10

4 Darstellung der Ergebnisse

4.1 Rohdichte, Jahrringwinkel und Holzfeuchte

Um zu überprüfen, ob die Forderungen der Norm erfüllt wurden, wurden Rohdichte, Jahrringwinkel und Holzfeuchte, wie unter 3.5 beschrieben, bestimmt.

Die Rohdichte der Proben liegt zwischen 618 kg/m^3 und 703 kg/m^3 . Aus den Werten in Anlage 3 ergibt sich eine mittlere Dichte von 654 kg/m^3 . Somit liegt die Rohdichte der Proben teilweise unter dem geforderten Bereich von $700 \text{ kg/m}^3 \pm 50 \text{ kg/m}^3$. Diese Tatsache sollte bei der späteren Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden, da wie unter 2.6.3 beschrieben, eine enge Wechselwirkung zwischen Festigkeit und Rohdichte besteht. Der Test auf Normalverteilung wurde mittels der Software originPro 8.5 durchgeführt. Da weder der Shapiro Wilks Test noch der Ausreissertest Auffälligkeiten zeigten, kann die Stichprobe als repräsentativ für alle Proben angesehen werden.

Die Ermittlung des Jahrringwinkels mit Hilfe der Software analySIS work ergab einen mittleren Winkel von 66° . Der grösste Jahrringwinkel betrug dabei 89° und der geringste 31° . Somit sind die Forderungen der Norm erfüllt. Die Werte der Stichprobe sowie alle statistisch relevanten Grössen können Anlage 4 entnommen werden.

Die Darrproben der Prüfkörper ergaben zum Zeitpunkt der Zugscherversuche für die Gruppe A1 eine mittlere Feuchte von 14.4 %. Bei der Gruppe A4 wurde eine mittlere Holzfeuchte von 123,7 % ermittelt. Der höchste Wert lag dabei bei 135,2 % und das Minimum bei 110.1 %. Die Auswertung der Holzfeuchte in Folge von Vorbehandlung A5 ergibt eine mittlere Holzfeuchte von 14.6 %. Alle den Berechnungen zugrunde liegenden Werte können Anlage 2, Anlage 6 und Anlage 7 entnommen werden.

4.2 Zugscherfestigkeit

Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Zugscherfestigkeit durch die verschiedenen chemischen Vorbehandlungen und die Lagerfolgen deutlich beeinflusst wird (siehe Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1 Zusammenstellung der gemessenen Zugscherfestigkeiten

Primer	Zugscherfestigkeit in N/mm ²					
	Lagerfolge A1		Lagerfolge A4		Lagerfolge A5	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Kontrolle	12.77	1.07	6.25	1.20	12.62	0.57
VK1030m	11.89	0.81	6.99	1.01	11.74	1.48
V101d	13.23	0.84	7.49	1.20	11.62	1.73
V2030m	12.45	0.91	7.36	0.71	12.24	0.90
V201d	12.07	1.32	7.69	0.80	12.49	1.07
V7030m	10.44	1.50	7.48	0.95	10.67	0.53
V701d	11.35	1.04	6.84	0.78	11.70	0.86
B4	12.32	0.75	7.09	0.98	12.77	1.65
B5	12.54	1.49	7.09	0.62	13.06	1.43
DO	9.40	1.35	5.65	0.79	10.91	2.39
DF	14.24	1.22	7.71	1.25	12.99	1.22
DN	13.10	0.74	5.98	1.36	11.50	1.30
E	4.77	1.29	3.28	0.52	3.73	1.92

Erheblich ist der Festigkeitsverlust nach der Behandlung mit EMIMAc bei allen drei Lagerfolgen im Vergleich zur Kontrollgruppe. Bei der Lagerfolge A1 ist ein Festigkeitsverlust von 63 % zu verzeichnen, nach Lagerfolge A4 verringert sich die Zugscherfestigkeit um 31 % und nach der Lagerfolge A5 sogar um 70 %. Somit kann diese chemische Vorbehandlung nach keiner Lagerfolge die Mindestwerte der Zugscherfestigkeit erfüllen⁶⁷. Konstant schlechtere Werte als in der Kontrollgruppe sind auch bei der Behandlung mit DMSO erkennbar.

Positive Tendenzen zeigte die Vorbehandlung mit DMF. Hierbei war bei der Lagerfolge A1 eine Verbesserung der Festigkeit von 12 %, nach Lagerfolge A4 von 23 % und nach Lagerfolge A5 von 3 % zu verzeichnen. Ein günstiger Einfluss auf die Festigkeit infolge Lagerfolge A4 wird auch bei allen Primern der Produktgruppe Desmodur[®] erkennbar. Sie führten zu einer Steigerung um 9 % bis 23 %.

⁶⁷ vgl. DIN prEN 301 (2011), Seite 9

Die Gegenüberstellung der Lagerfolgen zeigt eine deutliche Abnahme der Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4 (vgl. Abb.: 4.1). Hierbei verringert sich die Festigkeit um 28 % bis 51 %.

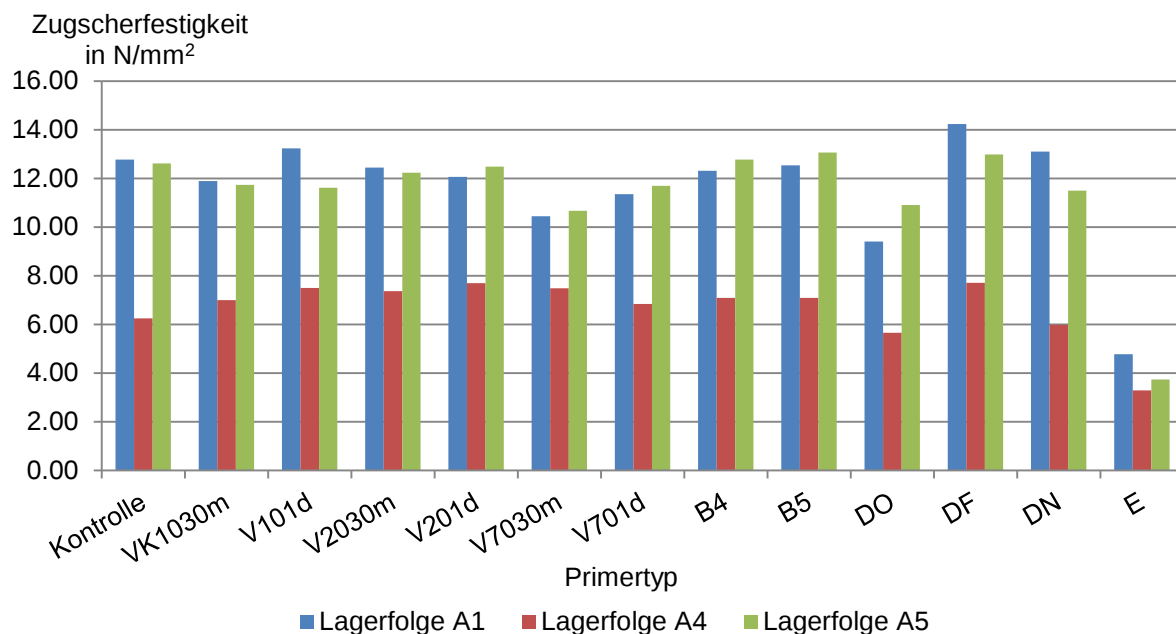


Abb.: 4.1 mittlere Zugscherfestigkeit aller Lagerfolgen

Gegensätzliche Aussagen ergeben sich nach Lagerfolge A5. Hier zeigen einige Varianten geringere Zugscherfestigkeiten als nach Lagerfolge A1, andere hingegen zeigen erhöhte Festigkeiten. Auffällig ist die Steigerung bei der insgesamt eher schlecht abscheidenden Vorbehandlung mit DO. Hier steigt die Zugscherfestigkeit um 16 % im Vergleich zur Lagerfolge A1 (Abb.: 4.2).

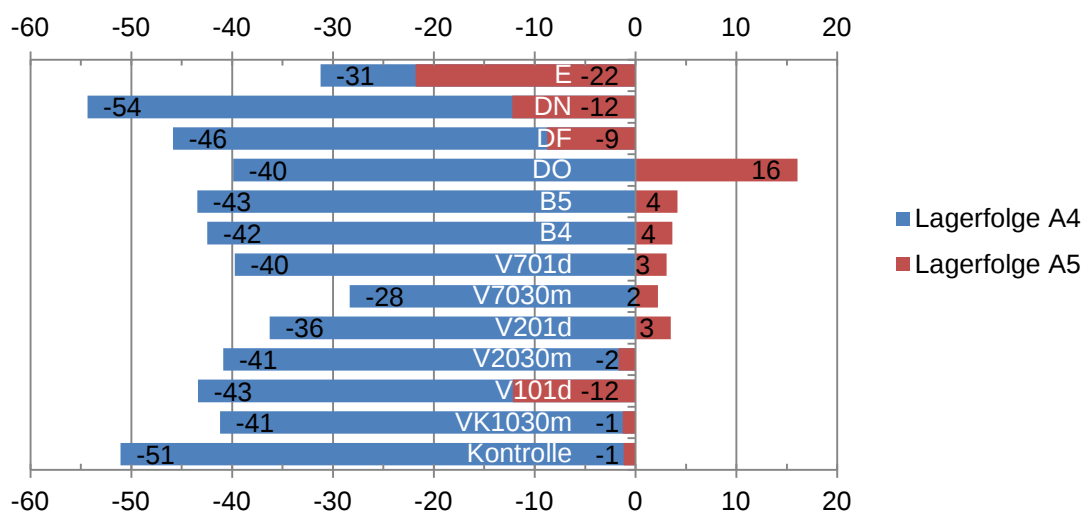


Abb.: 4.2 Prozentuale Änderung der Zugscherfestigkeit

4.3 Holzbruch

Die Schätzung des Holzbruches ergab ähnlich grosse Unterschiede zwischen den Varianten wie bei der Zugscherfestigkeit. Die Mittelwerte nach Lagerfolge A1 wiesen eine Streuung zwischen 0 % und 90 % auf. Den grössten Holzbruchanteil erreichten, mit 90 %, die Proben nach Vorbehandlung mit DMF. Weitere Verbesserungen des Holzbruches gegenüber der Kontrollgruppe wurden bei der Primerbehandlung V101d (mit 70 % Holzbruch), V7030m (mit 60 % Holzbruch) und V701d (mit 60 % Holzbruch) festgestellt. Die Behandlung mit EMIMAc verursachte alleiniges Versagen in der Klebstoffuge (0% Holzbruch). Mit 20 % Holzausriss hatten die Primer DMF und die Vorbehandlung VK1030m ebenfalls negative Auswirkungen.

Ein weitaus geringerer Holzbruchanteil ist nach Lagerfolge A4 zu verzeichnen.

Mit 50 % konnte der höchste Anteil bei den Proben der Gruppe V2030m und V701d festgestellt werden. Mit einem Holzausriss von 40 % erreichten die Proben nach der Behandlung mit DMF den dritthöchsten Wert. Die meisten anderen Varianten, auch die Kontrollgruppe, zeigten 0% Holzbruch.

Nach der Rücktrocknung der Proben infolge Lagerfolge A5 erhöhte sich der Holzausriss wieder. Positiv fielen die Ergebnisse bei V201d sowie dem Primer DMF mit jeweils 70 % aus. Hingegen konnte bei der EMIMAc Gruppe wiederum kein Holzausriss festgestellt werden.

Bei der Gegenüberstellung der Messergebnisse infolge der drei Lagerfolgen (vgl. Abb.: 4.3) zeigen die Vorbehandlungen V201d, V701d und DF konstant hohe Werte. Sowohl die Kontrollgruppe als auch V201d weisen nach Rücktrocknung 10 % mehr Holzausriss gegenüber Lagerfolge A1 auf.

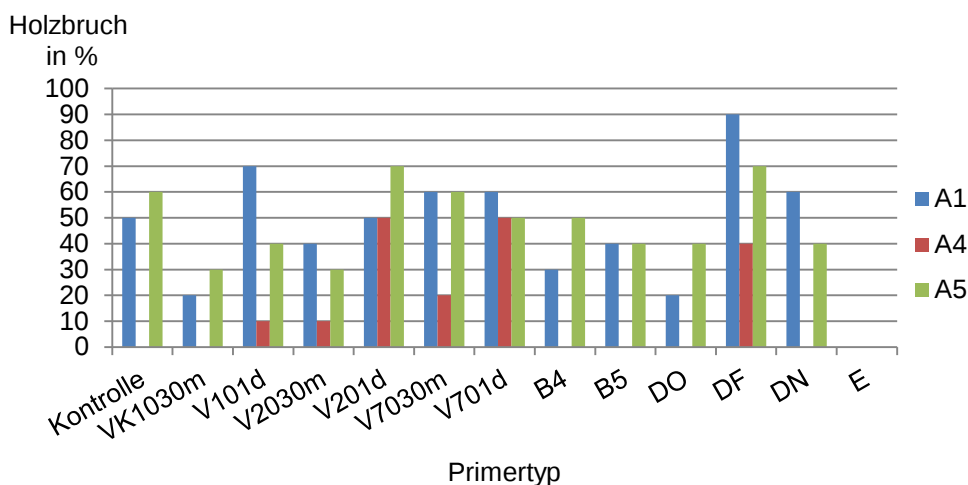


Abb.: 4.3 Holzbruch Übersicht aller drei Lagerfolgen

Alle Daten, die für die grafischen Darstellungen in diesen Abschnitt genutzt wurden, können aus Anlage 2, Anlage 6 und Anlage 7 entnommen werden.

Als Referenz für den visuell eingeschätzten Holzausriss sind in Abb.: 4.4 repräsentative Bruchbilder mit den geschätzten Werten für die Berechnung des mittleren Holzbruchanteil dargestellt.



Abb.: 4.4 Visuelle Einschätzung des Holzausriss

5 Diskussion

Wie in Abschnitt 2.6 beschrieben haben die Holzfeuchte und die Rohdichte der Probekörper einen Einfluss auf die Festigkeit der Fügeteile und des verklebten Materialverbundes. Auch die Auswirkung des Jahrringwinkels wurde bereits ausgiebig von HASS u.a.⁶⁸ untersucht und diskutiert. Durch die Konditionierung der Prüfkörper und die Durchmischung vor den Versuchen kann deren Einfluss für alle Prüfergebnisse als annähernd gleich angesehen werden. Deshalb soll deren Einfluss auf die Klebstoffuge in diesem Abschnitt nicht weiter diskutiert werden. Die Darstellung in Abschnitt 4 soll lediglich der Überprüfung der von der Norm geforderten Werte dienen.

Bei allen drei Lagerfolgen konnten erhebliche Unterschiede bei der Zugscherfestigkeit festgestellt werden. Im Vergleich mit der Mindestzugscherfestigkeit der Norm erreichen bereits einige Varianten nicht die geforderten Grenzwerte (vgl. Abb.: 5.1).

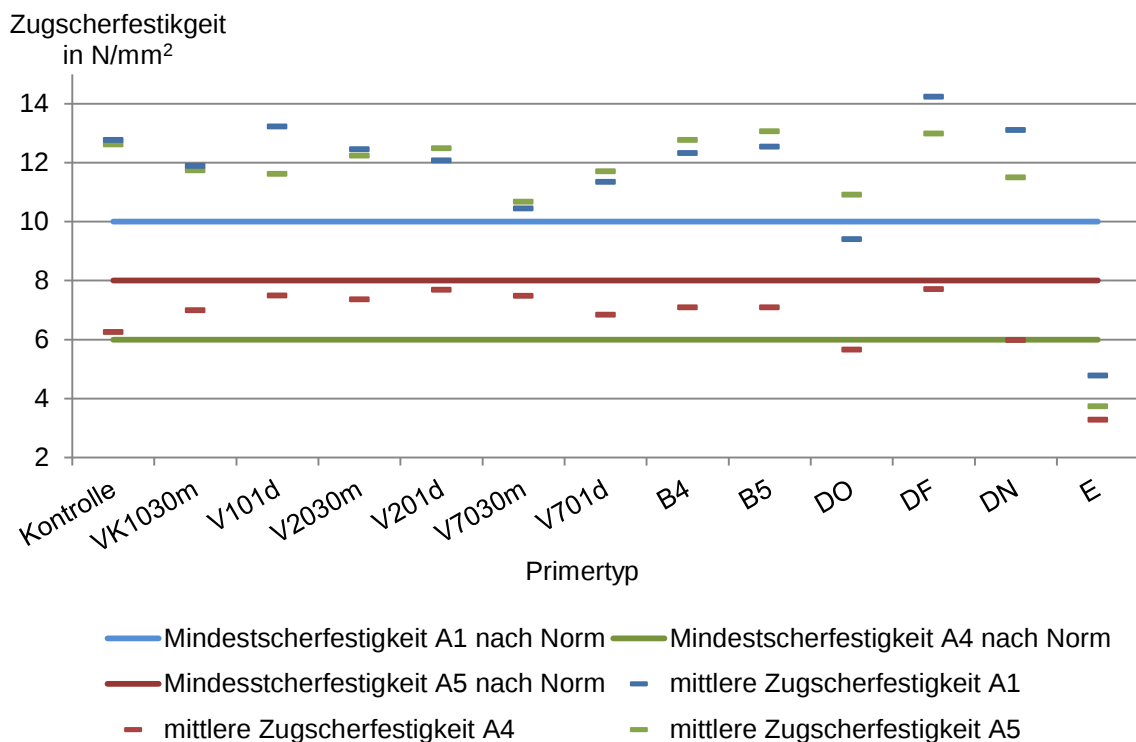


Abb.: 5.1 Vergleich zwischen mittlerer Zugscherfestigkeit und Forderung der Norm

Alle mit EMIMAc behandelten Varianten erfüllen die Mindestanforderungen der DIN prEN 301 nicht. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die reaktiven Isocyanatgruppen des Klebstoffs mit der Acetatverbindung des Primers reagieren. Diese ungewollte Reaktion beeinträchtigt sowohl die Adhäsion als auch die Kohäsion in der Fuge. Die

⁶⁸ vgl. HASS, P. u.a. (2012), Seite 250f.

visuelle Begutachtung der Bruchstellen bei allen drei Lagerfolgen zeigt ein auffallend abweichendes Bruchbild von allen anderen Prüfkörpern (Abb.: 5.2). Nach Lagerfolge A1 ist die Fügefläche gelb-grün verfärbt. Die Bruchflächen von Lagerfolge A4 und A5 weisen untypische Klebstoffrückstände auf.



Abb.: 5.2 Bruchbild der Lagerfolgen nach EMIMAc Behandlung

Um den Einfluss der chemischen Vorbehandlung auf die Festigkeit zu vergleichen, spielt der Grenzwert der Norm DIN EN 301, von 10 N/mm² für Lagerfolge A1, von 6 N/mm² für Lagerfolge A4 und von 8 N/mm² für Lagerungsfolge A5⁶⁹, nur eine untergeordnete Rolle. Wichtiger ist hierbei der Vergleich mit der unbehandelten Kontrollgruppe.

Auffällig bei der Lagerfolge A1 ist der überwiegend negative Einfluss der Primer auf die Zugscherfestigkeit (Abb.: 5.3).

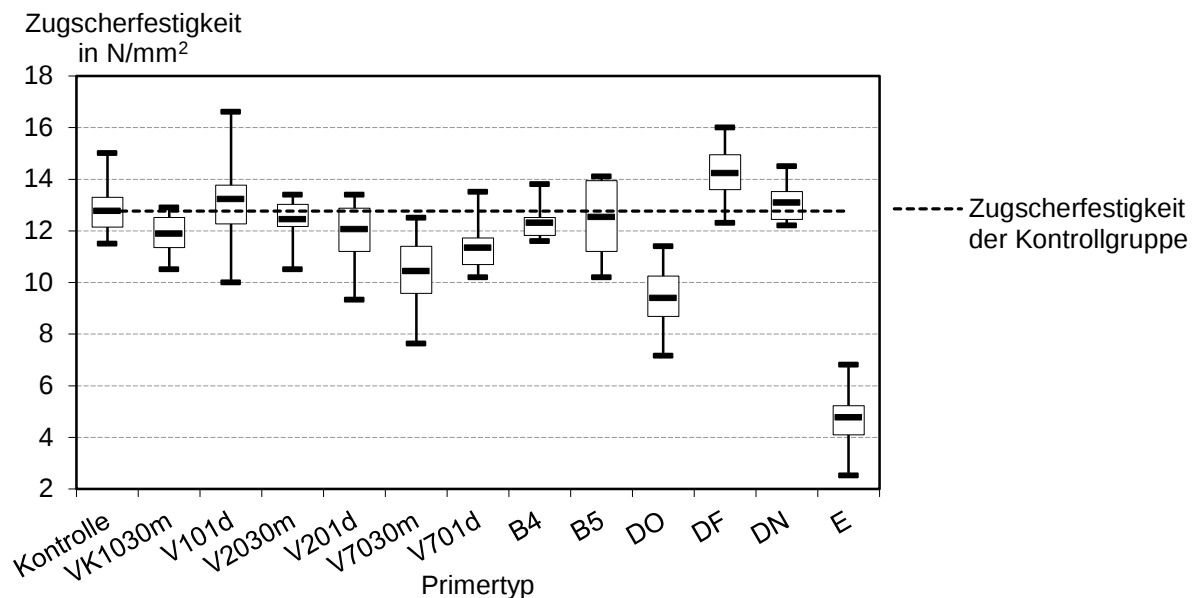


Abb.: 5.3 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A1

⁶⁹ vgl. DIN EN 301 (2011), Seite 9

Mit einer Erhöhung um $1,47 \text{ N/mm}^2$, was einer Verbesserung von 12% entspricht, konnte die stärkste Verbesserung der Zugscherfestigkeit bei der Vorbehandlung mit DMF beobachtet werden. Alle anderen Vorbehandlungen zeigen entweder einen sehr geringen bzw. negativen Einfluss. Für die Ursachenermittlung ist es notwendig, den geschätzten Holzaustriss in die Diskussion mit einzubeziehen.

Hier werden grössere Unterschiede deutlich. In Abb.: 5.4 ist die prozentuale Änderung des Holzbruchs im Vergleich mit der Kontrollgruppe dargestellt.

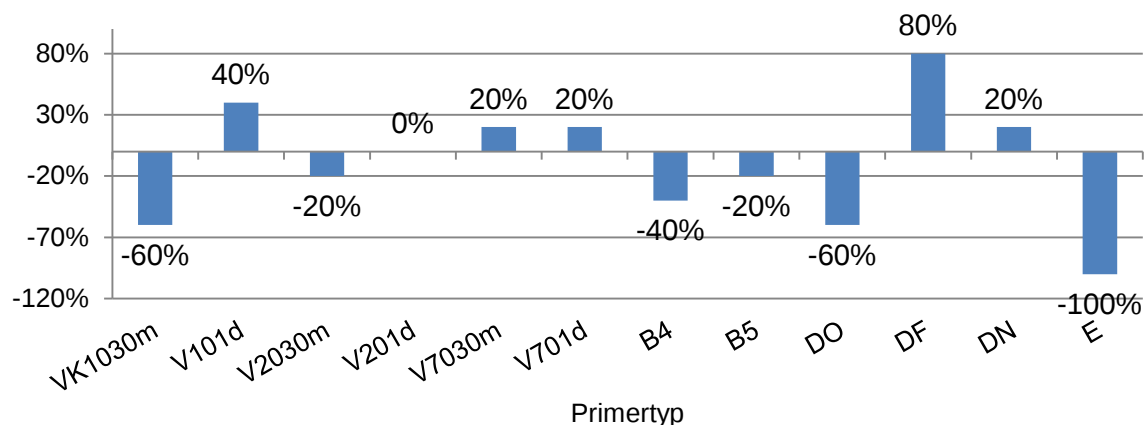


Abb.: 5.4 Relative Änderung des Holzbruchanteils nach Lagerfolge A1 im Vergleich mit der Kontrollgruppe

Ersichtlich wird dabei, dass bei den Proben, bei denen ein Anstieg der Zugscherfestigkeit vorliegt, auch der Holzbruchanteil über dem der Kontrollgruppe liegt. Dadurch liegt der Verdacht nahe, dass dieser Primer sich, wie von ELSTERMANN⁷⁰ Hypothese beschrieben, ähnlich dem HMR-Primer verhält: Durch die Benetzung der Oberfläche mit der chemischen Substanz bilden sich kovalente Bindungen zwischen Primer und Holzoberfläche. Diese chemischen Bindungen erhöhen die Anzahl an Hydroxyl-Gruppen der Fügeiteiloberfläche, wodurch stärkere Adhäsionskräfte zwischen Klebstoff und Fügeiteil entstehen.

Ebenso ist eine erhöhte mechanische Adhäsion durch die verbesserte Penetration des Holzes mit Klebstoff denkbar. Durch die chemische Behandlung wird ein Anquellen der Holzzellen bewirkt, welches es dem Klebstoff ermöglicht besser in die Zellhohlräume sowie in die Zellwände einzudringen. Dabei ist nicht die Eindringtiefe des Klebstoffsystems entscheidend, sondern die Sättigung des zugänglichen Raums⁷¹.

Weiterhin verstärkt wird der Verdacht einer chemischen Reaktion zwischen Holz und Primer bei der Betrachtung der Ergebnisse der Versuchsreihe V70. Nach beiden

⁷⁰ vgl. ELSTERMANN, F. (2011), Seite 27

⁷¹ vgl. HASS, P. (2012), Seite 250ff.

Einwirkzeiten des Primers kann eine geringere Festigkeit beobachtet werden, jedoch erhöht sich der Holzausriss um 20%. Der Primer reagiert hier nicht ausschliesslich mit den freien reaktiven Gruppen des Substrats, er spaltet gleichzeitig auch Bindungen im Substrat selbst und führt damit zum Aufschluss der Holzstruktur. Diese Schwächung führt bei der Zugscherprüfung zum Versagen der Holzsubstanz, was sich im erhöhten Holzausriss zeigt.

Nach der Lagerfolge A4 zeigten alle Versuchsgruppen eine erhebliche Abnahme der Zugscherfestigkeit im Vergleich zur Lagerfolge A1. Es ist eine Minderung um 30% bis 50% im Vergleich zur Lagerfolge A1 zu verzeichnen (vgl. Abb.: 5.5).

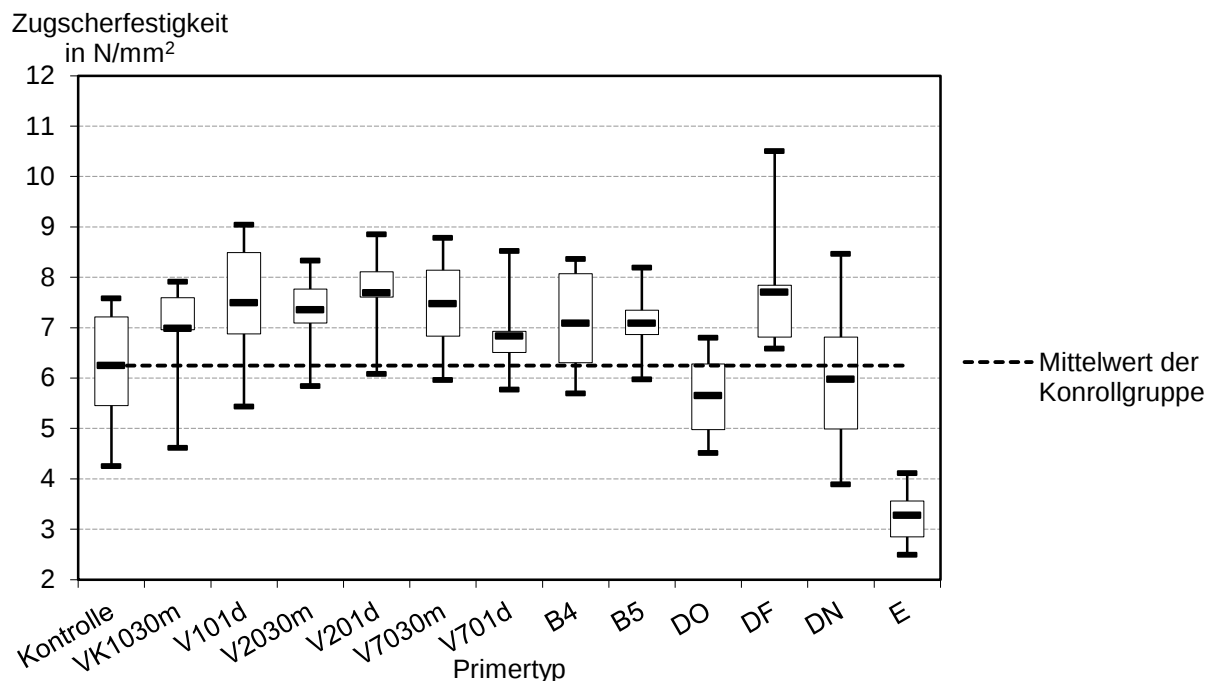


Abb.: 5.5 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4

Diese Ergebnisse decken sich mit den Beobachtungen von GANTENBEIN⁷² und ELSTERMANN⁷³. Die Erklärung der starken Festigkeitsminderung sind im Holz, im Klebstoff sowie in deren Grenzschicht zu suchen. Grundlegend ist die Abnahme der Festigkeit mit der Erhöhung der Holzfeuchte zu erklären (vgl. 2.6.2). Durch die Wasserlagerung der Prüfkörper kommt es zu einer starken Quellung, welche hohe Spannungen in die Klebfuge induziert. Dies allein kann unter Umständen schon zum Versagen der Klebeverbindung führen⁷⁴. In jedem Fall findet jedoch stets eine Überlagerung der durch das Quell- und Schwindverhalten erzeugten Eigenspannungen mit der aufgetragenen Spannung der Scherversuche statt⁷⁵.

⁷² vgl. GANTENBEIN, S. (2011), Seite 25

⁷³ vgl. ELSTERMANN, F. (2011), Seite 47

⁷⁴ vgl. FIHRAT, C. R. (2009), Seite 604

⁷⁵ vgl. NIEMZ, P./ ALLENSPACH, K. (2009), Seite 298f.

Eine weitere Ursache ist in der Wasserlagerung an sich zu finden. Durch die hohe Elektronegativität der Wassermoleküle werden Wasserstoffbrücken im Holz aber auch im Klebstoff aufgebrochen. Diese Dezimierung der Bindungen führt zu einer zusätzlichen Verringerung der Zugscherfestigkeit.

Ein Einfluss der Temperaturerhöhung durch die entsprechende Lagerfolge ist hingegen auszuschliessen. Versuche von NIEMZ zeigen zwar einen Festigkeitsabfall bei Temperaturerhöhung, jedoch stabilisiert sich der Prozess ab einer Temperatur von ca. 80°C wieder⁷⁶. Auch GANTENBEIN konnte keinen Temperatureinfluss bei dem Vergleich von Lagerfolge A2⁷⁷ (vier Tage Wasserlagerung bei 20°C) und A4 feststellen⁷⁸.

Im Vergleich mit der Kontrollgruppe zeigt sich eine starke Verbesserung der Zugscherfestigkeit (Abb.: 5.6), ausser bei der Behandlung mit DMSO und EMIMAc.

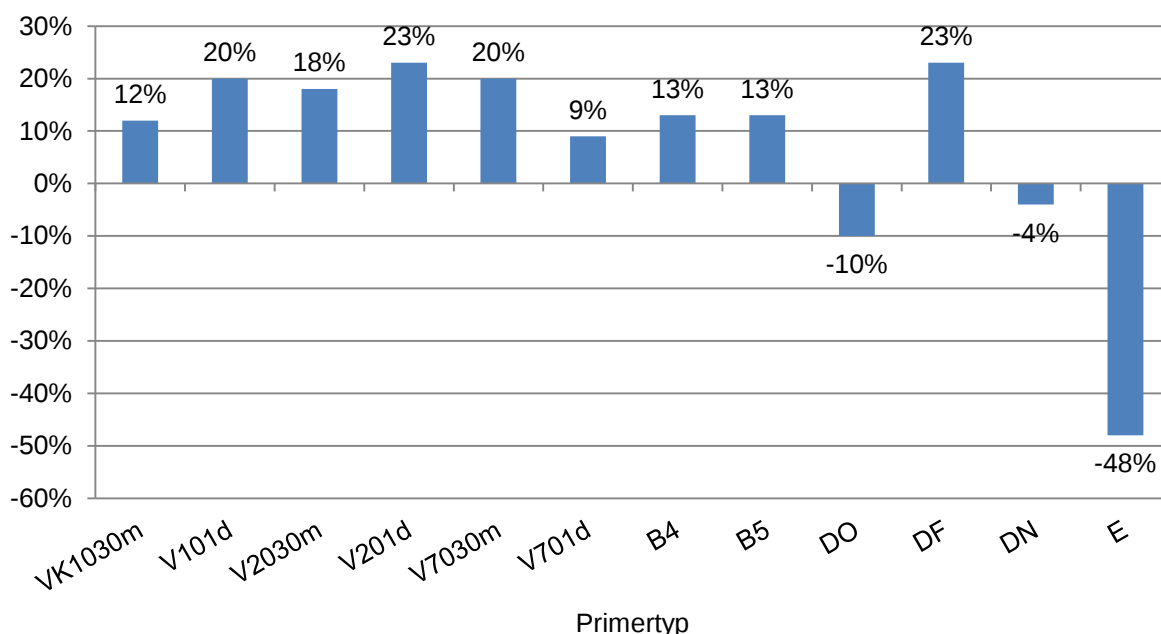


Abb.: 5.6 Prozentuale Änderung der Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4

Alle Primer der Produktgruppe Desmodur®, Bayhydur® und der Primer DMF erhöhten die Zugscherfestigkeit bei der Prüfung im nassen Zustand.

Somit erhärtet sich der Verdacht, dass durch die Primer eine Erhöhung der kovalenten Bindungen zwischen Holz und Klebstoff stattfindet. Sollte dies zutreffen muss sich das auch positiv auf den Anteil an Holzaustriss auswirken. Dazu wurde die prozentuale Änderung von Holzbruch und Zugscherfestigkeit in Abb.: 5.7 gegenübergestellt. Die Proben mit der Änderung der Zugscherfestigkeit zeigen auch

⁷⁶ vgl. vgl. NIEMZ, P./ ALLENSPACH, K. (2009), Seite 301

⁷⁷ vgl. DIN prEN 302-1 (2011), Seite 10

⁷⁸ vgl. GANTENBEIN, S. (2011), Seite 24

einen deutlichen Anstieg des Holzausrisses. Somit erhärtet sich die Vermutung der Zunahme an Hydroxylgruppen sowie der besseren Penetration des Holzes mit Klebstoff. Dabei zeigten sich die grössten Verbesserungen bei der Behandlung mit DMF, V201d und V701d.

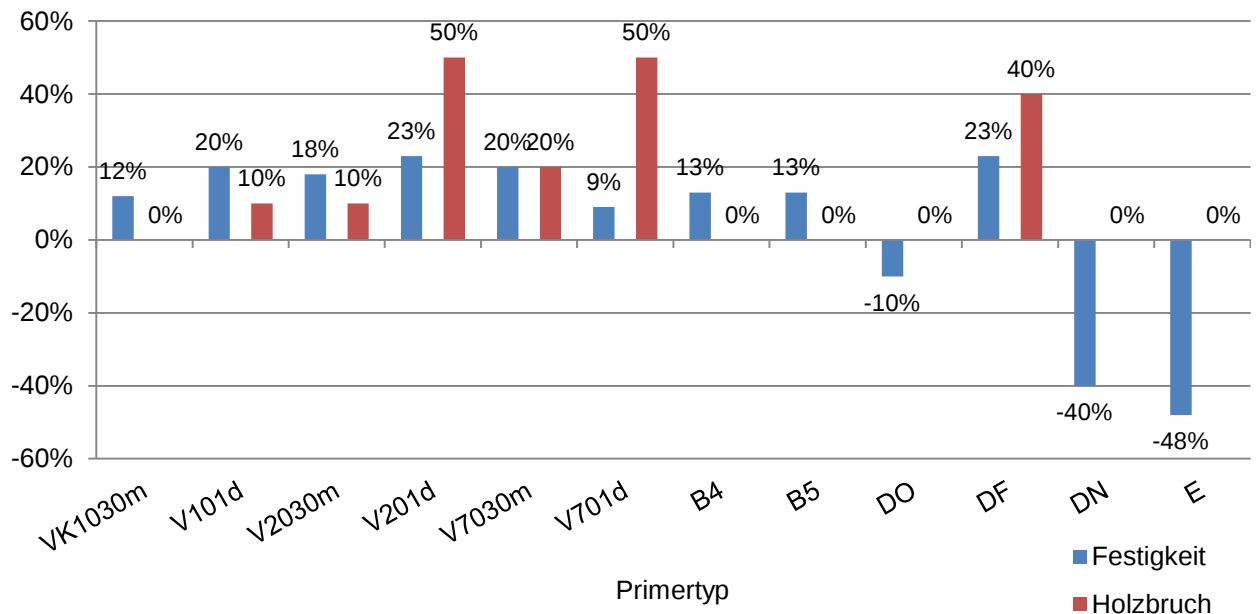


Abb.: 5.7 Gegenüberstellung von Holzbruch und Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4

Zudem besteht die Möglichkeit, dass durch die Benetzung der Fügeiteiloberfläche mit dem Primer die Eigenspannung der Fügeiteile reduziert wird. Demzufolge wird die Spannung des Zugversuches im geringeren Masse von der Eigenspannung überlagert.

Kritisch zu betrachten ist, dass der Holzbruch bei V20 durch den Primer erst nach einer Einwirkdauer von einem Tag stark erhöht wird. Der gleiche Primer zeigt nach einer Einwirkdauer von 30 Minuten einen viel geringeren Zuwachs bei fast identischer Verbesserung der Zugscherfestigkeit. Als Ursache kommt zum einen eine langsame Reaktivität des Primers infrage, aber es ist auch durchaus denkbar, dass die chemische Behandlung die Holzstruktur schädigt.

Für die Schädigung der Holzstruktur sprechen auch die Ergebnisse von Desmodur® VKS70. Bei dieser Gruppe vermindert sich die Zugscherfestigkeit nach der erhöhten Einwirkdauer, jedoch steigt der Holzbruch stark an. Würde der erhöhte Holzbruch allein durch die Verbesserung der Festigkeit hervorgerufen werden, müsste auch die Zugscherfestigkeit steigen.

Der Vergleich der Versuchsgruppen VK1030m, B4 und B5 mit den Primervarianten DN und EMIMAc, in Abb.: 5.7, lässt noch eine weitere Vermutung zu: alle fünf

Varianten zeigen keinen Holzbruch. Dieser Umstand ist nur dadurch zu begründen, dass bei diesen Versuchsreihen die Kohäsionskräfte des Klebstoffes geringer waren als die Kohäsionskräfte des Holzes und die Adhäsionskräfte der Grenzfläche. Somit ist bei diesen Varianten die gemessene Zugscherfestigkeit ein Mass für die Kohäsionskräfte des Klebstoffs. Unter gleichen Bedingungen müsste die Verwendung desselben Klebstoffs demzufolge auch die gleichen Zugscherfestigkeiten hervorrufen. Dies trifft hier aber nur für die Primer VK10, B4 und B5 zu. Bei der Behandlung mit Dioxan und EMIMAc verringert sich die Zugscherfestigkeit um 40 % bzw. 48 %. Da bei diesen fünf Versuchsreihen bis auf den Primer alle Parameter gleich sind, muss die Ursache für die Minderung der Kohäsionskräfte des Klebstoffs in der Vorbehandlung liegen. Demzufolge ist eine Schädigung des Klebstoffs durch diese beiden Primer nicht auszuschliessen. Analog Lagerfolge A1 zeigen sich nach Lagerfolge A5 eher geringe Unterschiede bei den Zugscherfestigkeit. Eine Ausnahme stellt wieder die Versuchsgruppe dar, die mit EMIMAc vorbehandelt wurde (vgl. Abb.: 5.8). Ein Zuwachs der Zugscherfestigkeit wird vor allem bei den Gruppen B4, B5 und DF ersichtlich. Jedoch bewegt dieser sich in einem Bereich von $0,15 \text{ N/mm}^2$ bis $0,44 \text{ N/mm}^2$ und ist daher eher als gering anzusehen.

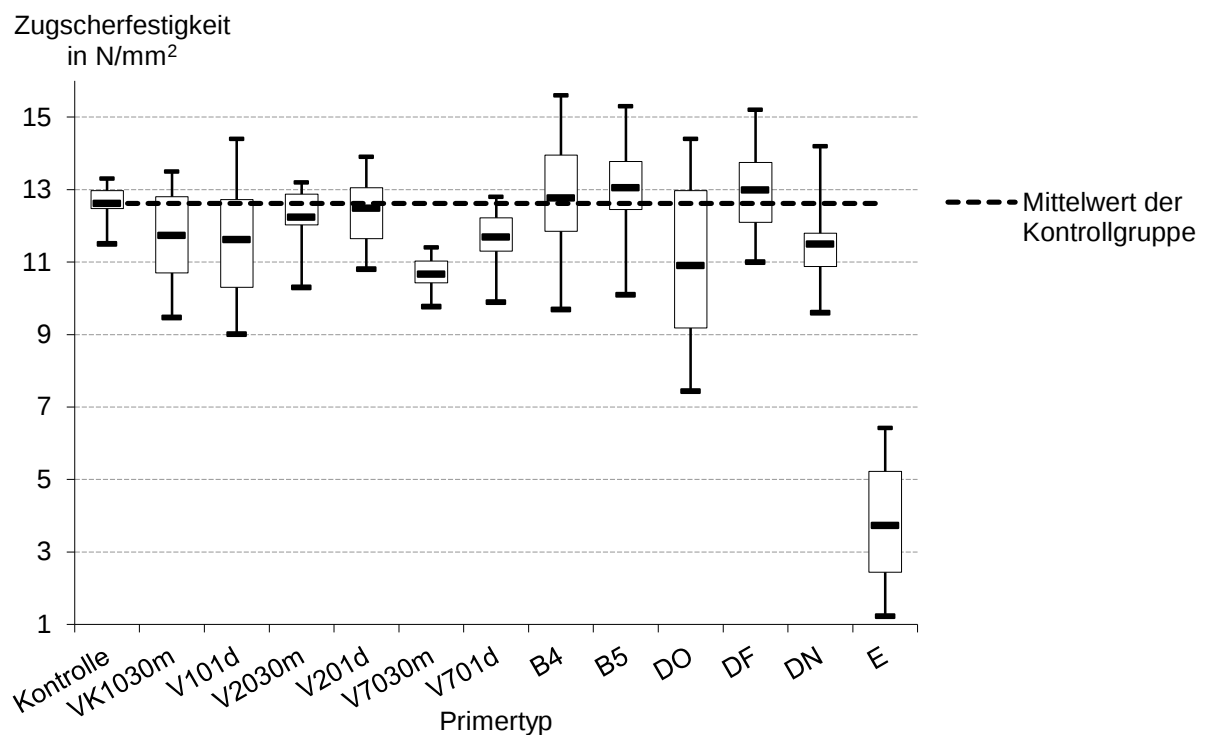


Abb.: 5.8 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A5

Die Lagerfolge A5 weist analoge Zugscherfestigkeiten wie Lagerfolge A1 auf (vgl. Abb.: 5.9). Diese Ergebnisse decken sich mit den Beobachtungen des Ringversuches von KLÄUSLER⁷⁹

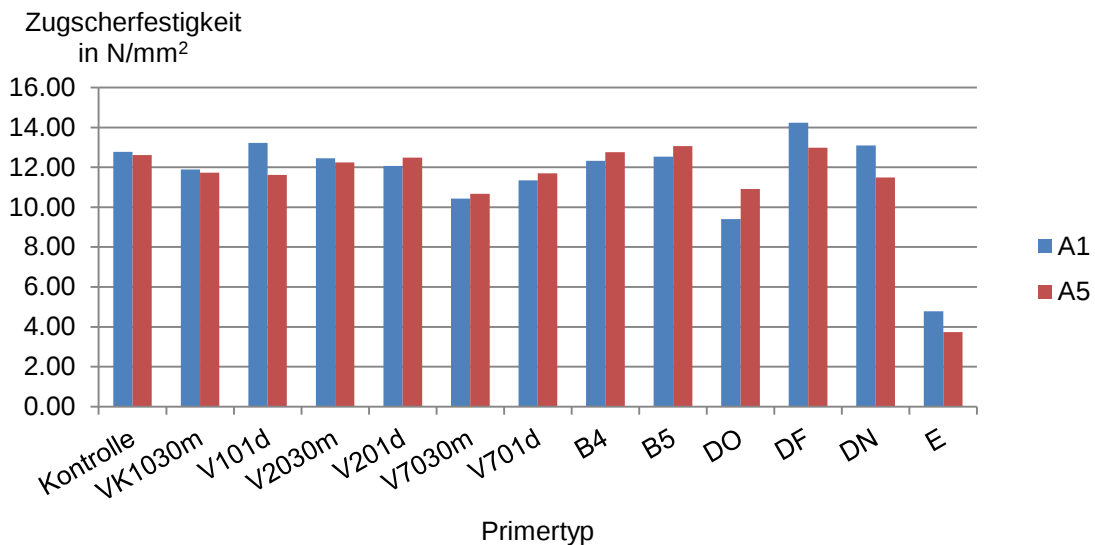


Abb.: 5.9 Vergleich der Zugscherfestigkeiten von A1 und A5

Daraus lässt sich schliessen, dass die Rücktrocknung der Prüfkörper nach der Wasserlagerung eine erneute Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen begünstigt. Bestätigt wird diese Vermutung auch durch die Auswertung des Holzbruches in Abb.: 5.10 .

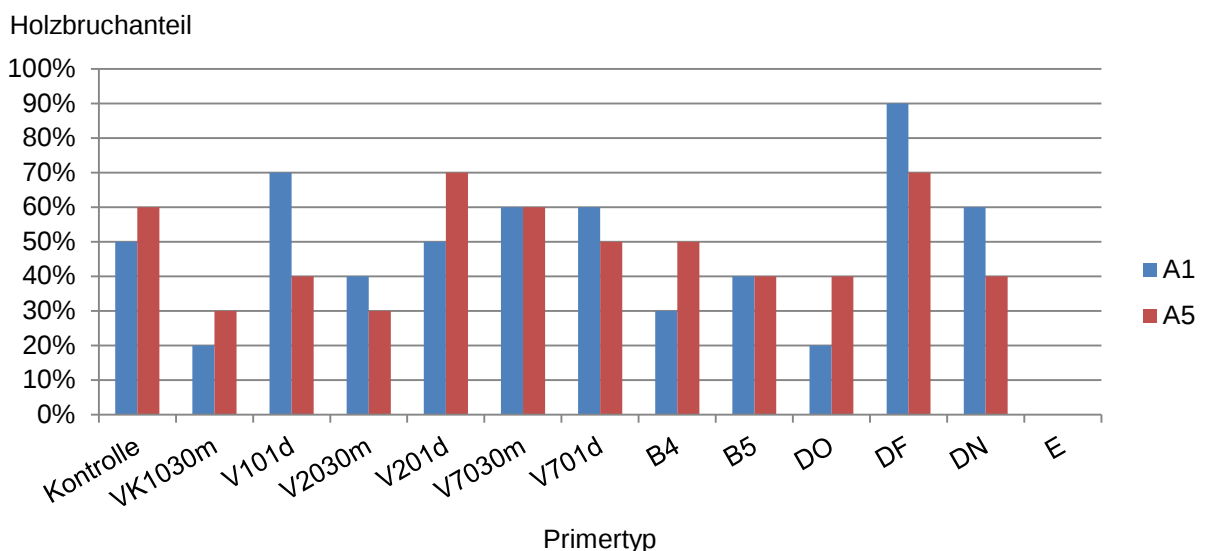


Abb.: 5.10 Vergleich des Holzbruches von A1 und A5

Dieser erreicht bei den meisten Primervarianten die gleichen oder gar bessere Werte als nach Lagerfolge A1. Der starke Abfall der Zugscherfestigkeit infolge A4 und die analogen Zugscherfestigkeiten von Lagerfolge A1 und A5 legt die Vermutung nahe,

⁷⁹ vgl. KLÄUSLER, O. (2012), Seite 5

dass der Wassergehalt während der Prüfung einen höheren Einfluss auf die Zugscherfestigkeit hat als die durch Quellen und Schwinden induzierten Spannungen. Allgemein erhöhten die Primer V201d und DF den Holzbruch gegenüber der Kontrollgruppe. Die Steigerung von ca. 16 % ist jedoch als eher gering einzustufen.

6 Zusammenfassung

Die Untersuchungen dieser Arbeit zum Einfluss verschiedener Primer auf die Verklebung von Buchenholz legen eindeutige Auswirkungen auf die Zugscherfestigkeit und den Holzbruch offen. Unter den drei Lagerfolgen wurden die geringsten Zugscherfestigkeiten nach Lagerfolge A4 festgestellt. Im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigten die Vorbehandlungen jedoch bei dieser Lagerfolge die positivste Auswirkung auf die Zugscherfestigkeit. Das Gleiche gilt auch für den Holzbruchanteil. Analoge Ergebnisse zeigten sich nach Auswertung der Lagerfolgen A1 und A5. Innerhalb der einzelnen Lagerfolgen konnten grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Primerbehandlungen festgestellt werden. Obwohl über die einzelnen Vorbehandlungen hinweg keine eindeutige Veränderung der Festigkeit erreicht wurde, konnten die Auswirkungen einzelner Primer auf die Verklebung nachgewiesen werden. Nach Lagerfolge A1 und A5 zeichnen sich eher negative Auswirkungen durch die Primer auf die Zugscherfestigkeit ab. Die einzige Ausnahme bildet die Vorbehandlung mit DMF. Die Wirkung auf den Holzbruch war bei der Lagerfolge A1 deutlicher, aber zwischen den verschiedenen Primern sehr unterschiedlich. Bei dem Holzbruch nach Lagerfolge A5 konnte hingegen eher ein negativer Trend aufgrund der Primer beobachtet werden.

Die besten Resultate bei allen Lagerfolgen wurden bei der Vorbehandlung mit DMF erzielt. Nach Lagerfolge A1 konnte eine Steigerung der Zugscherfestigkeit von 12 % und des Holzbruchanteils um 80 % erzielt werden. Nach Wasserlagerung A4 erreichte DMF im Mittel eine Zugscherfestigkeit, die 23 % höher lag als die der entsprechenden Kontrollgruppe. Auch bei dem Holzausriss war ein Zuwachs von 40% nachweisbar. Lediglich nach Lagerfolge A5 war die Steigerung der Festigkeit nicht mehr so gross. Es wurde eine Steigerung der Zugscherfestigkeit von 3 % und eine Steigerung des Holzbruchs von 16 % ermittelt.

Die schlechtesten Festigkeitswerte nach allen Lagerfolgen stellten sich bei der Behandlung mit EMIMAc heraus. Diese Prüfkörper erreichten die geringsten Zugscherfestigkeiten und es konnte auch kein Holzbruch registriert werden.

Die Ergebnisse der anderen Primer ähneln sich stark oder zeigen gegenläufige Tendenzen bei der Zugscherfestigkeit und dem Holzbruch. Dadurch wird die Festlegung einer eindeutigen Rangfolge erheblich erschwert.

Um weitere Primer zu favorisieren, soll unter Berücksichtigung der Forderung vornehmlich die Nassfestigkeit zu steigern die Wertung auf die Lagerfolgen A4 und

A5 beschränkt werden. Demnach könnte für weiterführende Untersuchungen neben DMF auch der Primer Desmodur® VKS20 mit einer Einwirkzeit von einem Tag verwendet werden. Diese Variante erhöht nach Lagerfolge A4 die Zugscherfestigkeit um 23 % und den Holzbruch um 50 %. Nach Lagerfolge A5 wurden in etwa die gleichen Werte für die Zugscherfestigkeit ermittelt wie bei der Kontrollgruppe. Der Holzbruch lies sich um ca. 16 % steigern.

Im Bezug zur Praxis sollte die technologische Umsetzung jedoch berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Einwirkzeit von 24 Stunden nur schwer umsetzbar ist und mit erheblich höheren Zeitaufwand und Lagerkosten verbunden ist.

7 Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen

Zur Bestätigung des verbesserten Eindringens des Klebstoffes in die Holzstruktur durch die Vorbehandlung sollten noch geeignete Versuche durchgeführt werden. Sofern eine Vorbehandlung der Fügeflächen mit Primern ein verstärktes Penetrieren von Klebstoff in das Holz bewirkt, müsste dies mittels eines bildgebenden Verfahrens nachgewiesen werden können.

Um die Applikation der Primer, die sich als günstig erwiesen haben zu vereinfachen, sollte die mögliche Verwendung als Additiv im Klebstoff in Erwägung gezogen werden. Dadurch könnte nicht nur Zeit bei der Vorbehandlung eingespart werden, sondern es würde auch gleichzeitig eine gleichmässige Verteilung des Primers gewährleisten.

Sollte sich das für die Folgeversuche nicht realisieren lassen, könnte durch ein homogeneres Auftragsverfahren der Primer die Aussagefähigkeit der Ergebnisse trotzdem erhöht werden.

Weiterhin sollte die Wirkung der Primer auf die Oberflächenrauheit und den Kontaktwinkel untersucht werden. Vermutlich werden durch die chemische Behandlung die durch die mechanische Bearbeitung angedrückten Holzfasern der Oberfläche teilweise aufgerichtet. Dies vergrössert die Oberfläche, wodurch stärkere mechanische aber auch chemische Adhäsionskräfte ausgebildet werden können. Für weitere Untersuchungen der Primerwirkung sollte man mittels einiger Vorversuche diese Vermutung klären.

Durch die geeignete Kombination von Primer und mechanischer Bearbeitung der Füge-teiloberfläche könnte die Verklebungsgüte zusätzlich beeinflusst werden. Um dies zu untersuchen sollten die Primer mit verschiedenen Bearbeitungsverfahren, wie Schleifen, Hobeln oder Stirnplanfräsen, kombiniert werden.

Bei allen in dieser Arbeit angewandten Primer wurde der Einfluss auf die Umwelt ausser Acht gelassen. Einige der verwendeten Stoffe befinden sich noch in der Testphase, weshalb eine gesundheitsschädigende Wirkung auf andere Organismen nicht auszuschliessen ist. Bevor diese Stoffe zur Anwendung kommen, sollte deshalb eine mögliche Gefährdung ausgeschlossen bzw. die toxische Wirkung untersucht werden.

8 Literaturverzeichnis

ASHTON, H. E. (1973): The swelling of wood in polar organic solvents. In: Wood Science 6 (1973) Nr.2, Seite 159-166

BANGHAM, D. H./ RAZOUK, R. I. (1937): Adsorption and the wettability of solid surfaces. In: Transactions of the Faraday Society. (1937), Nr. 33, Seite 1459 – 1463

BIELMAN, J. (1998): Lackadditive. Weinheim u.a. : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 1998

BISCHOF, C./ POSSART, W. (1983): Adhäsion – Theoretische und experimentelle Grundlagen. Berlin: Akademie Verlag, 1983

BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. (2005): Klebtechnik Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2005

Chow, S. (1997): Adhesion Strength and Wood Failure Relationship in Wood- Glue Bonds. In: JOURNAL OF THE JAPAN WOOD RESEARCH SOCIETY 25, (1979) Nr.2, Seite 125 – 131

CHRISTIANSEN, A. W. (2005): Chemical and mechanical aspects of HMR primer in relationship to wood bonding. In: Forest Products Journal 55, (2005) Nr. 11, Seite 73-78

DA SILVA, L./ OCHSNER, A./ ADAMS, R. D. (2011): Handbook of Adhesion Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011

DE BRUYNE, N. A./ HOUWNIK, R. (1951): Adhesion and Adhesives. New York, Amsterdam, London, Brussels: Elsevier publishing Company, 1951

DERYAGEN, B. V./ KROTAOVA, N. A. (1978): Adhesion of Solids. New York, London: Consultants Bureau, 1978

DIN EN 13183 (2002)

DIN prEN 301 (2011)

DIN prEN 302-1(2011)

DUNKY, M./ NIEMZ, P. (2002): Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2002

ELSTERMANN, F. (2011): Einfluss der Oberflächenqualität des Holzes auf die Verklebungsgüte. Dresden: Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Dresden: Studienrichtung Holztechnik, Diplomarbeit, 2011

FRIHART, C. R. (2009): Adhesive Groups and How They Relate to the Durability of Bonded Wood. In: Journal of Adhesion Science and Technology 23 (2009), Seite 601-617

FRITZ, A. H./ SCHULZE, G. (2010): Fertigungstechnik. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010

GANTENBEIN, S. (2011): Untersuchung des Einflusses von Holzeigenschaften auf die Zugscherfestigkeit von verklebtem Buchen- und Fichtenholz. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe: Holzphysik, Bachelorarbeit, 2011

GÖTZ, K. H. /HOOR, D./ MÖHLER, K./NATTERER, J. (1978): Holzbau Atlas. Augsburg: J. P. Himmer GmbH & Co. KG, 1978

HABENICHT, G. (2006): Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006

HASS, P. u.a. (2012): Adhesive penetration in beech wood: experiments. In: Wood Science and Technology (2012), Nr. 43, Seite 243-256

KÄGI, A./ NIEMZ, P./ MANDALLAZ, D. (2006): Einfluss der Holzfeuchte und ausgewählter technologischer Parameter auf die Verklebung mit 1K-PUR Klebstoffen unter extremen klimatischen Bedingungen. In: Holz als Roh- und Hilfsstoff, (2006) Nr. 64, Seiten 261- 268

KLÄUSLER, O. (2012): Einfluss verschiedener mechanischer Holzbearbeitungsverfahren auf die Verklebungsgüte von Buchenholz. Internes Protokoll der ETH Zürich (1. Februar 2012)

Köhler, R. (1972) Zur Systematik der Klebstoffe. In: Adhäsion 16 (1972), Seiten 41- 73

LANGENDORF, G./ SCHUSTER, E./WAGENFÜHR, R. (1990): Rohholz. 4. Auflage. Leipzig: VEB Fachbuchverlag,1990

LATSCHA, H. P./ KAZMEIER, U./ KLEIN, H. A. (2005): Chemie für Biologen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005

LOHMANN, U. (2003): Holzlexikon. 4. Auflage. Leinfelden- Echterdingen: DRW-Verlag, 2003

LOHMANN, U. (2010): Holzlexikon. 4. Auflage. Hamburg: Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2010

LUCAS, M. u.a. (2010): Ionic Liquid Pretreatment of Poplar Wood at Room Temperature: Swelling and Incorporation of Nanoparticles. In: Applied Materials & Interfaces 2 (2010), Nr. 8, Seite 2198-2205

MANTANIS,G.I./ YOUNG, R. A./ROWELL, R. M.(1994): Swelling of Wood. Part 1. Swelling in water. In: Wood Science and Technology (1994), Nr. 28, Seite 119-134

MARRA, A. A. (1992): Technology of wood bonding. Principles in practice. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992

MÖMBÄCHER, R. (1988): Holz-Lexikon. 3.Auflage. Stuttgart: DRW-Verlag, 1988

MÜLLER, B./ RATH, W. (2004): Formulierung von Kleb- und Dichtstoffen. Das kompetente Lehrbuch für Studium und Praxis. Hannover: Vincentz Network, 2004

NEIMZ, P./ ALLENSPACH, K. (2009): Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf das Versagensverhalten von ausgewählten Klebstoffen bei Zugscherbeanspruchung. In: Bauphysik 31 (2009) Nr.5, Seite 296-304

NIEMZ, P. (2003): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden – Echterdingen: DRW-Verlag, 1993

o.V. (2011): Holzleimbau Technik; (05. Juli 2012) (Online):
http://www.firstwood.de/medien/pdf/PURBOND_HB_S309_Klebstoff.pdf

o.V. (2011): Zulassung Klebstoff; (05. Juli 2012) (Online):
<http://www.purbond.com/purbond/Europa/DE/Zulassungen/>

o.V. (2011): Materialdatenblatt Bayhydur® B 304, (01. Juni 2011) (Online):
http://tecci.bayer.de/coatings/emea/de/Bayhydur_304_de.pdf?para=998c70d64a2b36879609c2e732cbbf97

o.V. (2011): Materialdatenblatt Bayhydur® B 305, (01. Juni 2011) (Online):
http://tecci.bayer.de/coatings/emea/de/Bayhydur_305_de.pdf?para=998c70d64a2b3687ba03327fb324da0f

o.V. (2011): Materialdatenblatt Desmodur® VK 10, (01. Juni 2011) (Online):
http://tecci.bayer.de/coatings/emea/en/Desmodur_VK_10_en.pdf?para=29e63b2ec49cb6e14493900465a4c024

o.V. (2011): Materialdatenblatt Desmodur® VKS 20, (01. Juni 2011) (Online):
https://tecci.bayer.de/coatings/emea/de/Desmodur_VKS_20_de.pdf?para=29e63b2ec49cb6e1e767a1cc64069962

o.V. (2011): Materialdatenblatt Desmodur® VKS 70, (01. Juni 2011) (Online):
http://tecci.bayer.de/coatings/emea/de/Desmodur_VKS_70_de.pdf?para=29e63b2ec49cb6e1b138c5cf0447dd82

PIZZI, A. (1983): Wood Adhesives. Chemistry and Technology. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 1983

STEFAN, J. (1874): Versuche über die scheinbare Adhäsion. In: Sitzungsberichte der Österreichische Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse 69 (1874), Seiten 713- 735

SWIETLICZNY, M. (1980): Einfluss der Holzfaserneigung auf die Festigkeit der Klebefuge. In: Holztechnologie 21, (1980), Nr.2, Seiten 83 – 87

VICK, C./ OKKONEN, E. (2000): Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent. In: Forest Products Journal 50 (2000), Nr. 10, Seiten 69-75

WAGENFÜHR, A./SCHOLZ, F. (2012): Taschenbuch der Holztechnik. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2012

WAGENFÜHR, R./ KÜHNEN, R. (2002): Werkstoffkunde Holz für Restauratoren. Leipzig: Seemann Verlag, 2002

WEISS, P. (1962): Adhesion and Cohesion. Amsterdam, London, New York: Elsevier Publishing Company, 1962

WESTHUES, U. M. (2007): Polyurethane – Lacke, Kleb- und Dichtstoffe. Hannover: Vincentz Network, 2007

ZEPPENFELD, G./ GRUNWALD, D. (2005): Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie. 2. Auflage. Leinfelden – Echterdingen: DRW – Verlag, 2005

9 Verzeichnis der Abbildungen

Abb.: 2.1 Einteilung der Klebstoffe nach dem chemischen Klebgrundstoff (Quelle: modifiziert nach HABENICHT, G. 2006, Seite 5)	11
Abb.: 2.2 Einteilung der organischen Klebstoffe (Quelle: modifiziert nach MÖMBÄCHER, R. 1988, Seite 649)	12
Abb.: 2.3 Einteilung der Klebstoffe nach dem Aushärtungsmechanismus (Quelle: modifiziert nach BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. 2005, Seite 33)	13
Abb.: 2.4 Reaktionsmechanismus 1K- PUR- Klebstoff (Quelle: BROCKMANN, W./ GEISS, P. L./ KLINGEN, K./ SCHRÖDER, B. (2005), Seite 64)	15
Abb.: 2.5 Einordnung von Kleben in die Fertigungsverfahren (Quelle: DIN 8593-8 (2003), Seite 5)	16
Abb.: 2.6 Aufbau der Leimfuge (Quelle: modifiziert nach MARRA, A. A. 1992, Seite 37).	17
Abb.: 2.7 Adhäsionstheorien (Quelle: modifiziert nach BISCHOF, C./ POSSART, W. (1983), Seite 27)	20
Abb.: 2.8 Kontaktwinkel nach YOUNG (Quelle: WEISS, P. (1962), Seite 177)	21
Abb.: 2.9 Mechanische Adhäsion (Quelle: HABENICHT, G. (2006), Seite 333)	24
Abb.: 2.10 Einfluss der Rohdichte auf die Zugscherfestigkeit (Quelle: CHOW, S. (1979), Seite 128)	26
Abb.: 2.11 Chemische Bestandteile von Holz (Quelle: modifiziert nach WAGENFÜHR, R./ KÜHNEN, R. (2002), Seite 46)	27
Abb.: 3.1 Beispiel für die Jahrringwinkelbestimmung	33
Abb.: 3.2 Zugscherprüfmaschine	34
Abb.: 4.1 mittlere Zugscherfestigkeit aller Lagerfolgen	37
Abb.: 4.2 Prozentuale Änderung der Zugscherfestigkeit	37
Abb.: 4.3 Holzbruch Übersicht aller drei Lagerfolgen	38
Abb.: 4.4 Visuelle Einschätzung des Holzaustriss	39
Abb.: 5.1 Vergleich zwischen mittlerer Zugscherfestigkeit und Forderung der Norm	40
Abb.: 5.2 Bruchbild der Lagerfolgen nach EMIMAc Behandlung	41
Abb.: 5.3 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A1	41
Abb.: 5.4 Relative Änderung des Holzbruchanteils nach Lagerfolge A1 im Vergleich mit der Kontrollgruppe	42
Abb.: 5.5 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4	43

Abb.: 5.6 Prozentuale Änderung der Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4	44
Abb.: 5.7 Gegenüberstellung von Holzbruch und Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A4	45
Abb.: 5.8 Zugscherfestigkeit nach Lagerfolge A5	46
Abb.: 5.9 Vergleich der Zugscherfestigkeiten von A1 und A5	47
Abb.: 5.10 Vergleich des Holzbruches von A1 und A5	47

10 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1 Vergleich der Bindungsenergien	19
Tabelle 3.1 Abkürzung der Vorbehandlung	30
Tabelle 3.2 Behandlung vor der Zugscherprüfung (Quelle: modifiziert nach DIN prEN 302-1, (2011),Seite 10)	31
Tabelle 4.1 Zusammenstellung der gemessenen Zugscherfestigkeiten	36

11 Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1 : Übersicht über die Prüfabfolge	Seite 29
Anlage 2: Gesamtmesswerttabelle Lagerfolge A5	Seite 40
Anlage 3: Bestimmung der Rohdichte	Seite 33
Anlage 4: Bestimmung des Jahrringwinkels	Seite 34
Anlage 5: mittlerer Holzaustriss	Seite 35
Anlage 6: Gesamtmesswerttabelle Lagerfolge A1	Seite 36
Anlage 7: Gesamtwerttabelle Lagerfolge A4	Seite 40

Übersicht über Prüfabfolge

Zugscherversuche prEN 302-1: 2011												
Nr.	Primer (zweiseitig) 22°C				Klebstoff (einseitig)			Datum				Lagerfolge
	Name	Auftragsmenge [g/m2]	Mix primer : solvent (g)	Drying Time	Auftragsmenge HB S 309 [g/m²]	spez. Pressdruck [Mpa]	Presszeit [min]	Verklebung	Prüfkörperherstellung	Vorbehandlung	Zugscherprüfung	
1	Kontrolle	0.00			180	0.8	75	10.05	23.05		29.05	A1
2										05.06	05.06	A4
3										30.05	12.06	A5
4	VK 10	25.00	unverdünnt	30 Min				08.01	23.05		29.05	A1
5										05.06	05.06	A4
6										30.05	12.06	A5
7	31.25	1 d		09.05				23.05		29.05	A1	
8									05.06	05.06	A4	
9									30.05	12.06	A5	
10	VKS 20	30.17		30 Min				09.05	23.05		30.05	A1
11										06.06	06.06	A4
12										31.05	13.06	A5
13	34.50	1 d		10.05				23.05		30.05	A1	
14									06.06	06.06	A4	
15									31.05	12.06	A5	

Zugscherversuche prEN 302-1: 2011												
Nr.	Primer (zweiseitig) 22°C				Klebstoff (einseitig)			Datum				Lagerfolge
	Name	Auftragsmenge [g/m2]	Mix primer : solvent (g)	Drying Time	Auftragsmenge HB S 309 [g/m ²]	spez. Pressdruck [Mpa]	Presszeit [min]	Verklebung	Prüfkörperherstellung	Vorbehandlung nach DIN	Zugscherprüfung	
16	VKS 70	03.02	unverdünnt	30 Min	180	0.8	75	07.01	22.05		30.05	A1
17										06.06	06.06	A4
18										31.05	12.06	A5
19		03.02		1 d				08.01	22.05		30.05	A1
20										07.06	07.06	A4
21										01.06	12.06	A5
22	B 304	30.05		30 Min				10.05	22.05		30.05	A1
23										07.06	07.06	A4
24										01.06	12.06	A5
25	B 305	37.50		30 Min				11.05	22.05		30.05	A1
26										07.06	07.06	A4
27										01.06	12.06	A5
28	DMSO	38.34		30 Min				11.05	22.05		30.05	A1
29										08.06	08.06	A4
30										04.06	13.06	A5
31	DMF	40.99		30 Min				11.05	22.05		30.05	A1
32										08.06	08.06	A4
33										04.06	13.06	A5

Zugscherversuche prEN 302-1: 2011												
Nr.	Primer (zweiseitig) 22°C				Klebstoff (einseitig)			Datum				Lagerfolge
	Name	Auftragsmenge [g/m2]	Mix primer : solvent (g)	Drying Time	Auftragsmenge HB S 309 [g/m²]	spez. Pressdruck [Mpa]	Presszeit [min]	Verklebung	Prüfkörperherstellung	Vorbehandlung nach DIN	Zugscherprüfung	
34	Dioxan	20.07	unverdünnt	30 Min	180	0.8	75	12.05	22.05		31.05	A1
35										12.06	12.06	A4
36										04.06	13.06	A5
37	EMIMAc	30.01	1 : 1 mit H2O	30 Min				23.04	22.05		31.05	A1
38										12.06	12.06	A4
39										04.06	13.06	A5

Gesamtmesswerttabelle Lagerfolge A5

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
Kontrolle	0m	K_1	2600	13.00	65.59	19.95	100	18.88	16.48	14.56
		K_2	2660	13.30	63.16	19.94	70	18.27	15.96	14.47
		K_3	2290	11.50	59.07	19.89	50	18.17	15.86	14.56
		K_4	2360	11.80	56.70	19.93	50	19.17	16.72	14.65
		K_6	2600	13.10	64.60	19.85	80	19.21	16.77	14.55
		K_11	2520	12.70	54.89	19.90	30	18.46	16.17	14.16
		K_8	2570	12.90	61.06	19.89	100	18.97	16.55	14.62
		K_9	2480	12.40	60.26	19.93	50	18.97	16.55	14.62
		K_10	2530	12.80	52.42	19.82	50	19.02	16.60	14.58
		K_13	2380	12.00	57.46	19.87	50	19.39	16.96	14.33
VK10	30m	V1030m_1	2480	12.40	64.18	19.96	70	18.77	16.41	14.38
		V1030m_2	2380	12.00	56.93	19.87	10	19.09	16.68	14.45
		V1030m_3	1890	9.50	47.29	19.94	10	19.01	16.61	14.45
		V1030m_4	2610	13.10	61.25	19.91	20	19.66	17.17	14.50
		V1030m_5	2680	13.50	64.65	19.93	50	18.84	16.45	14.53
		V1030m_6	1880	9.47	49.20	19.88	90	18.75	16.34	14.75
		V1030m_7	2100	10.50	48.17	19.94	10	19.75	17.24	14.56
		V1030m_8	2260	11.30	55.39	19.96	10	19.09	16.68	14.45
		V1030m_10	2540	12.80	62.39	19.91	10	18.93	16.52	14.59
		V1030m_11	2540	12.80	62.49	19.89	20	19.41	16.92	14.72

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VK10	1d	V101d_1	2380	11.90	59.79	19.95	40	18.59	16.23	14.54
		V101d_2	2600	13.00	61.78	19.92	40	19.14	16.73	14.41
		V101d_3	1790	9.01	44.81	19.89	10	18.95	16.56	14.43
		V101d_4	2180	10.90	52.15	19.93	30	18.92	16.54	14.39
		V101d_5	2260	11.40	52.50	19.87	50	20.13	17.57	14.57
		V101d_6	2760	13.80	67.76	19.96	70	19.03	16.63	14.43
		V101d_7	2010	10.10	49.93	19.87	50	19.00	16.59	14.53
		V101d_8	2000	10.00	48.96	19.91	40	19.48	17.01	14.52
		V101d_9	2860	14.40	75.86	19.93	60	18.86	16.47	14.51
		V101d_10	2330	11.70	58.55	19.88	20	19.01	16.63	14.31
VKS20	30m	V2030m_1	2370	11.90	54.67	19.85	10	19.00	16.61	14.39
		V2030m_2	2590	13.00	65.42	19.88	20	18.73	16.35	14.56
		V2030m_3	2480	12.40	61.73	19.92	40	18.70	16.30	14.72
		V2030m_4	2580	13.00	62.67	19.86	30	19.17	16.70	14.79
		V2030m_5	2490	12.50	62.17	19.88	20	19.58	17.03	14.97
		V2030m_6	2620	13.20	66.67	19.82	40	18.76	16.32	14.95
		V2030m_7	2460	12.40	63.32	19.90	80	19.22	16.71	15.02
		V2030m_12	2050	10.30	49.30	19.85	10	20.18	17.57	14.85
		V2030m_9	2210	11.20	52.47	19.78	50	19.18	16.69	14.92
		V2030m_10	2490	12.50	57.91	19.85	20	19.93	17.35	14.87

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VKS20	1d	V201d_1	2570	12.90	65.84	19.93	80	18.77	16.35	14.80
		V201d_2	2350	11.80	55.68	19.96	60	19.16	16.71	14.66
		V201d_3	2750	13.90	70.75	19.87	60	19.02	16.58	14.72
		V201d_4	2150	10.80	52.15	19.88	50	19.18	16.70	14.85
		V201d_5	2770	13.90	65.01	19.90	80	19.57	17.07	14.65
		V201d_6	2560	12.80	60.51	19.95	70	19.08	16.61	14.87
		V201d_7	2310	11.60	56.56	19.87	80	18.53	16.14	14.81
		V201d_8	2250	11.30	53.64	19.89	90	19.96	17.37	14.91
		V201d_9	2520	12.80	61.55	19.67	90	19.10	16.66	14.65
		V201d_10	2610	13.10	60.73	19.95	60	18.64	16.26	14.64
VKS70	30m	V7030m_1	1990	10.00	49.46	19.91	100	19.30	16.81	14.81
		V7030m_2	1950	9.77	49.07	19.96	90	19.15	16.67	14.88
		V7030m_3	2090	10.50	54.06	19.92	30	19.13	16.72	14.41
		V7030m_4	2200	11.10	57.29	19.84	100	19.48	16.97	14.79
		V7030m_5	2070	10.40	53.56	19.93	80	18.96	16.58	14.35
		V7030m_6	2130	10.70	53.11	19.93	30	19.38	16.95	14.34
		V7030m_7	2120	10.70	57.76	19.89	30	19.33	16.90	14.38
		V7030m_8	2240	11.30	54.88	19.80	40	19.24	16.81	14.46
		V7030m_9	2280	11.40	63.74	19.91	50	19.49	17.00	14.65
		V7030m_10	2140	10.80	66.53	19.88	50	19.55	17.18	13.80

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VKS70	1d	V701d_1	2450	12.30	57.79	19.90	20	19.45	16.97	14.61
		V701d_2	2390	12.00	59.32	19.91	50	18.71	16.31	14.71
		V701d_3	2400	12.00	62.11	19.91	60	19.05	16.62	14.62
		V701d_5	2230	11.20	52.64	19.83	80	19.49	16.93	15.12
		V701d_7	2540	12.80	60.81	19.90	20	19.09	16.66	14.59
		V701d_8	2190	11.00	57.23	19.90	80	19.05	16.43	15.95
		V701d_9	2310	11.60	57.44	19.90	40	19.05	16.61	14.69
		V701d_10	2290	11.60	58.85	19.82	70	19.13	16.70	14.55
		V701d_13	1960	9.89	51.14	19.85	80	18.62	16.25	14.58
		V701d_12	2510	12.60	61.93	19.92	40	19.58	17.09	14.57
B304	30m	B4_1	2440	12.30	61.00	19.91	10	18.73	16.33	14.70
		B4_2	2330	11.70	68.06	19.89	40	19.09	16.69	14.38
		B4_4	3110	15.60	72.94	19.89	90	19.73	17.21	14.64
		B4_6	2440	12.30	69.84	19.78	30	19.17	16.77	14.31
		B4_7	2810	14.10	67.01	19.95	70	18.90	16.48	14.68
		B4_8	1920	9.69	59.67	19.83	30	18.97	16.56	14.55
		B4_9	2310	11.60	64.28	19.87	20	19.30	16.88	14.34
		B4_10	2690	13.50	66.69	19.91	80	18.88	16.48	14.56
		B4_11	2540	12.80	63.05	19.86	80	18.67	16.31	14.47
		B4_12	2780	14.10	67.58	19.73	80	19.59	17.10	14.56

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
B305	30m	B5_1	2600	13.10	61.92	19.85	40	19.98	17.42	14.70
		B5_2	2560	12.90	61.28	19.88	30	19.06	16.64	14.54
		B5_3	2370	11.90	61.31	19.90	80	19.03	16.62	14.50
		B5_4	2760	13.80	72.48	19.98	90	19.01	16.60	14.52
		B5_5	3050	15.30	73.99	19.92	40	18.68	16.36	14.18
		B5_6	2720	13.70	60.26	19.90	20	19.78	17.33	14.14
		B5_7	2440	12.30	50.08	19.93	30	19.89	17.40	14.31
		B5_8	2010	10.10	59.39	19.79	50	18.93	16.57	14.24
		B5_9	2880	14.40	68.36	19.97	40	18.63	16.30	14.29
		B5_10	2610	13.10	59.94	19.88	0	18.77	16.47	13.96
DMSO	30m	DO_1	1840	9.25	45.54	19.90	10	18.98	16.58	14.48
		DO_2	2070	10.50	53.15	19.70	30	19.15	16.73	14.47
		DO_3	2710	13.60	74.03	19.94	80	18.57	16.20	14.63
		DO_4	1490	7.44	39.19	19.96	10	18.34	15.99	14.70
		DO_5	2200	11.20	61.15	19.71	60	18.90	16.50	14.55
		DO_6	1640	8.27	41.32	19.83	10	19.23	16.77	14.67
		DO_7	2850	14.40	66.72	19.77	80	19.04	16.60	14.70
		DO_8	2620	13.30	67.41	19.80	90	18.90	16.48	14.68
		DO_9	2370	12.00	54.74	19.85	10	19.56	17.08	14.52
		DO_10	1830	9.16	39.32	19.99	10	19.60	17.10	14.62

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
DMF	30m	DF_1	2520	12.70	56.51	19.75	40	19.05	16.67	14.28
		DF_2	2400	12.10	70.20	19.91	90	18.64	16.25	14.71
		DF_3	2400	12.10	61.95	19.86	80	18.85	16.42	14.80
		DF_4	2750	13.90	69.33	19.80	50	18.83	16.39	14.89
		DF_5	2370	12.10	59.88	19.55	90	18.57	16.14	15.06
		DF_6	2700	13.60	69.40	19.81	80	19.21	16.73	14.82
		DF_7	2750	13.80	67.83	19.89	40	18.80	16.40	14.63
		DF_8	2660	13.40	71.74	19.87	80	18.55	16.14	14.93
		DF_9	2180	11.00	57.43	19.89	90	18.10	15.71	15.21
		DF_10	3000	15.20	70.34	19.77	70	19.12	16.61	15.11
DIOXAN	30m	DN_1	2360	11.80	61.16	19.93	40	18.81	16.43	14.49
		DN_2	1900	9.60	53.14	19.77	80	19.01	16.62	14.38
		DN_3	2140	10.80	64.09	19.83	30	19.04	16.62	14.56
		DN_4	2200	11.10	47.84	19.83	20	18.89	16.44	14.90
		DN_5	2830	14.20	71.59	19.89	70	19.08	16.62	14.80
		DN_6	2350	11.80	58.65	19.86	40	18.58	16.15	15.05
		DN_7	2030	10.20	57.11	19.77	0	18.69	16.30	14.66
		DN_8	2230	11.30	52.38	19.82	20	18.58	16.18	14.83
		DN_9	2530	12.80	60.42	19.81	50	18.35	16.00	14.69
		DN_10	2260	11.40	61.65	19.86	50	18.64	16.19	15.13

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
ENIMAc	30m	E_1	842	4.25	19.24	19.83	10	18.70	16.32	14.58
		E_3	244	1.23	7.71	19.83	0	19.12	16.67	14.70
		E_4	571	2.87	14.78	19.89	0	18.81	16.40	14.70
		E_6	466	2.37	10.42	19.71	0	19.27	16.84	14.43
		E_7	1080	5.50	26.93	19.61	0	18.70	16.31	14.65
		E_8	272	1.36	9.52	19.91	0	19.07	16.63	14.67
		E_9	876	4.39	23.60	19.98	0	20.04	17.48	14.65
		E_10	1270	6.42	32.37	19.72	0	18.94	16.55	14.44
		E_11	530	2.65	12.12	20.00	0	18.99	16.59	14.47
		E_12	1250	6.29	33.06	19.91	0	18.72	16.34	14.57

Bestimmung der Rohdichte

Ermittlung der Nutbreite:

Alle Messwerte wurden mit Hilfe des Digitalen Messschiebers Mitutoyo ermittelt.

NR.	Messpunkt			
	b _{N1} [mm]	b _{N2} [mm]	b _{N3} [mm]	b _{N4} [mm]
1	3.36	3.34	3.34	3.35
2	3.33	3.34	3.34	3.35
3	3.34	3.33	3.34	3.35
4	3.36	3.35	3.35	3.35
5	3.35	3.36	3.34	3.35
6	3.34	3.35	3.35	3.35
7	3.35	3.34	3.34	3.35
8	3.36	3.35	3.36	3.36
9	3.36	3.36	3.36	3.34
10	3.34	3.35	3.34	3.34

Mittelwert / b_N 3.35 mm

Standartabweichung 0.01 mm

Rohdichte:

- Messmittel: Massenermittlung: Wage Mettler PM 4000
Längenmasse: Digitaler Messschiebers Mitutoyo

- Berechnungen:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ Rohdichte [kg/m³]

m Masse der Probe [kg]

V Volumen der Probe [m³]

$$V = V_K - 2 \cdot V_N$$

V_K Volumen der Probekörper [m³]

V_N Volumen der Nut [m³]

$$V_K = (l \cdot d \cdot b) \cdot 10^{-9}$$

l Länge der Prüfkörper (150mm nach DIN EN 302-1 (2011) Seite 7)

d Dicke der Prüfkörper (10mm nach DIN EN 302-1 (2011)Seite 7)

b Breite der Prüfkörper [mm]

$$V_N = (l_N \cdot b_N \cdot t_N) \cdot 10^{-9}$$

t_N Tiefe der Nut (5mm nach DIN EN 302-1 (2011) Seite8)

l_N Länge der Nut = Breite der Prüfkörper [mm]

b_N Breite der Nut [mm]

- Messwerte:

Nr.	b [mm]	Masse [g]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]
1	19.93	18.86	29.23	645.29
2	20.01	19.34	29.34	659.06
3	19.94	19.14	29.24	654.54
4	19.98	18.52	29.30	632.07
5	19.98	18.48	29.30	630.70
6	19.95	18.52	29.26	633.02
7	19.97	18.42	29.29	628.97
8	19.95	19.47	29.26	665.49
9	19.98	19.29	29.30	658.35
10	19.91	19.00	29.20	650.73
11	20.00	18.16	29.33	619.16
12	20.01	18.67	29.34	636.23
13	19.97	19.01	29.29	649.12
14	19.84	18.25	29.10	627.25
15	19.95	19.15	29.26	654.55
16	19.97	19.51	29.29	666.19
17	20.01	19.19	29.34	653.95
18	20.02	20.00	29.36	681.21
19	19.98	19.10	29.30	651.86
20	19.89	18.97	29.17	650.35
21	19.77	18.64	28.99	642.92
22	20.02	19.41	29.36	661.12
23	19.95	19.64	29.26	671.30
24	20.02	19.52	29.36	664.87
25	19.97	19.12	29.29	652.87
26	19.98	20.14	29.30	687.36
27	20.03	18.29	29.37	622.66
28	19.87	18.79	29.14	644.83
29	19.91	19.26	29.20	659.63

Nr.	b [mm]	Masse [g]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]
30	19.99	19.16	29.32	653.58
31	20.02	18.87	29.36	642.73
32	19.97	19.99	29.29	682.58
33	19.79	18.65	29.02	642.62
34	19.93	18.48	29.23	632.28
35	19.91	18.21	29.20	623.67
36	19.98	19.07	29.30	650.84
37	19.97	19.01	29.29	649.12
38	19.89	19.28	29.17	660.98
39	19.99	19.04	29.32	649.49
40	19.92	19.16	29.21	655.88
41	19.81	18.81	29.05	647.47
42	19.95	19.12	29.26	653.53
43	19.99	19.95	29.32	680.53
44	19.95	19.64	29.26	671.30
45	20.01	19.09	29.34	650.54
46	20.04	19.83	29.39	674.75
47	19.99	18.86	29.32	643.35
48	19.95	18.75	29.26	640.88
49	20.01	19.50	29.34	664.52
50	19.94	19.28	29.24	659.33
51	19.82	19.17	29.07	659.53
52	19.98	19.31	29.30	659.03
53	19.99	18.62	29.32	635.16
54	19.90	18.67	29.18	639.75
55	19.98	18.97	29.30	647.43
56	20.03	19.50	29.37	663.85
57	19.94	19.10	29.24	653.17
58	19.10	18.89	28.01	674.40
59	20.04	18.18	29.39	618.61
60	19.98	19.63	29.30	669.95
61	20.01	20.64	29.34	703.36
62	19.90	18.55	29.18	635.64
63	19.99	18.66	29.32	636.53
64	19.84	18.97	29.10	651.99
65	19.94	18.99	29.24	649.41
66	19.88	19.68	29.15	675.04
67	20.03	19.60	29.37	667.26
68	19.89	19.07	29.17	653.78
69	20.01	18.42	29.34	627.71
70	19.99	18.95	29.32	646.42

Nr.	b [mm]	Masse [g]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]
71	19.96	18.88	29.27	645.00
72	19.90	19.75	29.18	676.76
73	19.90	20.05	29.18	687.04
74	19.95	19.59	29.26	669.59
75	20.00	18.63	29.33	635.19
76	19.78	18.71	29.01	645.01
77	20.04	19.35	29.39	658.42
78	19.81	19.28	29.05	663.65
79	19.92	19.30	29.21	660.67
80	20.04	19.25	29.39	655.01
81	19.94	19.47	29.24	665.82
82	19.97	19.57	29.29	668.24
83	19.93	19.29	29.23	660.00
84	19.89	19.53	29.17	669.55
85	20.02	19.17	29.36	652.94
86	19.70	18.73	28.89	648.32
87	20.03	19.51	29.37	664.19
88	19.92	18.93	29.21	648.01
89	20.03	18.97	29.37	645.81
90	20.08	19.55	29.45	663.90

- Auswertung:

Maximum: 703.36 kg/m³
Minimum: 618.61 kg/m³
Mittelwert: 653.74 kg/m³
Standartabweichung: 16.23 kg/m³

Bestimmung des Jahrringwinkels

- Messmittel: Software: analySIS work
- Stichprobenumfang: n= 65
- Messwerttabelle:

88.81	79.31	73.87	68.77	63.67	53.24	38.60
87.44	79.02	73.79	67.59	63.43	53.07	38.43
86.22	78.12	73.63	66.60	63.06	52.50	36.39
84.71	77.44	72.28	66.48	62.49	51.61	34.46
84.14	76.24	72.18	66.03	61.78	50.92	31.14
81.92	75.91	71.73	65.61	59.60	50.52	
81.88	75.54	70.96	65.35	59.09	50.47	
81.69	75.49	69.95	64.62	57.99	50.32	
81.17	75.15	69.68	64.56	56.26	47.72	
80.90	75.11	69.27	64.09	55.68	41.32	

- Statistische Auswertung:

Mittelwert	65.65	Minimum	31.14
Median	66.60	Standartabweichung	13.94
Maximum	88.81	Variationskoeffizient	21%

mittlerer Holzausriss

- Wertetabelle:

Primer	Lagerfolge		
	A1	A4	A5
Kontrolle	50%	0%	60%
VK1030m	20%	0%	30%
V101d	70%	10%	40%
V2030m	40%	10%	30%
V201d	50%	50%	70%
V7030m	60%	20%	60%
V701d	60%	50%	50%
B4	30%	0%	50%
B5	40%	0%	40%
DO	20%	0%	40%
DF	90%	40%	70%
DN	60%	0%	40%
E	0%	0%	0%

Gesamtmesswerttabelle Lagerfolge A1

Primer	Einwirkdauer	Probenbe- zeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
Kontrolle	0m	K1	2510	12.60	61.21	19.93	40	18.86	16.48	14.44
		K2	3010	15.00	81.41	20.01	80	19.34	16.88	14.57
		K3	2500	12.60	66.55	19.94	40	19.14	16.72	14.47
		K4	2410	12.10	62.23	19.98	70	18.52	16.19	14.39
		K5	2460	12.30	65.57	19.98	30	18.48	16.13	14.57
		K6	2320	11.60	56.37	19.95	40	18.52	16.22	14.18
		K7	2300	11.50	55.16	19.97	30	18.42	16.06	14.69
		K8	2750	13.80	68.65	19.95	50	19.47	17.00	14.53
		K9	2540	12.70	64.50	19.98	40	19.29	16.86	14.41
		K10	2690	13.50	80.52	19.91	90	19.00	16.61	14.39
VK10	30m	V1030m_1	2390	12.00	62.25	19.97	70	19.51	17.10	14.09
		V1030m_2	2580	12.90	66.41	20.01	20	19.19	16.82	14.09
		V1030m_3	2390	11.90	57.04	20.02	10	20.00	17.53	14.09
		V1030m_4	2560	12.80	67.94	19.98	60	19.10	16.75	14.03
		V1030m_5	2450	12.30	61.01	19.89	0	18.97	16.68	13.73
		V1030m_6	2070	10.50	50.28	19.77	10	18.64	16.39	13.73
		V1030m_7	2370	11.80	57.23	20.02	0	19.41	17.03	13.98
		V1030m_8	2230	11.20	56.19	19.95	10	19.64	17.24	13.92
		V1030m_9	2190	10.90	53.78	20.02	20	19.52	17.12	14.02
		V1030m_11	2530	12.60	60.50	19.98	10	20.14	17.66	14.04

Primer	Einwirkdauer	Probenbe- zeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VK10	1d	V101d_1	2770	13.80	78.83	20.02	40	18.87	16.52	14.23
		V101d_2	2380	11.90	61.70	19.97	40	19.99	17.50	14.23
		V101d_3	2710	13.70	73.39	19.79	70	18.65	16.35	14.07
		V101d_4	2700	13.50	76.69	19.93	60	18.48	16.19	14.14
		V101d_5	2370	11.90	63.88	19.91	100	18.21	15.92	14.38
		V101d_7	2670	13.40	68.65	19.97	70	19.01	16.66	14.11
		V101d_8	2830	14.20	76.38	19.89	90	19.28	16.91	14.02
		V101d_9	2730	13.60	67.24	19.99	80	19.04	16.70	14.01
		V101d_11	2760	13.90	72.32	19.81	70	18.81	16.47	14.21
		V101d_12	2480	12.40	62.87	19.95	80	19.12	16.75	14.15
VKS20	30m	V2030m_1	2110	10.50	53.69	20.04	60	19.83	17.34	14.36
		V2030m_2	2680	13.40	80.56	19.99	70	18.86	16.50	14.30
		V2030m_3	2560	12.80	69.84	19.95	40	18.75	16.43	14.12
		V2030m_4	2610	13.10	73.79	20.01	40	19.50	17.10	14.04
		V2030m_5	2270	11.40	62.24	19.94	20	19.28	16.87	14.29
		V2030m_6	2400	12.10	61.74	19.82	20	19.17	16.83	13.90
		V2030m_7	2560	12.80	70.97	19.98	40	19.31	16.90	14.26
		V2030m_8	2490	12.40	76.54	19.99	80	18.62	16.33	14.02
		V2030m_9	2660	13.40	84.96	19.90	40	18.67	16.33	14.33
		V2030m_10	2510	12.60	77.64	19.98	20	18.97	16.63	14.07

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VKS20	1d	V201d_1	2150	10.80	67.04	20.01	40	20.64	18.08	14.16
		V201d_2	2550	12.80	71.03	19.90	30	18.55	16.24	14.22
		V201d_3	1870	9.33	58.93	19.99	10	18.66	16.32	14.34
		V201d_4	2480	12.50	78.25	19.84	80	18.97	16.63	14.07
		V201d_5	2570	12.90	78.97	19.94	90	18.99	16.61	14.33
		V201d_6	2460	12.40	70.75	19.88	20	19.68	17.27	13.95
		V201d_7	2160	10.80	67.42	20.03	20	19.60	17.15	14.29
		V201d_8	2500	12.60	74.02	19.89	80	19.07	16.70	14.19
		V201d_9	2640	13.20	78.96	20.01	60	18.42	16.13	14.20
		V201d_10	2670	13.40	83.84	19.99	90	18.95	16.58	14.29
VKS70	30m	V7030m_1	1790	9.06	60.49	19.78	100	18.71	16.31	14.71
		V7030m_2	2460	12.30	73.60	20.04	60	19.35	16.92	14.36
		V7030m_3	2010	10.10	55.69	19.81	0	19.28	16.84	14.49
		V7030m_4	1870	9.40	63.13	19.92	100	19.30	16.82	14.74
		V7030m_5	2500	12.50	77.08	20.04	20	19.25	16.83	14.38
		V7030m_6	2040	10.30	61.59	19.94	40	19.47	17.02	14.39
		V7030m_7	2150	10.80	56.36	19.97	20	19.57	17.13	14.24
		V7030m_8	2140	10.70	60.37	19.93	70	19.29	16.87	14.34
		V7030m_9	2300	11.60	66.59	19.89	100	19.53	17.12	14.08
		V7030m_10	1530	7.63	42.34	20.02	100	19.17	16.77	14.31

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VKS70	1d	V701d_1	2030	10.20	53.59	19.99	60	19.01	16.60	14.52
		V701d_2	2100	10.60	56.50	19.94	90	18.57	16.22	14.49
		V701d_3	2540	12.70	73.94	20.03	30	18.93	16.55	14.38
		V701d_4	2140	10.70	53.34	19.96	90	19.25	16.86	14.18
		V701d_5	2380	11.90	59.04	19.92	10	19.13	16.78	14.00
		V701d_6	2160	10.80	56.87	19.99	10	18.74	16.42	14.13
		V701d_7	2240	11.20	61.52	20.02	70	18.92	16.55	14.32
		V701d_8	2100	10.70	60.91	19.65	40	18.63	16.34	14.01
		V701d_9	2690	13.50	68.29	19.93	70	19.59	17.09	14.63
		V701d_10	2250	11.20	53.96	20.01	90	18.84	16.47	14.39
B304	30m	B4_1	2680	13.40	67.95	19.95	10	19.31	16.81	14.87
		B4_2	2410	12.10	59.27	19.85	20	19.09	16.59	15.07
		B4_3	2460	12.30	58.23	20.01	30	19.05	16.60	14.76
		B4_4	2330	11.60	60.46	19.99	30	19.09	16.64	14.72
		B4_5	2520	12.60	61.36	19.97	50	18.95	16.56	14.43
		B4_6	2410	12.10	58.44	19.97	50	19.19	16.72	14.77
		B4_7	2370	11.90	58.83	19.95	20	19.44	16.96	14.62
		B4_8	2360	11.80	55.43	20.00	30	19.29	16.83	14.62
		B4_9	2320	11.60	56.15	19.98	20	19.81	17.29	14.57
		B4_10	2750	13.80	65.95	20.00	40	19.16	16.72	14.59

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
B305	30m	B5_1	2260	11.50	51.31	19.64	10	19.08	16.61	14.87
		B5_2	2230	11.10	54.37	19.99	20	19.25	16.76	14.86
		B5_3	2820	14.10	70.79	20.02	50	19.36	16.85	14.90
		B5_4	2560	12.80	62.14	19.94	50	18.92	16.48	14.81
		B5_5	2040	10.20	51.71	19.99	20	19.46	16.97	14.67
		B5_6	2790	14.10	64.03	19.80	40	18.90	16.51	14.48
		B5_7	2710	13.50	71.50	19.99	80	19.10	16.64	14.78
		B5_8	2620	13.10	66.32	19.99	40	18.89	16.44	14.90
		B5_9	2820	14.10	68.71	20.05	30	19.11	16.68	14.57
		B5_10	2180	10.90	53.75	20.01	10	19.62	17.13	14.54
DMSO	30m	DO_1	2230	11.20	60.22	19.94	70	19.09	16.71	14.24
		DO_2	2050	10.30	53.26	19.95	40	19.32	16.93	14.12
		DO_3	1880	9.38	45.49	20.02	10	19.14	16.73	14.41
		DO_4	2010	10.10	50.48	19.99	20	19.01	16.60	14.52
		DO_5	2270	11.40	58.71	19.98	10	19.54	17.08	14.40
		DO_6	1760	8.79	36.38	20.00	20	19.20	16.85	13.95
		DO_7	1750	8.84	37.48	19.76	10	19.00	16.65	14.11
		DO_8	1430	7.16	29.74	19.94	0	19.14	16.74	14.34
		DO_9	1630	8.16	39.77	20.00	10	19.42	16.99	14.30
		DO_10	1730	8.66	43.44	19.95	20	18.77	16.42	14.31

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
DMF	30m	DF_1	2950	14.80	74.19	19.99	20	18.96	16.61	14.15
		DF_2	2450	12.30	60.54	19.94	100	19.14	16.70	14.61
		DF_3	2670	13.50	73.74	19.84	90	18.75	16.38	14.47
		DF_4	2810	14.10	72.34	19.93	100	19.12	16.71	14.42
		DF_5	3190	16.00	86.77	19.89	100	18.85	16.46	14.52
		DF_6	2990	15.00	69.55	19.91	100	18.79	16.47	14.09
		DF_7	2790	13.90	69.98	20.01	100	18.61	16.30	14.17
		DF_8	2480	12.60	63.91	19.71	90	18.83	16.44	14.54
		DF_9	2880	14.50	74.19	19.86	90	18.88	16.51	14.35
		DF_10	3120	15.70	84.25	19.85	80	18.86	16.47	14.51
DIOXAN	30m	DN_1	2610	13.10	69.25	19.88	40	19.28	16.82	14.63
		DN_2	2580	12.90	69.67	19.93	50	19.19	16.72	14.77
		DN_3	2690	13.60	71.42	19.77	60	19.20	16.79	14.35
		DN_4	2600	13.00	67.48	19.96	70	19.34	16.85	14.78
		DN_5	2440	12.30	65.99	19.87	90	19.19	16.74	14.64
		DN_6	2730	13.80	73.71	19.85	40	18.91	16.44	15.02
		DN_7	2660	13.30	69.25	20.00	50	19.26	16.76	14.92
		DN_8	2900	14.50	84.00	19.97	30	18.47	16.11	14.65
		DN_9	2430	12.20	62.11	19.89	80	18.69	16.31	14.59
		DN_10	2450	12.30	63.10	19.91	40	19.07	16.62	14.74

Primer	Einwirkdauer	Probenbe- zeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
ENIMAc	30m	E_1	1070	5.36	26.56	20.00	0	19.11	16.69	14.50
		E_2	1360	6.81	31.02	20.05	0	18.97	16.55	14.62
		E_3	950	4.75	20.87	19.99	0	19.45	16.96	14.68
		E_4	920	4.60	21.99	20.00	0	19.02	16.60	14.58
		E_5	506	2.52	13.21	20.06	0	18.52	16.15	14.67
		E_6	1310	6.57	32.20	19.88	0	19.43	16.94	14.70
		E_7	964	4.83	23.61	19.94	0	18.95	16.53	14.64
		E_8	952	4.75	20.98	20.03	0	19.53	17.04	14.61
		E_9	725	3.62	17.76	20.05	0	18.77	16.37	14.66
		E_10	786	3.93	17.29	20.01	0	19.12	16.67	14.70
		E_11	1130	5.71	27.33	19.77	0	19.05	16.63	14.55

Gesamtmesswerttabelle Lagerfolge A4

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
Kontrolle	0m	K_1	1540	7.58	60.24	20.28	10	37.14	16.33	127.43
		K_2	1550	7.53	54.90	20.57	0	37.52	16.59	126.16
		K_3	1280	6.12	41.44	20.87	0	37.21	16.50	125.52
		K_4	1410	6.96	49.14	20.24	0	37.48	16.66	124.97
		K_5	1130	5.36	31.81	21.13	0	37.01	16.34	126.50
		K_6	1480	7.29	50.56	20.26	0	37.27	16.82	121.58
		K_7	1430	6.98	52.15	20.53	0	37.42	16.51	126.65
		K_8	1170	5.73	40.42	20.39	0	37.40	16.52	126.39
		K_9	954	4.70	46.46	20.30	10	36.62	16.02	128.59
		K_10	863	4.25	43.03	20.32	0	37.45	16.56	126.15
VK10	30m	V1030m_1	953	4.61	41.07	20.67	0	37.34	16.74	123.06
		V1030m_2	1430	6.94	45.36	20.60	0	37.40	16.59	125.44
		V1030m_3	1220	5.88	61.49	20.71	0	37.43	16.99	120.31
		V1030m_4	1590	7.48	50.84	21.27	0	36.98	16.34	126.32
		V1030m_5	1440	7.02	44.41	20.50	0	37.33	16.88	121.15
		V1030m_6	1590	7.66	56.71	20.72	0	37.60	16.94	121.96
		V1030m_7	1510	7.21	42.69	20.92	0	36.71	16.29	125.35
		V1030m_8	1580	7.53	46.84	21.04	0	37.04	17.11	116.48
		V1030m_9	1660	7.91	53.12	20.99	0	36.76	16.62	121.18
		V1030m_10	1570	7.62	52.22	20.55	0	36.86	16.46	123.94

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VK10	1d	V101d_1	1430	6.96	51.95	20.49	0	36.96	16.44	124.82
		V101d_2	1220	5.93	40.74	20.49	0	37.60	17.30	117.34
		V101d_3	1590	7.75	50.02	20.52	0	36.80	16.64	121.15
		V101d_4	1100	5.43	49.86	20.16	10	37.17	16.51	125.14
		V101d_5	1400	6.85	69.17	20.41	10	36.94	16.38	125.52
		V101d_6	1880	9.04	64.89	20.79	10	37.34	16.55	125.62
		V101d_7	1790	8.62	56.01	20.79	0	37.25	16.88	120.68
		V101d_8	1780	8.56	63.46	20.77	20	36.43	16.04	127.12
		V101d_9	1690	8.27	56.85	20.46	10	35.41	16.00	121.31
		V101d_10	1540	7.53	55.62	20.46	20	36.69	16.75	119.04
VKS20	30m	V2030m_1	1460	7.10	53.38	20.53	30	37.12	16.38	126.62
		V2030m_2	1190	5.84	44.22	20.30	10	36.50	16.51	121.08
		V2030m_3	1570	7.65	55.33	20.52	0	37.42	17.08	119.09
		V2030m_4	1620	7.79	54.84	20.82	0	37.12	16.77	121.35
		V2030m_6	1480	7.09	51.66	20.84	0	37.16	16.88	120.14
		V2030m_7	1570	7.70	48.15	20.38	0	36.98	16.66	121.97
		V2030m_8	1380	6.80	43.93	20.26	10	36.59	16.77	118.19
		V2030m_9	1700	8.33	66.66	20.39	20	36.59	16.36	123.66
		V2030m_10	1490	7.28	52.29	20.47	10	37.18	16.39	126.85
		V2030m_11	1630	7.98	52.84	20.47	10	37.15	16.61	123.66

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VKS20	1d	V201d_1	1610	7.79	55.00	20.69	70	37.18	16.19	129.65
		V201d_2	1750	8.43	63.01	20.81	50	37.28	16.51	125.80
		V201d_3	1380	6.73	42.99	20.53	0	38.11	17.68	115.55
		V201d_4	1640	7.96	55.86	20.57	70	37.37	16.49	126.62
		V201d_5	1240	6.08	53.89	20.38	60	36.69	15.62	134.89
		V201d_6	1810	8.85	59.54	20.48	0	36.64	16.41	123.28
		V201d_7	1560	7.67	62.70	20.29	50	37.58	15.98	135.17
		V201d_8	1680	8.16	56.43	20.65	40	37.33	16.31	128.88
		V201d_9	1570	7.65	55.53	20.48	70	36.65	16.34	124.30
		V201d_10	1580	7.59	54.08	20.82	80	37.01	16.52	124.03
VKS70	30m	V7030m_1	1710	8.40	66.64	20.39	10	37.40	16.58	125.57
		V7030m_2	1210	5.96	46.67	20.34	100	36.37	16.47	120.83
		V7030m_3	1400	6.83	45.89	20.43	0	37.66	16.97	121.92
		V7030m_4	1780	8.78	55.42	20.23	10	37.58	17.33	116.85
		V7030m_5	1650	8.15	57.87	20.26	10	37.01	16.64	122.42
		V7030m_6	1630	7.98	73.43	20.38	30	37.17	16.57	124.32
		V7030m_7	1390	6.83	46.27	20.36	0	37.32	16.53	125.77
		V7030m_8	1530	7.44	55.30	20.58	30	36.84	16.33	125.60
		V7030m_9	1660	8.11	52.79	20.42	0	36.89	16.75	120.24
		V7030m_10	1300	6.29	53.28	20.68	0	36.97	16.28	127.09

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
VKS70	1d	V701d_1	1360	6.66	57.83	20.40	100	36.43	16.56	119.99
		V701d_2	1320	6.48	51.39	20.30	100	37.01	16.64	122.42
		V701d_3	1730	8.52	59.83	20.33	30	35.85	16.48	117.54
		V701d_4	1400	6.94	45.85	20.19	0	37.23	16.94	119.78
		V701d_5	1220	6.03	48.33	20.28	100	35.99	17.13	110.10
		V701d_6	1390	6.90	52.12	20.13	30	34.48	16.14	113.63
		V701d_7	1330	6.60	44.25	20.22	10	36.79	16.37	124.74
		V701d_8	1170	5.77	56.58	20.28	10	36.08	16.27	121.76
		V701d_9	1540	7.60	50.85	20.32	20	36.45	16.28	123.89
		V701d_10	1410	6.85	54.49	20.52	80	37.70	17.39	116.79
B304	30m	B4_1	1270	6.27	45.42	20.35	10	36.52	16.11	126.69
		B4_2	1180	5.69	42.60	20.74	0	36.94	16.46	124.42
		B4_3	1720	8.36	55.78	20.57	0	37.70	17.09	120.60
		B4_4	1270	6.16	39.13	20.68	0	36.97	16.49	124.20
		B4_5	1430	7.07	67.79	20.29	10	37.47	16.81	122.90
		B4_6	1310	6.40	41.99	20.56	0	37.93	17.67	114.66
		B4_7	1380	6.77	49.68	20.38	0	36.80	16.31	125.63
		B4_8	1670	8.12	58.14	20.63	10	37.27	16.42	126.98
		B4_9	1650	8.14	54.24	20.24	0	37.38	17.13	118.21
		B4_10	1660	7.93	57.78	20.99	0	37.00	16.82	119.98

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
B305	30m	B5_1	1380	6.59	50.85	20.89	10	36.98	16.71	121.30
		B5_2	1730	8.19	51.70	21.18	20	37.56	17.08	119.91
		B5_3	1590	7.44	48.88	21.31	0	37.59	17.14	119.31
		B5_4	1400	6.83	46.18	20.54	0	36.84	16.24	126.85
		B5_5	1460	7.01	54.86	20.89	0	36.84	16.56	122.46
		B5_11	1220	5.97	44.85	20.53	0	36.68	16.67	120.04
		B5_7	1590	7.80	63.61	20.36	10	37.30	16.69	123.49
		B5_8	1460	6.96	51.63	20.90	0	36.93	16.38	125.46
		B5_9	1480	7.06	43.36	20.92	0	36.91	16.48	123.97
		B5_10	1430	7.04	49.46	20.37	0	37.29	16.74	122.76
DMSO	30m	DO_1	1290	6.38	47.34	20.29	10	36.91	16.38	125.34
		DO_2	1240	5.97	40.59	20.78	0	37.56	17.37	116.23
		DO_5	913	4.51	45.39	20.23	0	36.99	16.27	127.35
		DO_8	1390	6.80	46.92	20.47	30	36.92	16.54	123.22
		DO_10	999	4.89	37.05	20.45	0	36.99	16.31	126.79
		DO_12	1110	5.41	36.74	20.57	0	37.59	17.13	119.44
		DO_15	1340	6.57	44.72	20.33	0	36.64	16.65	120.06
		DO_16	1230	5.91	32.78	20.76	0	36.99	17.04	117.08
		DO_17	1010	4.92	31.10	20.49	0	37.71	16.56	127.72
		DO_18	1040	5.16	33.95	20.22	0	36.97	16.27	127.23

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
DMF	30m	DF_1	1420	7.00	68.69	20.22	90	36.23	15.89	128.01
		DF_2	1380	6.75	54.14	20.51	100	37.07	16.45	125.35
		DF_3	1630	7.88	53.17	20.71	0	37.14	16.48	125.36
		DF_4	1480	7.18	55.62	20.57	30	36.76	16.49	122.92
		DF_5	1520	7.52	62.54	20.23	100	36.63	16.33	124.31
		DF_6	2180	10.50	76.59	20.71	80	36.62	16.27	125.08
		DF_7	1390	6.73	47.28	20.67	0	37.12	16.69	122.41
		DF_8	1610	7.74	59.21	20.76	20	36.80	16.19	127.30
		DF_9	1870	9.20	60.04	20.33	0	37.22	17.13	117.28
		DF_10	1380	6.58	44.88	20.99	0	36.80	16.42	124.12
DIOXAN	30m	DN_1	1310	6.30	41.70	20.77	0	37.23	16.47	126.05
		DN_2	1010	4.90	48.82	20.53	0	36.95	16.35	125.99
		DN_3	1200	5.89	43.89	20.36	20	37.60	16.60	126.51
		DN_5	1550	7.42	49.97	20.87	0	36.92	16.04	130.17
		DN_6	1040	4.96	33.43	21.03	0	37.10	16.45	125.53
		DN_7	1200	5.90	40.23	20.37	0	37.85	16.77	125.70
		DN_9	1050	5.09	46.29	20.71	0	36.90	16.07	129.62
		DN_10	1430	6.98	45.04	20.54	10	36.98	16.54	123.58
		DN_11	806	3.89	37.90	20.74	0	36.77	16.33	125.17
		DN_12	1740	8.46	87.68	20.55	0	36.67	16.25	125.66

Primer	Einwirkdauer	Proben- bezeichnung	F	T	t _B	b	Holzbruch	Masse ₁	Masse ₀	ω
			[N]	[N/mm ²]	[s]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
ENIMAc	30m	E_5	580	2.85	53.21	20.33	0	38.46	17.47	120.15
		E_6	546	2.68	42.38	20.34	0	37.23	16.68	123.20
		E_7	506	2.49	38.40	20.30	0	37.25	16.33	128.11
		E_8	752	3.70	73.01	20.34	0	37.20	15.98	132.79
		E_9	718	3.56	74.18	20.17	0	37.50	16.42	128.38
		E_11	680	3.34	56.70	20.36	10	36.85	16.24	126.91
		E_12	677	3.32	53.28	20.38	0	37.59	16.52	127.54
		E_13	826	4.11	71.51	20.11	0	37.45	16.75	123.58
		E_14	699	3.44	61.21	20.33	0	36.48	16.17	125.60

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die Zustimmung der Firma zur Verwendung betrieblicher Unterlagen habe ich eingeholt. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder veröffentlicht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Abgabetermin

Unterschrift des Verfassers