
ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Holzphysik
Schafmattstr.6
8093 Zürich

Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds
zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2006.02

Untersuchung zum Verhalten von Ein- komponenten-Polyurethanklebstoffen im niederen Holzfeuchtebereich

ABSCHLUSSBERICHT

Bearbeitungszeitraum 03.2007 – 02.2008

P. Kümmin, P. Niemz

Gesuchsteller: Purbond AG
Geistlich Ligamenta AG
ETH Zürich, IfB, Prof. Dr. Peter Niemz

Zürich, 7. März 2008

Allgemeine Angaben

Diplomarbeit verfasst von
Peter Kümmin

Gruppe Holzphysik
Institut für Baustoffe
D-BAUG
ETH Zürich
Schafmattstr. 6
8093 Zürich-Höngg

Bearbeitungszeitraum
März 2007 bis Februar 2008

Betreuer: Prof. Dr. Ing. habil. Peter Niemz, ETH Zürich
Dr. Ing. Frédéric Pichelin, BFH Architektur, Holz und Bau
Dr. sc. techn. dipl. Ing. Andreas Hurst, BFH, Architektur, Holz und Bau
Dr. Joseph Gabriel, Purbond AG
Urs Fankhauser, Geistlich Ligamenta AG

© 2008

CH 2502 Biel-Bienne

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder über elektronische Systeme verbreitet werden. Die Genehmigung ist bei der Berner Fachhochschule, Abteilung Holz, der ETH Zürich, der Purbond AG und der Geistlich Ligamenta AG einzuholen.

Abstract

Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe werden seit den 90iger Jahren des letzten Jahrhunderts immer weiter verbreitet in der Holzindustrie genutzt. Die Gründe sind vielfältig und reichen von der einfachen Verarbeitung über geringe Auftragsmengen bis zur guten Verklebbarkeit feuchten Holzes. 1K PUR Klebstoffe sind lösemittelfrei.

Die vorliegende Arbeit steht in einer Reihe von Untersuchungen, die am IfB der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit verschiedenen Firmen – hier Purbond und Geistlich Ligamenta – durchgeführt wurden und werden. Heute wird im Ingenieurholzbau und im Elementbau technisch getrocknetes Holz verwendet. Die Fertigungshallen sind im Normalfall beheizt. Dies kann vor allem im Winter zu tiefen Holzfeuchten an der Oberfläche und Fehlverklebungen führen, da die 1K PUR Systeme vor allem mit dem Wasser aus den Fügeteilen vernetzen. Die Verklebung von Holz im tiefen Holzfeuchtebereich $u \leq 8\%$ haben *Beaud* (2005) und *Kägi* (2005) untersucht und dabei bei einzelnen Klebstoffen gute Festigkeiten ($u \geq 4\%$) gefunden.

Es wurden je ein Purbond- und ein Geistlich-Klebstoff mit einem NCO-Gehalt von 12.5-14.5% geprüft. Der Geistlich Klebstoff war gefüllt (China Clay) und mit Fasern verstärkt. Die Klebstoffe waren auf verschiedenen Stufen beschleunigt in einem Bereich von vier bis neunzig Minuten offener Zeit. Die Proben wurden in zehn verschiedenen Klimaten von zehn bis dreissig Grad Celsius und zwanzig bis neunzig Prozent relativer Luftfeuchte verklebt und gelagert. Es resultierten fünf Holzfeuchten von $u=6.5\%$ bis $u=19\%$. Weitere untersuchte Faktoren waren die Presszeit, die Zugabe von Wasser und eine variierte Lagerfolge. Die Untersuchungen umfassen etwas weniger als zweihundert Behandlungen.

Die quasistatischen Prüfungen wurden in Anlehnung an die EN 302.1:2004 durchgeführt. Hauptzielgrösse war die Bruchscherspannung und im geringeren Mass die Verzerrungen. Die Fugen wurden zusätzlich optisch und im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Als Probenmaterial wurde Buche (*Fagus Sylvatica* L.) und im geringeren Mass Fichte (*Picea Abies* (L.) Karst) verwendet. Die Versuche erfolgten in zwei Reihen. Die Versuchsplanung für die zweite Versuchsreihe erfolgte nach einem statistischen Optimierungsverfahren.

Die erreichten Werte für die Bruchscherspannung waren oberhalb einer Holzfeuchte von $u=13\%$ stabil mit leicht fallender Tendenz bei steigender Holzfeuchte. Beide Systeme kamen auf der nächst kleineren Holzfeuchte $u=8\%$ in einen Grenzbereich und reagierten mit grossen Varianzen, sinkenden Mittelwerten und Totalausfällen (langsame Systeme). Bei entsprechenden Faktorstufenkombinationen wurden jedoch auch bessere Werte – bis 18N/mm^2 Mittelwert für die Bruchscherspannung - als bei höheren Holzfeuchten gefunden. Günstig haben sich vor allem eine erhöhte Temperatur (Purbond) und die Zugabe von Wasser (Geistlich) ausgewirkt. Eine trockene Lagerfolge hat sich bei beiden Klebstoffen positiv ausgewirkt, eine feuchte vor allem bei den Geistlich Systemen stark negativ. Die Geistlich Klebstoffe hatten die dickeren Fugen, eine stärkere Tendenz zur Blasenbildung und die grösseren Verzerrungen als die Purbond Klebstoffe. Im tiefen Feuchtebereich wird die genaue Beobachtung und Einhaltung der Prozessparameter unverzichtbar.

English Abstract

The employment of one component polyurethane adhesives (1C PUR) in the wood industry is increasing since the early nineteen nineties. The reasons are manifold and range from an easy application and small quantities per area to a good bonding capability of wood with elevated moisture content. 1C PUR adhesives are solvent free.

The present investigation is part of a succession of past and current investigations carried out by the Group of Wood Physics, Institute of Building Materials at the Federal Institute of Technology Zurich in cooperation with different enterprises – in this case Purbond and Geistlich Ligamenta. Today it is mostly kiln dried timber that is used for engineered or timber frame constructions. Manufacturing facilities are generally heated. Specifically during winter this can lead to a low superficial moisture content in the wood and cause adhesive failure because of the 1C PUR's need of moisture to complete crosslinking. *Beaud* (2005) and *Kägi* (2005) investigated the bonding of wood with reduced moisture content ($\omega \leq 8\%$) and found good or even increasing shear strength ($\omega \geq 4\%$) for some adhesives.

Two adhesives - one Purbond and one Geistlich 1C PUR with an NCO content of 12.5 to 14.5%. – were tested. The Geistlich adhesive was reinforced with fibres and contained a filler (china clay). The adhesive systems were accelerated on different levels in a range from four to ninety minutes open time. The samples were bonded and stored in ten climates – 10 to 30°C and 20 to 90%rh - resulting in 5 levels of moisture content in the wood. Further factors were press time, additional water and varied storage. The investigations comprised a little less than two hundred treatments.

The experiments were carried out in allusion to the EN 302.1:2004. The main target value was the shear strength and to a smaller degree the deformation. The bondlines were also scrutinized with optical and electron microscopes. The material used for the samples was beech (*Fagus Sylvatica* L.) and to a lesser extent spruce (*Picea Abies* (L.) Karst). The tests were divided in two parts, of which one was planned with an optimized design of experiments.

The shear stresses at fracture for moisture contents $\omega \geq 13\%$ were stable with a decreasing tendency for increasing moisture. On the next smaller level of $\omega = 8\%$ both systems met their limits and reacted with great variances, smaller mean values of shear stress or even complete failure (slow systems). Some combinations of factor levels produced though higher fracture resistance – up to a mean of 18N/mm² - than samples bonded with higher moisture content. Elevated temperature (Purbond) and additional water (Geistlich) proved especially favourable. Dry storage was positive for both systems, damp storage specifically negative for the Geistlich adhesives. The Geistlich adhesives showed wider bondlines, a stronger tendency towards bubbles and greater deformation compared with the Purbond systems. Process parameters have to be defined and observed closely when bonding wood of low moisture content with 1C PUR adhesives.

Vorwort

Die Durchführung eines einzigen Projekts während eines ganzen Jahres war eine Herausforderung, die ohne die Mithilfe sehr vieler Leute wohl zu gross gewesen wären. Immer wieder waren Situationen gegeben, in denen ich ohne deren flexible Hilfe nicht mehr weitergekommen wäre.

Ich möchte als erstes meiner Mutter danken, ohne die diese ganze Ausbildung kaum möglich gewesen wäre und meinem Vater, auch wenn er es nicht mehr erleben darf. Herr Prof. Dr. Ing. habil. Peter Niemz danke ich für das Umfeld, das er mir zur Verfügung und die Aufgabe, die er mir anvertraut hat. Die positive und unterstützende Haltung der betreuenden Dozenten Dr. Ing. Frédéric Pichelin und Dr. Ing. Andreas Hurst war immer eine grosse Hilfe.

Die Industriepartner Purbond AG – speziell Dr. Joseph Gabriel – und Geistlich Ligamenta AG – speziell Urs Fankhauser – und die Abteilung Wald des BAFU (Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung) haben die ganze Untersuchung überhaupt erst ermöglicht. Auch für die angenehme Zusammenarbeit möchte ich danken.

Die Arbeit im Team am IfB der ETH Zürich wird mir in guter Erinnerung bleiben. Speziell danken möchte ich Gabriele Peschke für ihre Arbeit mit dem ESEM, Stéphane Croptier unter anderem auch für die Präparierung der Proben, Walter Sonderegger für 1001 Sachen und allen anderen Mitgliedern der Gruppe Holzphysik für die Zeit, die sie immer wieder für mich hatten. Natürlich müssen auch die Leute ausserhalb der eigentlichen Gruppe erwähnt werden, wie Dr. Mandallaz oder Hans-Peter Arm, die wertvolle Beiträge zur vorliegenden Arbeit leisteten.

Die BFH Architektur, Holz und Bau hat mich immer wieder unterstützt mit Rat und Tat. Vor allem zu erwähnen das DPE, deren Klimaräume ich immer wieder unbürokratisch und flexibel nutzen durfte. Auch die Leute vom Labor und der Werkstatt wissen, wie sehr ich auf sie angewiesen war.

Speziell erwähnen möchte ich Martin Lehmann, Daniel Roder, Urs Uehlinger, Martin Iseli, Isabel Engels, Dr. Bettina Huber...die Liste wird zu lang und sicher wird jemand vergessen, also wird sie nicht fortgesetzt.

Es war ein intensives Jahr, einige Ziele wurden erreicht, andere verpasst. Gleichzeitig entstanden neue Möglichkeiten. Ich vertraue darauf, dass unter dem Strich für die Beteiligten nützliche Resultate erarbeitet wurden.

Biel, im Februar 2008

Peter Kümmin

Abkürzungen

In dieser Liste finden sich vor allem speziell in dieser Arbeit verwendete Begriffe. Allgemeine Begriffe, so wie einzelne SI-Einheiten oder Fachausdrücke, werden nicht weiter erläutert. Die Entscheidung darüber wurde subjektiv getroffen.

! Statistische Fachausdrücke werden im statistischen Glossar behandelt und im Text nicht weiter erklärt. Auch statistische Auswertungsverfahren werden nicht erklärt. Für diese sei ebenfalls auf das statistische Glossar verwiesen. !

Abkürzungen der verwendeten Faktoren

KI	Klebstoff
Lf	Lagerfolge (erreichte relative Holzfeuchte)
oT	Offene Zeit des Klebstoffs in min
p	Partialdruck des Wasserdampfs in Pa
Pr	Pressdruck
T	Temperatur
u	Relative Holzfeuchte in % (ω)
Zw	Zusatzwasser

Verzeichnis ausgewählter Abkürzungen

/	Klima T[°C]/rF[%]
1K PUR	Einkomponenten-Polyurethanklebstoff
γ	Gleitung (oder im Kontext Linienspannung)
ε (e)(max)	(Bruch-) Dehnung
τ (tau)(max)	(Bruch-) Scherspannung, Schubspannung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFH	Berner Fachhochschulen (Architektur, Holz und Bau, Biel)
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungsanstalt
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule

F(max)	(Bruch-) Kraft
G	G-Modul, Schubmodul
IfB	Institut für Baustoffe, ETH Zürich
L-Fmax	maximale Verschiebung bei Fmax
MUF	Melaminharnstoffformaldehydklebstoff
PVAc	Polyvinylacetatklebstoff (Weissleim)
UF	Harnstoffformaldehydklebstoff

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	3
ENGLISH ABSTRACT	4
VORWORT	5
ABKÜRZUNGEN	6
INHALTSVERZEICHNIS	8
1 AUSGANGSLAGE	11
2 STAND DER TECHNIK	11
2.1 Holz als Werkstoff	11
2.2 Die Produktion von Brettschichtholz	13
2.3 Grundlagen des Klebens	14
2.4 Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe (1K PUR)	17
2.5 Vorgängeruntersuchungen	21
3 MATERIAL UND METHODEN	23
3.1 Klebstoffe	23
3.2 Holzarten	23
3.3 Prüfverfahren	24
3.4 Kraftmessung (Scherspannung)	26
3.5 Deformationsmessung	28
3.5.1 Verschiebung	28
3.5.2 Zweidimensionale Verzerrungsmessung	30
3.6 Technische Einrichtungen und Software	35
3.7 Versuchsplanung	37
3.7.1 Versuchsreihe 1	37
3.7.2 Versuchsreihe 2	43
4 ERGEBNISSE	49
4.1 Klimatisierung	49
4.2 Fugendicke und –beschaffenheit	51

4.2.1	Auflichtmikroskop	51
4.2.2	ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope)	56
4.3	Zugscherfestigkeit und Verschiebung	60
4.3.1	Massivholzproben	61
4.3.2	Fünf Holzfeuchtestufen	61
4.3.3	Partialdruck	66
4.3.4	Lagerfolgen und Temperatur	68
4.3.4.1	Purbond A1	69
4.3.4.2	Purbond A4	70
4.3.4.3	Purbond A1 und A4	71
4.3.4.4	Geistlich A5	72
4.3.4.5	Geistlich A8	73
4.3.5	Purbond A1 und A4 – Zusatzwasser, Temperatur und Presszeit	74
4.3.6	Holzfeuchte, Temperatur und Presszeit – Purbond Klebstoffe	76
4.3.7	Holzfeuchte, Temperatur, Presszeit und Zusatzwasser - Geistlich Klebstoffe	79
4.3.8	Zusammenfassung der Ergebnisse für die Bruchscherspannung	82
4.3.8.1	Purbond Klebstoffe	83
4.3.8.2	Geistlich Klebstoffe	85
4.4	Vergleiche	86
4.4.1	Faserbruch	86
4.4.2	Verschiebung bis zum Bruch	87
4.4.3	Vergleich Buche-Fichte	89
4.5	Verzerrungsmessung	90
4.6	Schubmodul	94
5	BEURTEILUNG DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK	96
6	STATISTISCHES GLOSSAR	98
7	ANHANG 1	106
7.1	Quellen	106
7.1.1	Literaturverzeichnis	106
7.1.2	Normen	108
7.1.3	Handbücher und technische Anleitungen	109
7.2	Messmittel/technische Einrichtungen	109
8	ANHANG 2	111
8.1	Statistik: Berichte	111
8.1.1	S1	111
8.1.2	S2	112
8.1.3	S3	113
8.1.4	S4	115
8.1.5	S5	116
8.1.6	S6	117
8.1.7	S7	119
8.1.8	S8	120
8.1.9	S9	121
8.1.10	S10	122
8.1.11	S11	128

8.1.12	S12	129
8.1.13	S13	130
8.1.14	S14	131
8.1.15	S15	132
8.1.16	S16	134
8.1.17	S17	136

9 ANHANG 3 138

9.1 Abbildungsverzeichnis 138

9.2 Tabellenverzeichnis 143

1 Ausgangslage

1K PUR Klebstoffe bieten verschiedene Vorteile wie das Wegfallen von Mischprozessen (2K Systeme), einfache Verarbeitung, geringe Auftragsmengen und die Möglichkeit der Verklebung von relativ nassen Hölzern. Ausserdem sind die 1K PUR Klebstoffe lösemittelfrei, chemisch gut beständig und ergeben helle, ästhetische Fugen.

Die Schweiz ist weltweit eines der führenden Länder in der Produktion von 1K PUR Klebstoffen. Die Purbond AG ist vor allem auf dem Gebiet der zertifizierten Klebstoffe tätig und hat 1994 den ersten in Europa zertifizierten 1K PUR Klebstoff auf den Markt gebracht. 2005 gab es 14 zertifizierte Produkte von acht Herstellern.

Die Geistlich Ligamenta AG ist ein breiter abgestütztes Unternehmen der chemischen Industrie. Die 1K PUR Klebstoffe werden vor allem im Elementbau und in handwerklichen Betrieben eingesetzt.

Beide Firmen haben ein Interesse ihre Produkte in einem innovativen Markt weiter zu entwickeln und zu optimieren. Die Gruppe Holzphysik am IfB der ETH Zürich führte in den letzten Jahren verschiedene Untersuchungen auf dem Gebiet der 1K PUR Klebstoffe durch, auch in Zusammenarbeit mit den oben erwähnten Firmen. Heute wird im Ingenieurholzbau und im Elementbau technisch getrocknetes Holz verwendet. Die Fertigungshallen sind im Normalfall beheizt. Dies kann vor allem im Winter zu tiefen Holzfeuchten an der Oberfläche und Fehlverklebungen führen, da die 1K PUR Systeme vor allem mit dem Wasser aus den Fügeteilen vernetzen. In zwei Untersuchungen (*Beaud, Kägi*) wurde eine gute Resistenz einzelner 1K PUR Klebstoffe gegen niedere Holzfeuchten gefunden. Das Verhalten der Klebstoffe sollte im niederen Feuchtebereich weiter untersucht werden. Dazu sollte eine statistisch optimierte Versuchsplanung verwendet werden.

2 Stand der Technik

2.1 Holz als Werkstoff

Durch seinen heterogenen Aufbau und die grosse Variabilität ist Holz ein Werkstoff, der einen immer wieder vor neue Aufgaben stellt. Es sollen hier nur einige Aspekte angesprochen werden, die im Zusammenhang der Untersuchung von Interesse scheinen.

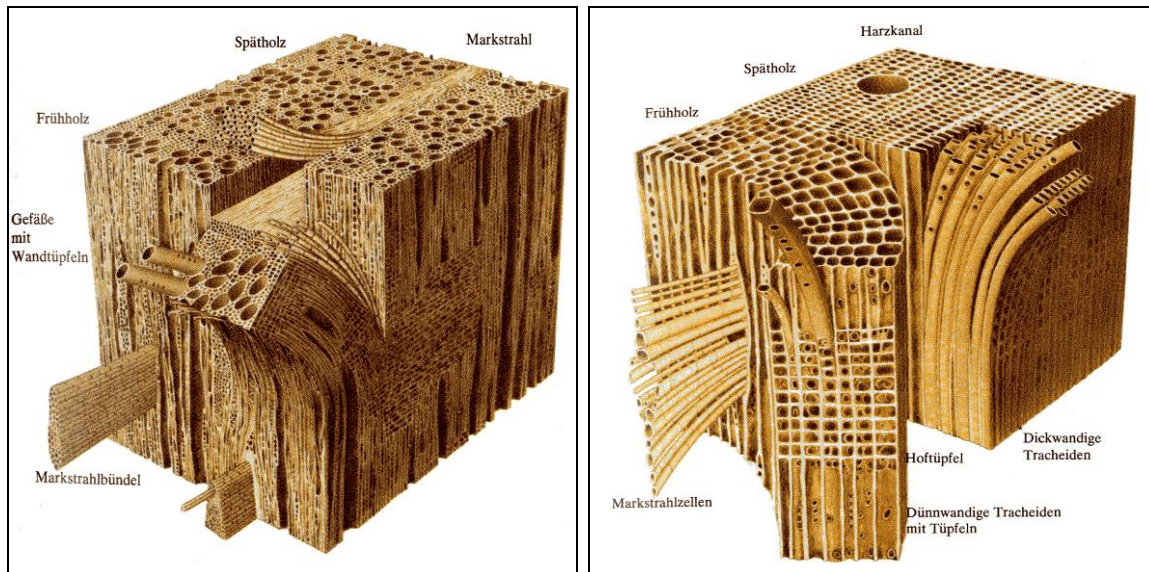


Abbildung 1¹ Mikrostruktur des Holzes, links Buche (*Fagus sylvatica* L.) als zerstreutporiges Laubholz und rechts Föhre (*Pinus sylvestris* L.) als Vertreterin der Nadelhölzer. Links im Bild jeweils der Tangential-, rechts der Radial- und oben der Querschnitt.

Die Beschaffenheit von Holzoberflächen wird vor allem durch die Holzanatomie bestimmt, hinzu kommen Einflüsse durch die mechanische Bearbeitung, d.h. herausgerissene und beschädigte Strukturteile und Messerschritt, sodass sich auch die Holzoberfläche als ungleichmässig und stark variabel darstellt. Holz ist ein anisotroper Werkstoff, welche Eigenschaft sich typisch in seinem Quell- und Schwindverhalten zeigt, das wiederum fast gänzlich auf die Sorption und Desorption von Feuchte zurückzuführen ist. Die Sorptionsmechanismen spielen in der vorliegenden Arbeit aus zwei Gründen eine grosse Rolle. Erstens bei der Klimatisierung der Hölzer und zweitens im Hinblick auf 1K PUR Klebstoffe, die zur Vernetzungsreaktion auf die in den Füge teilen eingelagerte Feuchte zurückgreifen (weiter unten). Der Feuchtegehalt im Holz beeinflusst neben anderen seine mechanischen Eigenschaften. Die maximale Scherfestigkeit wird laut *Niemz*² bei ca. 5% Holzfeuchte erreicht. Bei *Kollmann*³ findet man dazu widersprüchliche Aussagen, es kann jedoch mit einiger Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die Festigkeit ab der Untergrenze ($u=6.5\%$) des untersuchten Holzfeuchtebereichs tendenziell abnimmt. Die Biege- und Zugfestigkeit von Holz hat bei ca. 8% Holzfeuchte ein Maximum. Die Hygroskopie des Holzes ist neben den kapillaren und porösen Strukturen vor allem im chemischen Aufbau zu suchen. Die Chemisorption beruht vor allem auf freien Nebervalenzen im amorphen Bereich des Zellulosegerüsts oder an der Oberfläche der kristallinen Bereiche⁴, wo die Wassermoleküle über Wasserstoffbrücken eingelagert werden. Ab ca. 6% Holzfeuchte beginnt der Bereich der Adsorption. Hier spielen van der Waalsche und elektrostatische Kräfte die Hauptrolle. Über ca. 15% Holzfeuchte beginnt die Kapillarkondensation. Sie beruht auf einem geringeren Sättigungsdruck für den Wasserdampf in den Kapillaren. Die freie Einlagerung spielt im betrachteten Feuchtigkeitsbereich ($6.5 \leq u \leq 19\%$) keine Rolle.

¹ gBHolz S.10

² Niemz S.163

³ Kollmann S.902f

⁴ thBois S.51

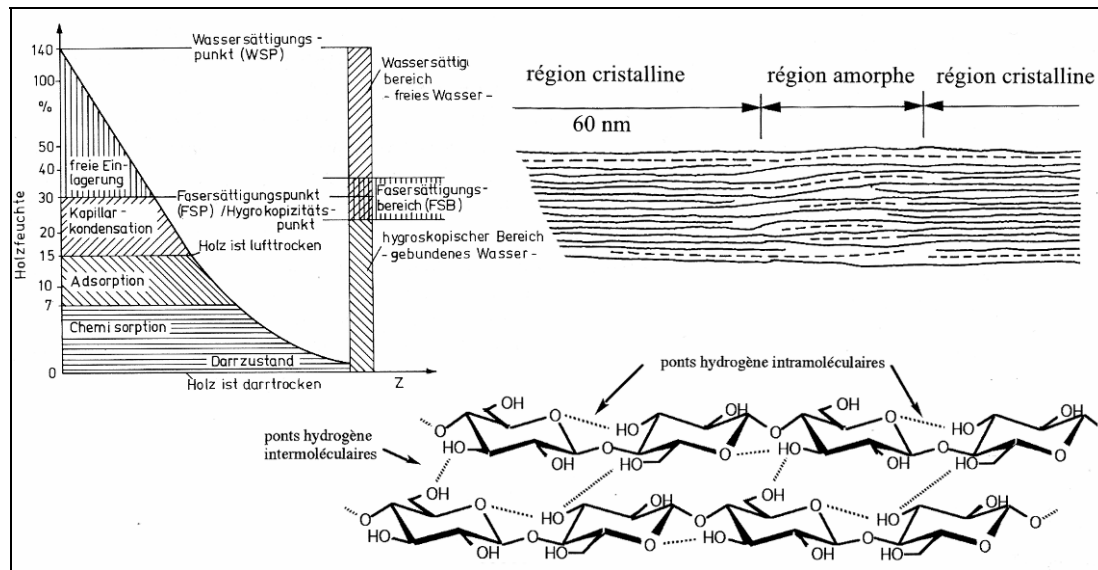


Abbildung 2⁵ oben links Darstellung der Mechanismen der Wassereinlagerung in Holz, unten zwei Zellulosemoleküle mit Wasserstoffbrücken innerhalb und zwischen den Molekülen (kristalliner Bereich) und oben rechts die vereinfachte Darstellung eines amorphen Bereichs zwischen zwei kristallinen Bereichen einer Fibrille.

Neben Zellulosen finden sich im Holz Hemizellulosen, und ein Anteil von 20 bis 30% des weniger hygroskopischen Lignin. Andere Inhaltstoffe kommen in kleineren Mengen vor, können aber die Qualität von Verklebungen wesentlich beeinträchtigen. Im Zusammenhang mit 1K PUR sind vor allem Probleme mit Lärche (*Larix decidua* Mill.) bekannt⁶, die gut auf variierende Mengen von Inhaltstoffen zurückgehen könnten. Diese in physikalischer, chemischer und morphologischer Hinsicht stark variable Fläche bildet nun eigentlich die Grenzschicht zum Klebstoff, wobei der Klebstoff nicht nur durch die Poren in dieses Gefüge eindringt, sondern auch schon in Zellwänden nachgewiesen wurde⁷.

2.2 Die Produktion von Brettschichtholz

Die Produktion von BSH ist exemplarisch für die Verwendung von Klebstoffen in der Holzindustrie. Durch die strengen Qualitätsanforderungen und die starke Regulierung, die sich aus den offensichtlichen Anforderungen an ein statisches System ergeben, rückt die Prozesssicherheit in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit. Die Bestimmungen zur Herstellung von BSH sind in Normen festgehalten, um die Qualität der Produkte zu sichern. Im europäischen Kontext sind dies die *EN 386* für die Herstellung und Prüfung von Brettschichtholz mit den Qualitätsprüfungen *EN 391* und *392* für die Flächenverklebungen und der *EN 385* für die Keilzinkenverbindung. Diese Prüfungen sind Teil einer kontinuierlichen Eigen- und Fremdkontrolle. Auf die Normen zur Holzsortierung wird hier nicht weiter eingegangen, die Normen zu den Klebstoffen werden weiter unten diskutiert. Für Polyurethanklebstoffe ergibt sich das Problem, dass diese Normen für die traditionelleren Amino- und Phenoplaste entwickelt wurden. In diesem Zusammenhang sind vor allem die geforderte Holzfeuchte und -

⁵ Niemz S. 46, thBois S. 25f

⁶ EMPA S.99/110

⁷ Niemz/Mannes S.1 (Anm.: MUF)

temperatur und das geforderte Raumklima während des Verklebens und der Nachhärtung zu erwähnen. Hier müssen wohl für viele Polyurethanklebstoffe engere Anforderungen gestellt werden. Die Anforderungen an Sortierung, Dimensionen und Oberfläche der Lamellen, sowie Verfahrens- und Qualitätssicherungsvorschriften müssen auch für 1K PUR Systeme gelten. In der Schweiz sind es vor allem die *SIA 265* und *265/1*, die sich mit dem BSH beschäftigen. Die *SIA 265* fordert für die Herstellung von tragenden Leimverbindungen Qualitätskontrollen und z.T. vorgängige Verfahrensprüfungen⁸. Die *SIA 265/1* verweist explizit auf die Richtlinien der Schweizer Fachgemeinschaft Holzleimbau⁹ zur BSH-Produktion¹⁰. Die geforderte Mindesttemperatur beträgt 15°C für den Werkstoff wie die Umgebung, die empfohlene Holzfeuchte $u=10\pm 2\%$ und die relative Luftfeuchte 40-75%¹¹. Die EN Normen sind etwas strenger in Bezug auf die Temperatur während des Aushärtens, die Luftfeuchte liegt im gleichen Bereich, während des Aushärtens sind jedoch auch Feuchten oberhalb 30% relativer Luftfeuchte zugelassen. Die Holzfeuchte für unbehandeltes Holz ist $8\leq u\leq 15\%$ und $11\leq u\leq 18\%$ für behandeltes Holz. Weiter müssen natürlich auch die Vorschriften des Klebstoffproduzenten beachtet werden.

2.3 Grundlagen des Klebens

Die Haftmechanismen bei Verklebungen sind zwar vielfältig beschrieben, aber nicht endgültig erforscht. Die erste Erklärung für die Adhäsion war die mechanische Verankerung in der oben (2.1) beschriebenen porösen Oberfläche. Dieser Effekt wird auch heute noch als wesentlicher Anteil der Haftung angesehen.¹² Um eine mechanische Verankerung im Substrat zu erreichen, muss eine genügende Kohäsion im Klebstoff vorhanden sein. Diese kommt je nach Klebstoff auf verschiedene Weisen zustande. Die Ionenbindung spielt bei den verwendeten Polymeren keine Rolle. 1K PUR vernetzt während der Reaktion zu einer dreidimensionalen Struktur. Die Bindungen sind weitgehend kovalent und immer noch sehr stark (Dissoziationsenergie 200-500kJ/mol¹³). Grundsätzlich gilt je höher der Vernetzungsgrad, desto spröder der Klebstoff (duroplastische Eigenschaften). Ein niedriger Vernetzungsgrad bedeutet elastische, quell- und schmelzbare Klebstoffe¹⁴. Die (Makro-) Moleküle können sich ausserdem untereinander ähnlich der Zellulose über Wasserstoffbrücken und van der Waalsche Kräfte verbinden.

⁸ SIA 265 Ziffer 8.3

⁹ <http://www.glulam.ch/>

¹⁰ SIA 265/1 Ziffer 3.4

¹¹ SFH S.4ff

¹² EMPA S.3, Zepp S.6

¹³ Zepp S.20

¹⁴ Zepp S.31

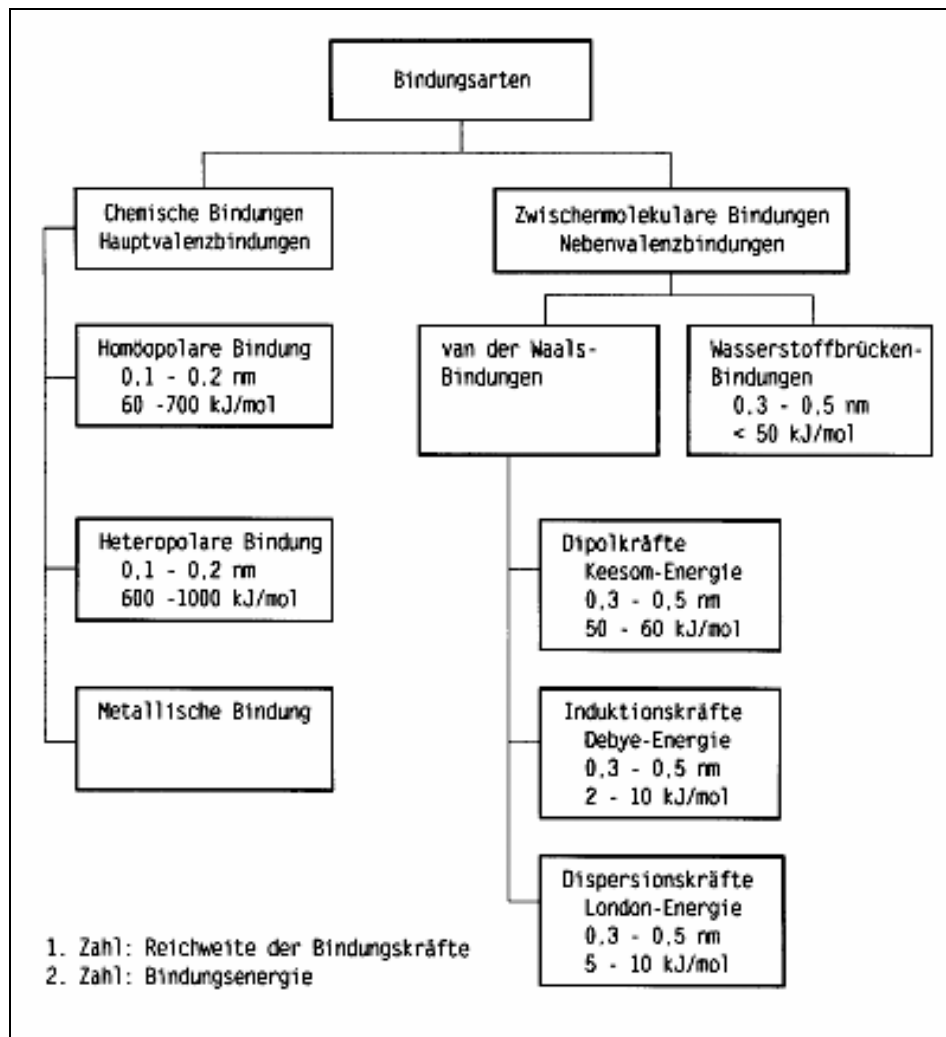


Abbildung 3¹⁵ Darstellung der verschiedenen Bindungskräfte in und zwischen Molekülen und Ionen. Homöopolar meint eine kovalente und heteropolar eine Ionenbindung.

Neben der mechanischen Verankerung im (porösen) Substrat spielen weitere (Adhäsions-) Kräfte eine Rolle. Es wird weiter unten nur eine Auswahl der existierenden Theorien angesprochen. Im Zusammenhang mit 1K PUR werden auch kovalente Bindungen an das Holz diskutiert¹⁶.

Die Theorie¹⁷ der polaren Anziehung führt die Haftung des Klebstoffs auf die Wechselwirkungen zwischen polaren Molekülen zurück. Nach dieser Theorie eignen sich polare Klebstoffe besser für polare Substrate.

Die Diffusionstheorie geht davon aus, dass Moleküle von thermisch oder durch Quellen aktivierten Grenzflächen untereinander vermischen und diese im Idealfall zum Verschwinden bringen können. Die Theorie lässt sich vor allem für Holzklebstoffe anwenden, die dieses zum Quellen bringen. Aktivierte Oberflächen eignen sich aber grundsätzlich besser zum Verkleben. Unter diesem Aspekt muss auch die mechani-

¹⁵ Habenicht S.316

¹⁶ EMPA S.4, Zepp S.16

¹⁷ alle folgenden Adhäsionstheorien aus Zepp S.6ff

sche Bearbeitung gesehen werden, die möglichst kurz vor dem Fügen durchgeführt werden sollte. Auf der anderen Seite beseitigt diese natürlich auch einen Teil des Feuchtegradienten, wenn die Behandlung kurz genug vor dem Verkleben durchgeführt wird.

Die Adsorptionstheorie geht von den Oberflächenenergien der beteiligten Stoffe aus. Da es kein Verfahren zur direkten Messung der Oberflächenenergie gibt, wird die Benetzung des Fügeteils durch den flüssigen Klebstoff über den Randwinkel der entstehenden Tropfen beurteilt.

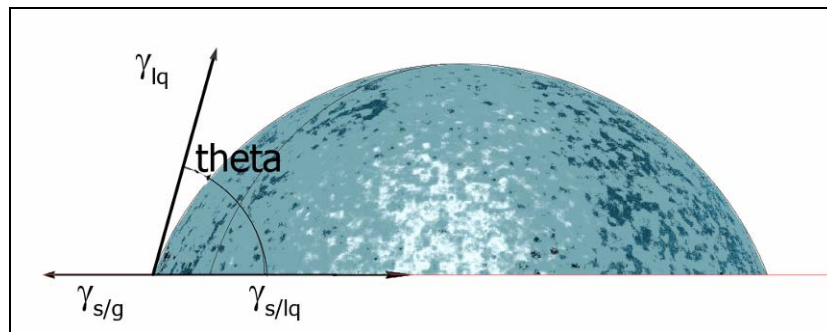


Abbildung 4 Grenzflächenspannungen $\gamma_{s/g}$ (fest/gasförmig), $\gamma_{s/lq}$ (fest/flüssig) und die Oberflächenspannung γ_{lq} (flüssig) und der Randwinkel theta (ϑ). γ ist eine Linienspannung [N/m].

Die Beziehung lautet $W_a = (\gamma_{lq}^d + \gamma_{lq}^p) * (1 + \cos(\vartheta))$, wobei W_a die Adhäsionsarbeit pro Fläche [Nm/m² ergibt N/m]. ist und γ_{lq} in einen dispersen und einen polaren Anteil aufgeteilt wurde. In Verbindung mit Holz kann wegen der Sorption und Rauheit des Substrats nur ein dynamischer Randwinkel bestimmt werden¹⁸.

Chemisorption wird in grenznahen Schichten des Klebstoffs vermutet und wird durch experimentelle Beobachtungen bestätigt. Diese Schichten weisen oft eine grössere als die Klebstofffestigkeit auf. Gleichzeitig kann in diesen Schichten durch die Bindung an das Holz die Vernetzung gestört werden, sodass die Grenzschicht zwar stark ist, doch knapp innerhalb des Klebstoffs eine geschwächte Schicht existiert. Jene ist oft nach so genannten Adhäsionsbrüchen noch nachweisbar.¹⁹

Neben der Klebstoffschicht zwischen den Fügeteilen entsteht in den Randzonen des Substrats durch das mehr oder weniger tiefe und unvollständige Eindringen des Klebstoffs eine Art Verbundwerkstoff. Es ist anzunehmen, dass die entstehenden Übergangsschichten stark unterschiedlich sind und unregelmässig abgegrenzt.

¹⁸ EMPA S.66, Habenicht S.349f

¹⁹ Habenicht S.327ff

2.4 Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe (1K PUR)

Der Name Polyurethan leitet sich von der (polaren) Urethangruppe (-NH-CO-O-) her, die bei der Polyaddition von Isocyanat und Alkohol entsteht. Zur Verkettung werden mindestens Diisocyanate und Diole oder Gruppen mit höheren Funktionalitäten benötigt. Die beteiligten Gruppen sind auf Seiten des Isocyanats die NCO-Gruppen und auf Seiten des Alkohols die Hydroxyl- (OH-) Gruppen.

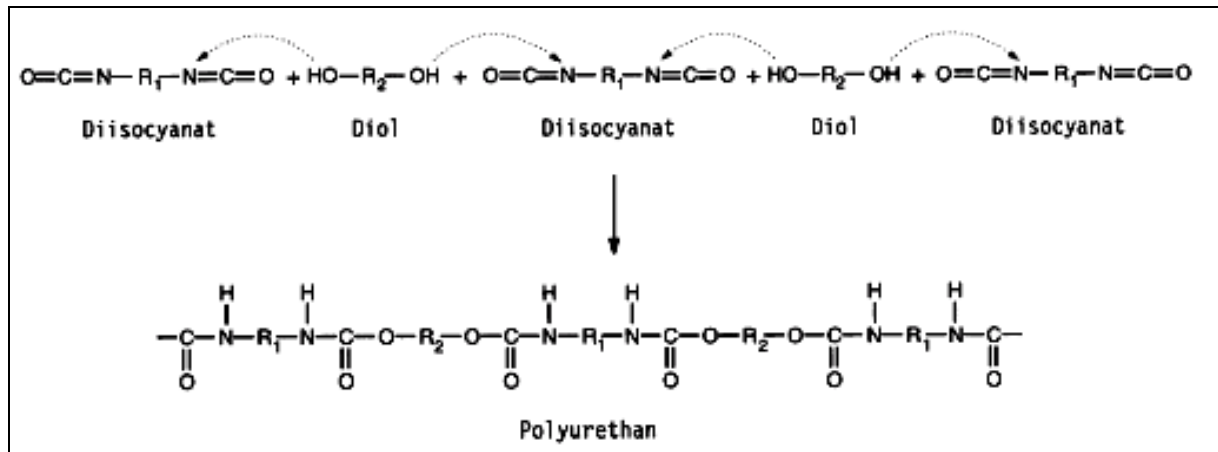


Abbildung 5²⁰ Polyaddition eines linearen Polyurethans aus Diisocyanat und Diol.

²⁰ Habenicht S.93

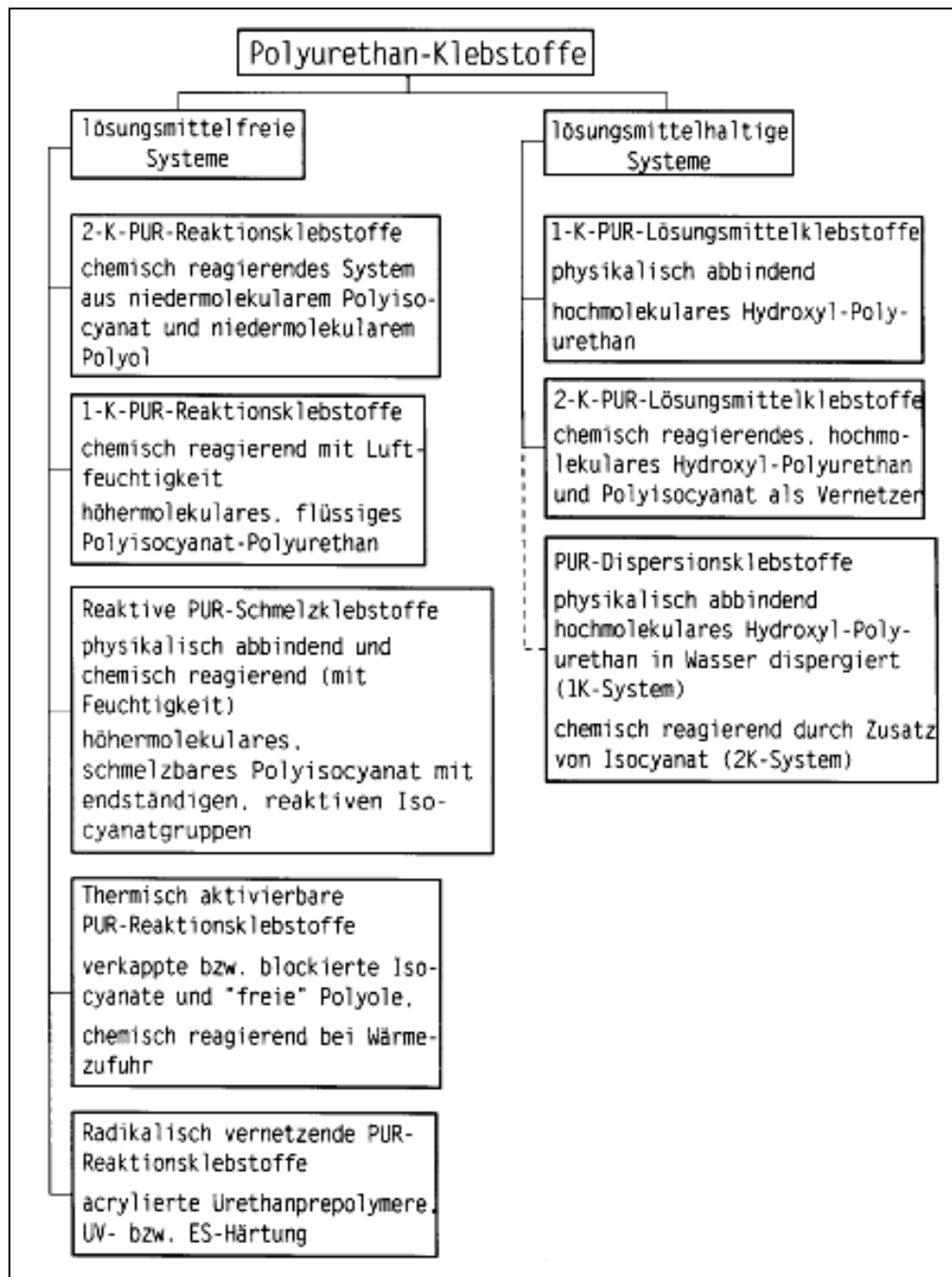


Abbildung 6²¹ Darstellung der verschiedenen Polyurethan-Klebstoffe.

Die 1K PUR Systeme bestehen aus vorvernetzten Prepolymeren, die aus Isocyanaten und höhermolekularen Polyolen unter Isocyanatüberschuss hergestellt werden. Sie besitzen noch randständige NCO-Gruppen und damit die Fähigkeit zum weiteren Vernetzen.

²¹ Habenicht S.105

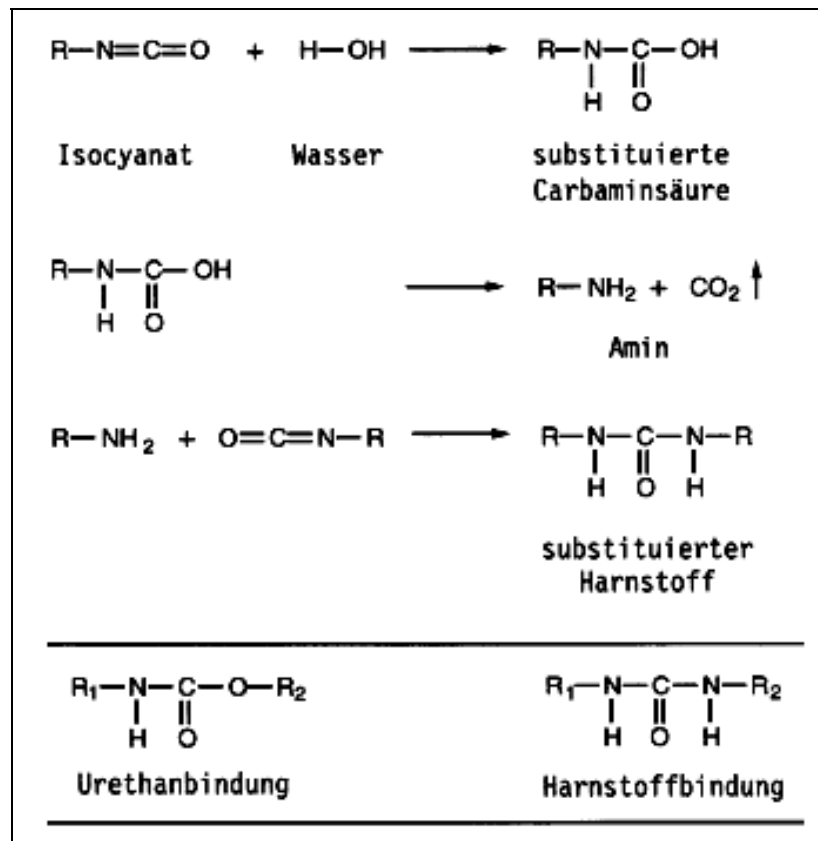


Abbildung 7²² Reaktion eines 1K PUR Klebstoffs unter Einwirkung von Wasser (H₂O) und Abspaltung von Kohlendioxyd (CO₂).

Ein Ansatz zum Beschreiben der Wasseraufnahme und der damit verbundenen Reaktion findet sich in *Cognard*: $z = (2V * P * p * t)^{0.5}$, wobei z die Schichtdicke ist, bis in die sich die Reaktion fortpflanzt, V das Volumen des Klebstoffs, das mit einem Mol Wasser reagiert, P der Permeabilitätskoeffizient, p der Partialdruck des Wasserdampfes und t die Reaktionszeit²³. Das heisst, der Partialdruck p – genauer die Wurzel von p – und nicht die relative Luftfeuchte (Partialdruck/Sättigungsdruck) ist der neben den Materialeigenschaften V und P der entscheidende Faktor für die Feuchtigkeitsaufnahme in den Klebstoff während der offenen Zeit.

Die Abspaltung von CO₂ kann zu unerwünschter Blasenbildung in der Klebschicht und damit zu einer Reduktion der Festigkeit und Erhöhung der Gleitung unter Belastung führen. Begünstigt wird die Blasenbildung durch hohen NCO-Gehalt, durch eine geringe Viskosität und porösen Untergrund²⁴ wie Holz.

Die 1K PUR Klebstoffe werden aus vorvernetzten Prepolymeren hergestellt, vor allem weil die Polymerisation aus niedrigmolekularen Isocyanaten spröde Klebschichten mit schlechter Festigkeit ergibt. Als Polyole werden vor allem Polyesterpolyole (auch Polyetherpolyole) eingesetzt. Wie aus der Abbildung 7 hervorgeht entsteht unter der Wassereinwirkung eine Harnstoffbrücke. Der fertig ausreagierte Klebstoff enthält also

²² Habenicht S.93

²³ Cognard S.188 (Anm.: Untersuchung von feuchtehärtendem PUR Hotmelt, *Comyn* 1998)

²⁴ Habenicht. S.97

Urethan- und Harnstoffbrücken. Ein höherer Harnstoffbrückenanteil ergibt sprödere Klebstoffe. Die NCO-Gruppen haben auch die Möglichkeit, mit Urethan-, Harnstoff-, NH_2 -, NCO- oder eventuell mit Hydroxylgruppen des Holzes reagieren²⁵.

Als Isocyanate werden verschiedene höhermolekulare (geringerer Dampfdruck) Verbindungen gebraucht. Toluoldiisocyanat (TDI) wird aus gesundheitlichen Gründen heute weniger verwendet. Die heute gebräuchlichsten Isocyanate sind Diphenylmethandiisocyanate (MDI)²⁶, die in der Klebstoffproduktion auch gemischt werden.

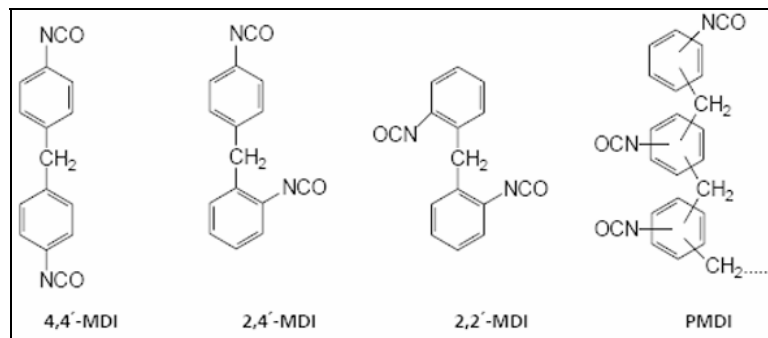


Abbildung 8²⁷ Isomere und Homologe des MDI.

Die Polyurethane haben analog der Zellulose die Möglichkeit, sich in kristallinen, teilkristallinen und amorphen Bereichen zu organisieren. Daraus entsteht ein elastisches Verhalten bei guten Festigkeiten unter mechanischer Belastung.²⁸ Die Klebstoffe können zur Veränderung der Eigenschaften und zum Strecken mit wasserfreien Lösungsmitteln, Verlaufmitteln, Füllstoffen, Antioxydantien, Bakteriziden, Hydrolyseschutzmitteln und Farbstoffen gemischt werden²⁹.

Die Penetration von 1K PUR Klebstoffen ist abhängig vom Pressdruck. Früh- und Spätholzzonen zeigen ebenfalls ein unterschiedliches Verhalten. Unter Praxisbedingungen wird ein Eindringen von 70 μm im Spätholz und 150 μm im Frühholz von Fichte (*Picea Abies* (L.) Karst) beobachtet.³⁰ Beaud hat ebenfalls für Fichte Werte zwischen 20 μm und 180 μm gefunden³¹. In der gleichen Untersuchung wurde kein Zusammenhang von Eindringtiefe und Festigkeit gefunden. Es ist plausibel anzunehmen, dass der Polymerisationsgrad und die Viskosität wie der Faserwinkel zur Klebfläche im Substrat eine Rolle beim Penetrationsverhalten spielen. 1K PUR Klebstoffe zeigen eine geringere Penetration des Substrats im Vergleich mit anderen Klebstoffen³².

²⁵ Schmidheiny S.9

²⁶ Cognard S.187

²⁷ Fraun S.7

²⁸ Cognard S.188

²⁹ Zepp S.179

³⁰ EMPA S.81

³¹ Beaud S.24

³² Niemz/Mannes S.431

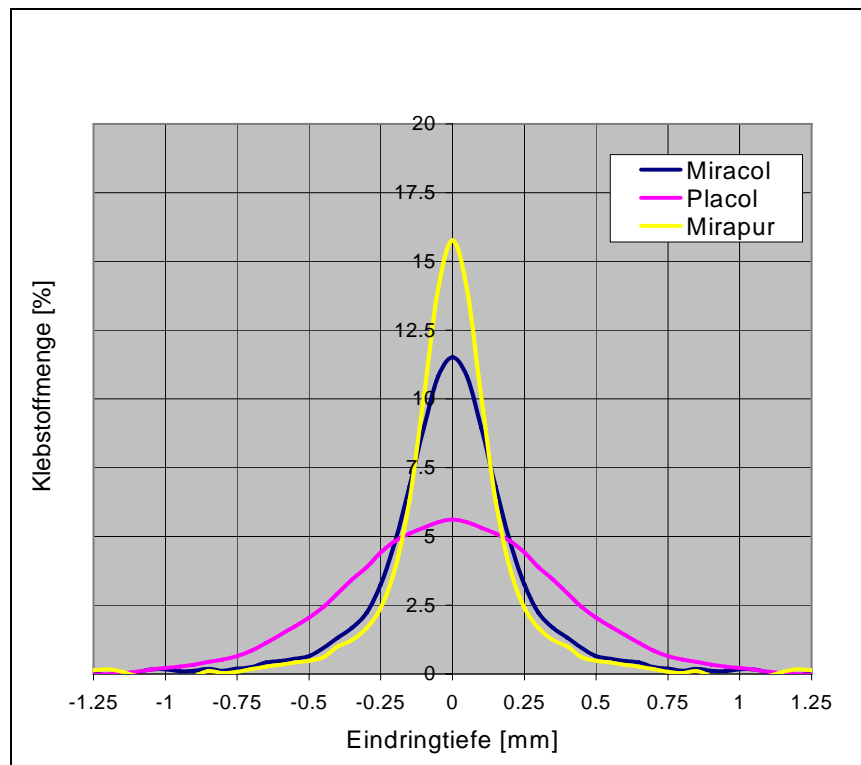


Abbildung 9³³ Eindringtiefe von PVAc (Miracol), UF (Placol) und 1K PUR (Mirapur).

2.5 Vorgängeruntersuchungen³⁴

Die Verklebungen mit 1K PUR sind in ihrer Qualität von vielfältigen Faktoren abhängig. Es soll hier kurz versucht werden, einige Aspekte der vielfältigen Untersuchungen der letzten Jahre zu beleuchten. So wurden am Otto Graf Institut der Universität Hamburg (FMFA) unter anderem Prüfungen zum Langzeitverhalten unter Dauerlast (Kriechen) durchgeführt. In einem 10jährigen Versuch wurden befriedigende Werte gefunden, was sich auch mit den Erfahrungen aus dem Bauwesen deckte. Betont werden die Verfahrensparameter und die Verschiedenheit der 1K PUR Systeme. Speziell erwähnt werden die Fugendicken, die unter 0.3mm bleiben müssen.³⁵

Togni³⁶ hat bei einer Wechselklimalagerung (20/95 – 20/35) keinen Einfluss auf die Scherfestigkeit gefunden. Untersucht wurde ein 1K PUR Klebstoff (Mirapur 9521, offene Zeit 60min.) der Firma Geistlich Ligamenta. Das Wechselklima, das verwendet wurde war eher konservativ.

Ebenso wie das Langzeitverhalten sind die Festigkeitswerte bei (stark) erhöhten Temperaturen, wie z.B. im Brandfall von Interesse. So verlangt der amerikanische Standard ASTM D 7274-06³⁷ eine Prüfung bei 204°C. Allenspach³⁸ hat bei Versuchen am IfB mit drei Purbond Versuchslebstoffen keinen Einfluss der Temperatur (20-

³³ Niemz/Mannes S.431

³⁴ Anm.: Sofern nichts anderes erwähnt ist, wurden die Proben in den Untersuchungen unter Normalbedingungen und mit im Normalklima klimatisiertem Holz verklebt.

³⁵ PurKriechen S.6

³⁶ Togni S.41

³⁷ ASTM (American Society for Testing and Materials) International, 2006

³⁸ Allenspach S.44

150°C) auf die Scherfestigkeit gefunden, wohl aber einen Einfluss des Füllstoffs (Kreide plus ein organischer Füllstoff) auf die Festigkeit, die mit steigendem Kreidgehalt (0, 15 und 30%) zunahm. Josak³⁹ hat 2007 drei 1K PUR Klebstoffe in einem Bereich von 20-220°C geprüft. Purbond HB 110 zeigt ein Abfallen der Scherfestigkeit ab 50°C die sich dann bis 200°C auf dem gleichen Niveau hält. Bei 220°C ist wieder ein signifikanter Rückgang der Werte zu verzeichnen. Purbond HB 181 zeigt ein ähnliches Bild, mit einem eher linearen Abfallen der Werte und einer höheren Festigkeit bei 220°C. Für Dynea Prefere 6000 fallen die Werte leicht von 50°C bis 150°C. Darüber ist ein starker linearer Abfall zu sehen.

Die obigen Faktoren sind umwelt- und zeitbezogen und betrachten eher das Verhalten der verbauten Klebverbindung. Um eine adäquate Ausgangslage für diese Belastungen – qualitativ genügende Klebverbindung - herzustellen, müssen vor allem die Prozessparameter stimmen und kontrolliert sein. Eine EMPA-Untersuchung⁴⁰ beschäftigt sich mit verschiedenen spanabhebenden Verfahren, die die Oberfläche der Füge-teile beeinflussen, der Benetzung und dem Eindringverhalten der Klebstoffe. Es konnten keine einheitlichen Aussagen in Bezug auf die erreichten Scherfestigkeiten gemacht werden. Die gehobelten Proben wiesen aber gegenüber den anderen Verfahren (Rotoles oder geschliffen) tendenziell den kleineren Kontaktwinkel und bessere Scherfestigkeiten auf. Die Proben, die mit Primer verklebt wurden, zeigten nach den Alterungen A2 (Kaltwasser) und A4 (Kochwasser)⁴¹ Werte nahe an den ungealterten Proben, während sonst die Werte signifikant abfielen. Die Delaminierungsprüfung⁴² fiel hingegen für die gehobelten Oberflächen schlecht aus (bei feijnährigem Holz mit grossem Spätholzanteil, was sich negativ auf die Adhäsion auswirken könnte). Verwendet wurden Purbond HB 530 und Purbond HB 110 (faserverstärkt).

Wyss hat unter anderen zwei 1K PUR Klebstoffe - Geistlich Mirapur 9520 und Mirapur 9521 - geprüft. Sie hat bei dickeren Klebfugen (1mm) weniger Holzbruch gefunden als bei Dünneren. Die Fichtenproben, die neben Buchenproben geprüft wurden, ergaben auch bei tiefen Festigkeitswerten schlechtere Resultate ($\tau_{\text{Buche}}=6.6\text{N/mm}^2$, $\tau_{\text{Fichte}}=3.9\text{N/mm}^2$).⁴³

Kägi untersuchte die Purbond Klebstoffe HB 110, HB 181 und HB 221 im tiefen Holzfeuchtebereich $4\% < u < 8\%$. Die offenen Zeiten der Klebstoffe waren 5min (HB 221), 1h (HB 110) und 2h (HB 181). Die erreichten Festigkeiten lagen alle unter dem von der EN 302-1:2004 geforderten Mittelwert von 10N/mm^2 Scherfestigkeit, wobei mit Fichte (vgl. 4.4.3) geprüft wurde. Der in der Untersuchung verwendete Mindest-Mittelwert⁴⁴ von 6N/mm^2 wurde von einzelnen Serien erreicht. Der positive Einfluss von Zusatzwasser blieb auf die Klebstoffsorten HB 181 ($p < 0.0001$) und HB 110 ($p = 0.05$) beschränkt, also in der Reihenfolge der offenen Zeit. Der Einfluss der offenen Wartezeit war signifikant für HB 110 ($p = 0.03$) und HB 221 ($p < 0.0001$). Die Untersuchung von Kägi beschäftigt sich auch mit den klimatischen Bedingungen während der offenen und der Presszeit. Er hat ein Optimum der Luftfeuchte bei 20/50 bis

³⁹ Josak S.22-26

⁴⁰ EMPA Kap. 8-10

⁴¹ DIN EN 302-1

⁴² DIN EN 302-2

⁴³ Wyss S.33 ff

⁴⁴ DIN EN 386:2002, bezieht sich eigentlich auf Einzelwerte und eine andere Prüfvorschrift.

20/65 gefunden. Der Einfluss sinkender Holzfeuchte war im betrachteten Bereich negativ. Auf tiefe Holzfeuchten u reagierten die Klebstoffe verschieden. HB 181 erreicht ein Minimum der Scherfestigkeit bei $u=5\%$ und ein Ansteigen darunter. HB 221 und etwas weniger HB 110 zeigten eine einigermassen indifferente Reaktion auf tiefe Holzfeuchten u.⁴⁵

Beaud hat im tiefen Feuchtebereich bis $u=2\%$ generell fallende Scherfestigkeiten und steigende Varianzen beschrieben. Einzelne Klebstoffe bewiesen jedoch eine erstaunliche Resistenz gegen tiefe Feuchten ($u=4\%$).⁴⁶

3 Material und Methoden

3.1 Klebstoffe

Die beteiligten Firmen Geistlich Ligamenta AG und Purbond AG lieferten je einen auf vier Stufen katalytisch beschleunigten Klebstoff. Die Bezeichnungen A* sind die im Versuchsplan und der Auswertung verwendeten Namen.

Purbond		Geistlich	
	offene Zeit		offene Zeit
A1 VN 3059/4	4min	A5 L 995908.057-4	8min
A2 VN 3059/30	30min	A6 L 995908.057-3	15min
A3 VN 3059/50	50min	L 995908.057-2	nicht verwendet
A4 VN 3059/70	70min	A8 L 995908.057-1	90min

Der Purbond Klebstoff hat einen NCO-Gehalt von 14.5% und eine Viskosität von 20'000 bis 27'000mPas bei einer Dichte von 1.16g/ml⁴⁷. Der Geistlich Klebstoff hat den etwas geringeren NCO-Gehalt von 12.5%. Der Klebstoff besitzt thixotrope Eigenschaften, die je nach wirkenden Scherkräften eine Viskositätskurve $<37'000\text{mPas}$ ⁴⁸ ergeben. Die Dichte liegt bei 1.26g/ml. Der Klebstoff ist gefüllt mit China Clay (Tonerde) und einem Polyamid-Faseranteil mit einem Faserdurchmesser $<30\mu\text{m}$.

3.2 Holzarten

Als Substrat wurde normgemäss⁴⁹ Buche (*Fagus sylvatica* L.) ausgewählt. Dies zum einen wegen der guten mechanischen Eigenschaften, zum andern wegen der weitgehenden Absenz von störenden Extraktstoffen. Um die Klebstoff- und die Fugeneigenschaften zu prüfen, sollte der Holzbruchanteil gering gehalten werden. Zusätzlich wurde in der zweiten Versuchsreihe als typisches Bauholz Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) zur Überprüfung einzelner Werte benutzt. Dazu wurden vor allem Prüfserien ausgewählt, die geringe Festigkeitswerte erwarten liessen, wieder um den Holzbruch gering zu halten. Es wurde möglichst geradfaseriges und fehlerfreies Holz für die Musterherstellung verwendet.

⁴⁵ Kägi S.44 ff

⁴⁶ Beaud S.15

⁴⁷ Brookfield, 20°C. Angaben Purbond 05.02.2008

⁴⁸ Haake RheoWin, 20°C, Angaben Geistlich 16.01.2008

⁴⁹ DIN EN 302-1:2004

Buche				Extraktstoffe	
physikalische und mechanische Eigenschaften					
Darrdichte	r ₀	0.64 - 0.72	g/cm ³	Benzol-Alkohol Auszug	0.8*
Schwindmass	längs	0.3	%	Heisswasser Auszug	1.8 - 1.9
	radial	ca. 5.8	%		
	tangential	ca. 11.8	%		
	Volumen	14 - 21	%		
Diff. Schwindmass	radial	0.19 - 0.22	%/%		
	tangential	0.38 - 0.44	%/%		
Biege E-Modul	E	12.3 - 16.4	kN/mm ²		
Druckfestigkeit	σ _{dB}	52 - 64	N/mm ²		
Zugfestigkeit	σ _{zB}	100 - 135	N/mm ²		
Biegefestigkeit	σ _{bB}	90 - 125	N/mm ²		
Scherfestigkeit	τ _B	7.7 - 10	N/mm ²		
Fichte				Extraktstoffe	
physikalische und mechanische Eigenschaften					
Darrdichte	r ₀	0.3 - 0.64	g/cm ³	Benzol-Alkohol Auszug	ca. 2.3
Schwindmass	längs	0.3	%	Heisswasser Auszug	-
	radial	ca. 3.6	%		
	tangential	ca. 7.8	%		
	Volumen	ca. 11.7	%		
Diff. Schwindmass	radial	0.15 - 0.19	%/%		
	tangential	0.27 - 0.36	%/%		
Biege E-Modul	E	10 -12	kN/mm ²		
Druckfestigkeit	σ _{dB}	40 -50	N/mm ²		
Zugfestigkeit	σ _{zB}	80 - 90	N/mm ²		
Biegefestigkeit	σ _{bB}	65 - 77	N/mm ²		
Scherfestigkeit	τ _B	5.0 - 7.5	N/mm ²		

Tabelle 1 Ausgewählte physikalische, mechanische und chemische Eigenschaften von Buchen- und Fichtenholz.⁵⁰ *⁵¹

3.3 Prüfverfahren⁵²

Die Prüfungen wurden in Anlehnung an die *DIN EN 302-1:2004* ‚Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit‘ durchgeführt. Laut SIA 265 ist meistens die Scherfestigkeit einer flächigen Verklebung massgebend⁵³. Das Prüfverfahren ist jedoch nicht geeignet zur Ermittlung charakteristischer Werte von Klebverbindungen. Es erlaubt aber den Vergleich der erreichten Festigkeiten und der Klebstoffe untereinander. Die Mindestanforderung an die Bruchschersfestigkeit aus zehn gültigen Proben ist ein Mittelwert $\geq 10\text{N/mm}^2$.⁵⁴ Eine vergleichbare Grösse (Scherspannung) liefert die Qualitätsprüfung für Brett-schichtholz nach *DIN EN 392:1995* mittels einer Blockscherprüfung (Druck statt Zug). Die Forderungen dort sind ein Minimum von 6N/mm^2 Bruchspannung (darf für Nadelhölzer bei 100% Holzbruch unterschritten werden) für die Einzelwerte und ein Mindestholzbruchanteil abhängig von der Bruchscherspannung⁵⁵. Diese Normen stel-

⁵⁰ Gfeller/Zürcher

⁵¹ Gfeller

⁵² DIN EN 302-1:2004

⁵³ SIA 265 Ziffer 6.11.3.1

⁵⁴ DIN EN 301:2006 S.6

⁵⁵ DIN EN 386:2002 S.7/8

len keine Anforderungen an das elastische und plastische Verhalten des Klebverbunds, sondern nur an die erreichten Bruchscherspannungen (und Holzbruch). Zum Vergleich der Festigkeitswerte wurden zusätzlich zu den Buchenmustern Fichtenmuster hergestellt.

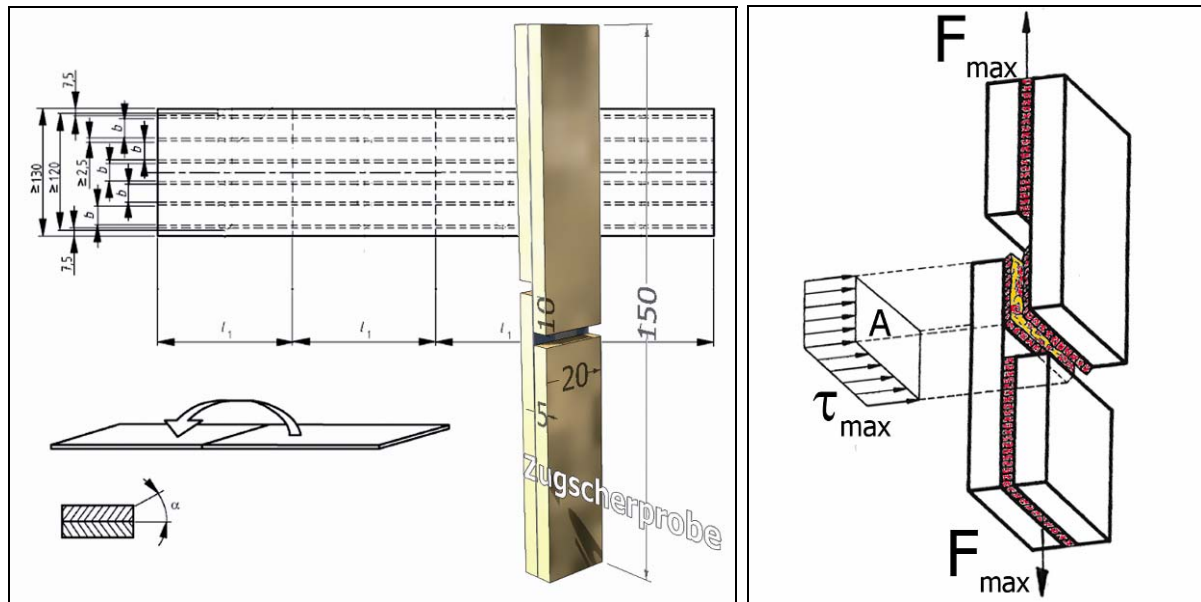


Abbildung 10 Links⁵⁶ schematische Darstellung der Prüfkörperherstellung. Das Brett für die Prüfkörper wird mittig getrennt und überschlagen zum Verkleben. Rechts⁵⁷ Prinzip der Prüfung mit dem Kräftepaar F (F_{\max}) und dem Resultat Bruchscherspannung τ_{\max} (F_{\max}/A).

Die in der Norm angegebenen Dimensionen für die Bretter ergeben zwei mal fünf Probenkörper. Ebenso fordert sie zehn gültige Ergebnisse für die Auswertung. Der Zielwert für beide Grössen wurde in der vorliegenden Untersuchung aus praktischen Gründen⁵⁸ auf mindestens acht Proben pro Serie reduziert. Ebenso wurde der seitliche Mindestabstand längs zur Faser von 7.5mm vom ersten Probenkörper zum Bretttrand manchmal unterschritten, um die Mindestanzahl von acht Probenkörpern zu erreichen. Die Lagerung nach dem Verkleben im Normalklima wurde nicht eingehalten, da das jeweilige Ausgleichklima für die untersuchten Holzfeuchten aufrecht erhalten sollte⁵⁹, um die Sorptionsvorgänge im Holz möglichst gering zu halten. Die Behandlungen (A1 bis A5) wurden demnach vor der Scherprüfung nicht durchgeführt. Die Bretter wurden, wie in der Norm gefordert, maximal 24h vor dem Verkleben gehobelt und nach dem Verkleben mindestens 7 Tage gelagert bis zur Prüfung. Der geforderte Jahrringwinkel von $\alpha > 30^\circ$ (Abbildung 10) wurde angestrebt, aber nicht immer erfüllt. Laufende Untersuchungen an der ETH Zürich haben unter vergleichbaren Prüfbedingungen keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Jahrringwinkel und erreichten Festigkeitswerten gezeigt.⁶⁰ Die erforderliche Rohdichte ($u = 12 \pm 1\%$, $700 \pm 50 \text{ kg/m}^3$) des Substrats (*Fagus Sylvatica* L.) konnte ebenfalls nicht genau eingehalten werden. Man findet in der Literatur Angaben, die einen Zusam-

⁵⁶ z.T. aus DIN EN 302-1:2004 S.5

⁵⁷ Habenicht S.412

⁵⁸ Anm.: Grosser Versuchsumfang und Ausnutzung des Holzes.

⁵⁹ Anm.: Mit Ausnahme der Lagerfolgen auf der Stufe $u = 13.5\%$.

⁶⁰ Müller S.15

menhang zwischen der Holzdichte und der erreichten Scherfestigkeit herstellen⁶¹, plausibel scheint dies aber erst bei hohen Holzbruchanteilen.

Die DIN EN 302-1 ist Teil einer Reihe von Normen, die zum Vergleich von Klebstoffen dienen, die im tragenden Bereich eingesetzt werden sollen. 302-2 beschreibt die Delaminierungsbeständigkeit, -3 den Einfluss von Säureschädigung, -4 den Einfluss der Holzschwindung, -5 (Vornorm ENV 302-5:2001) dient der Ermittlung der Antrockenzeit, -6 der Mindestpresszeit und -7 der Bestimmung der Gebrauchsdauer. In jeder der erwähnten Normen wird explizit darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse nicht direkt auf Produktionsverfahren und Bemessungsgrundlagen übertragen werden dürfen und in erster Linie dem Vergleich der Klebstoffe dienen.

3.4 Kraftmessung (Scherspannung)

Die verwendeten Klemmbacken waren nicht gelenkig mit der Prüfmaschine⁶² verbunden. Die dadurch entstehenden Momentbelastungen dürften jedoch gering geblieben sein, da die Formgenauigkeit der Prüfkörper sehr gut war. Dies konnte parallel zu den Klebfugen am Videoextensometerbildschirm überprüft werden. Die Prüfgeschwindigkeit wurde über den Traversenweg geregelt, was vor allem wegen dem grossen Weg – die verwendeten keilförmigen Klemmbacken bauen zwar zusätzlichen Druck auf, wenn der Probenkörper sich relativ bewegen will, legen dadurch jedoch selber Weg zurück. Ein Schlupf des Probenkörpers ist ebenfalls nicht auszuschliessen. Eine Regelung über die Gleitung wäre zwar möglich, aber zu aufwändig. Die Traversengeschwindigkeit wurde nach einigen Probelaufen auf 2mm/min festgesetzt. Die Kraftmessung erfolgt durch die Kraftmessdose der Prüfmaschine und kann in der Prüfsoftware als Scherspannung τ ausgegeben werden. Diese berechnet sich Kraft durch Klebfläche $\tau = F/A$, wobei die Klebfläche für jede Probe gemessen wurde, um eventuelle Differenzen in den Probendimensionen nicht wirksam werden zu lassen. Dieses Modell ist stark vereinfacht und wird in der Abbildung unten links dargestellt. Die Abbildung unten rechts stellt ein weiter entwickeltes Modell vor, das die Dehnung der Fügeteile, die vom Beginn bis zum Ende der Überlappung linear abnehmen sollte, mit berücksichtigt.⁶³

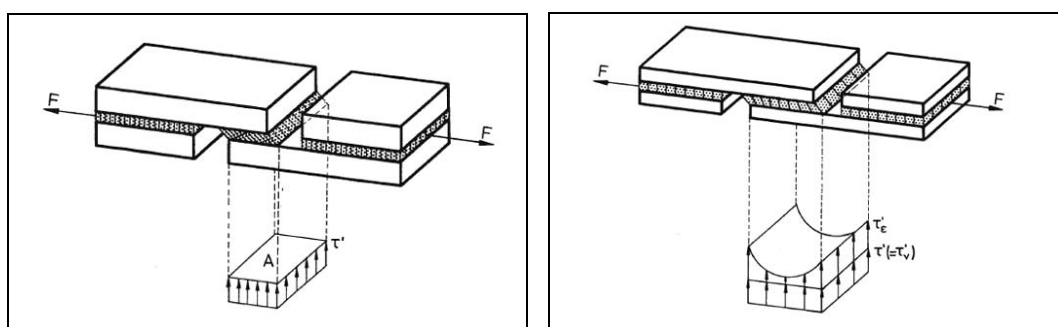


Abbildung 11⁶⁴ links Spannungsverteilung mit ideal steifen Fügeteilen, rechts unter Berücksichtigung einer elastischen Dehnung der Fügeteile.

⁶¹ Zepp S.47

⁶² M Zwick

⁶³ Habenicht S.412ff

⁶⁴ Habenicht S.412/415

Nach diesem Modell entstehen an den Enden der Überlappungslänge Spannungsspitzen, die über dem Niveau der verwendeten mittleren Spannung liegen. Bei plastischen Klebstoffeigenschaften werden diese Spannungsspitzen wieder abgeschwächt. Es existieren verschiedene Ansätze zur Berechnung des Verhältnisses von τ (gemittelt) und τ_{\max} (Spannungsspitze), sie sind aber aufwändig und erfordern die Kenntnis von Materialkennwerten wie dem Schubmodul des Klebstoffs und dem E-Modul der Fügeteile. Eine möglichst gleichmässige Spannungsverteilung wird bei einem Verhältnis nahe eins von τ_{\max}/τ erreicht. Eine Näherung an die Spannungsverteilung ist nach

Volkersen⁶⁵ $\frac{\tau_{\max}}{\tau} = \sqrt{\frac{Gl_u^2}{2Esd}} \coth \sqrt{\frac{Gl_u^2}{2Esd}}$, wobei G das Schubmodul des Klebstoffs, l_u

die Überlappungslänge, E das E-Modul des Substrats, s die Dicke der Fügeteile und d die Schichtdicke des Klebstoffs bezeichnet. Bei konstanten l_u , s und d muss G/E möglichst klein werden für eine möglichst gleichmässige Spannungsverteilung. Bei Verklebungen von BSH werden jedoch schubfeste Klebstoffschichten verlangt und das Verhältnis von Schub- und E-Modul ist wesentlich ungünstiger als bei den in *Habenicht* betrachteten Metallverklebungen.⁶⁶

Die ermittelten Scherspannungen τ weichen je nach Prüfvorschrift voneinander ab. So sind z.B. Werte, die mit einem Verdrehversuch (ISO 10033-1) ermittelt werden, höher als bei (einschnittigen) Zugscherproben⁶⁷. Dies wegen der oben beschriebenen Fügeteildehnung und dem Eintreten eines Biegemoments durch die Probenkörperverformung während der Prüfung. Trotz der annähernd symmetrischen Probengeometrie und der zentralen Krafteinleitung kann eine leichte Drehbewegung beobachtet werden. Gemessen wurden zwischen 0.7° und 1.3° ⁶⁸. Hieraus entsteht eine (kleine) Normalbelastung der Klebfuge.

⁶⁵ Habenicht S.450

⁶⁶ Habenicht S.450ff

⁶⁷ Habenicht S.783f

⁶⁸ analSYS Five, Olympus soft imaging solutions

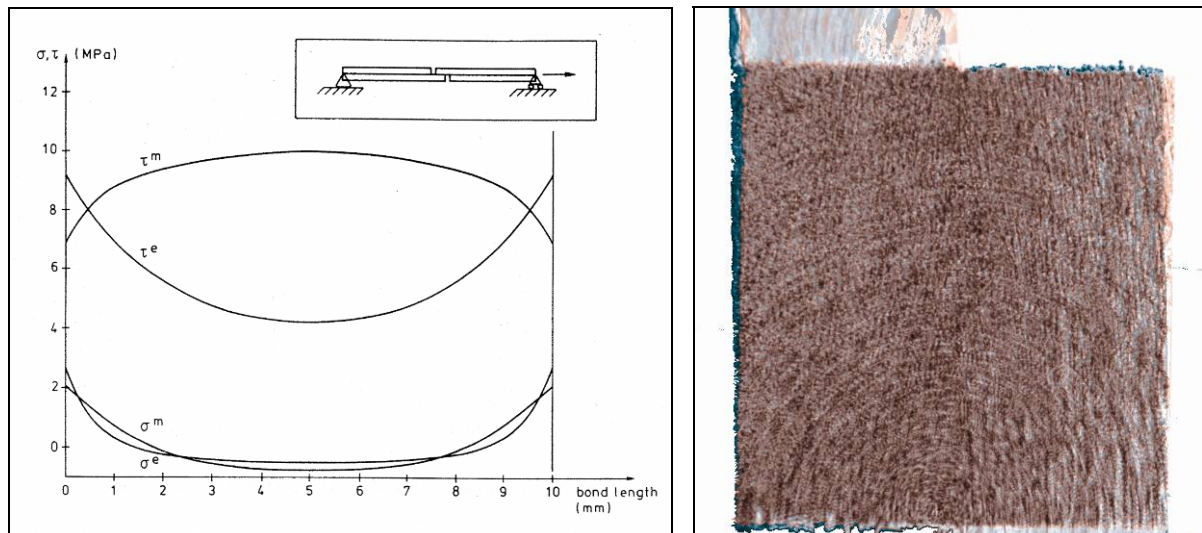


Abbildung 12 Links⁶⁹ Normal- und Schubspannungsverteilung in einem Prüfkörper nach DIN EN 302-1:2004 bei 1120N (elastischer ^e) und 1870N (maximaler ^m) Belastung. Rechts Drehbewegung im Bereich der Überlappung (Zugrichtung senkrecht). Das Bild⁷⁰ wurde unten an der Klebfuge zusammengefügt. Blau ist unbelastet, rot belastet.

Die erreichte mittlere Festigkeit τ hängt weiter von der Überlappungslänge, der Füge-teildicke und der Klebschichtdicke ab. Die mittels Zugscherprobe ermittelten Werte können nicht als Rechenwerte verwendet werden⁷¹ und dienen vor allem als Vergleichszahlen.

3.5 Deformationsmessung

3.5.1 Verschiebung

Die Messung mit dem Videoextensometer⁷² ist ein optisches Messverfahren, das schwarz-weiß Kontraste über die Pixelposition und deren Grauwerte (256 Stufen) Koordinaten zuordnet. Im verwendeten Verfahren wurden auf der Schmalseite der Probenkörper schwarz-weiße Streifen an den Fugenenden angebracht. Diese wurden leicht schräg⁷³ angebracht und nur auf dem durchlaufenden Teil der Probe befestigt, um die volle Relativbewegung aufzunehmen. Die Software erkennt auf dem Bildschirm in einem bezeichneten Bereich von links nach rechts hell-dunkle Flanken. Die Auswertung geschieht zeilenweise und wird gemittelt. Die Software erkennt nicht nur die Lage der betreffenden Pixel, sondern kann über den Grauwert mit einem Algorithmus die Lage der Messmarke innerhalb des Pixels berechnen. Die 640 (x480) Pixel pro Zeile werden so theoretisch noch einmal 256mal aufgelöst, was zu einer Auflösung von über 130'000 (17bit) pro Zeile führt⁷⁴. In der Abbildung unten beträgt das Gesichtsfeld ca. 37mm (x27mm), was zu einer theoretischen Auflösung am Probenkörper von etwas weniger als 0.3 μ m entspricht. Die Anzahl Auswertezellen um eine Mittellinie (Fuge) kann bestimmt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde sie auf 30 festgelegt, gleichzeitig wurde eine dynamische Reduktion ab 0.1% Verschiebung um

⁶⁹ COST2 S.78

⁷⁰ Vic Snap

⁷¹ DIN EN 302-1:2004 S.4

⁷² MExt

⁷³ Ext S.46

⁷⁴ Ext S.4

20 Zeilen/% bestimmt, um mit der Messung möglichst nahe bei der untersuchten Fuge zu bleiben. Die Kurvenglättung geschah mittels Regression über 25 Datenpunkte.

Die Messung der Verschiebung e (e wurde beibehalten, da die *Zwick Software*⁷⁵ in der verwendeten Prüfvorschrift diese Bezeichnung für die Längenänderung vorgab) wurde nur in Zugrichtung durchgeführt und wurde in Prozent aufgenommen. Sie rechnet sich $e = \left(\frac{l_1 - l_0}{l_0} \right) * 100$ mit l_1 Messlänge im Spannungszustand und l_0 im Ruhezustand.

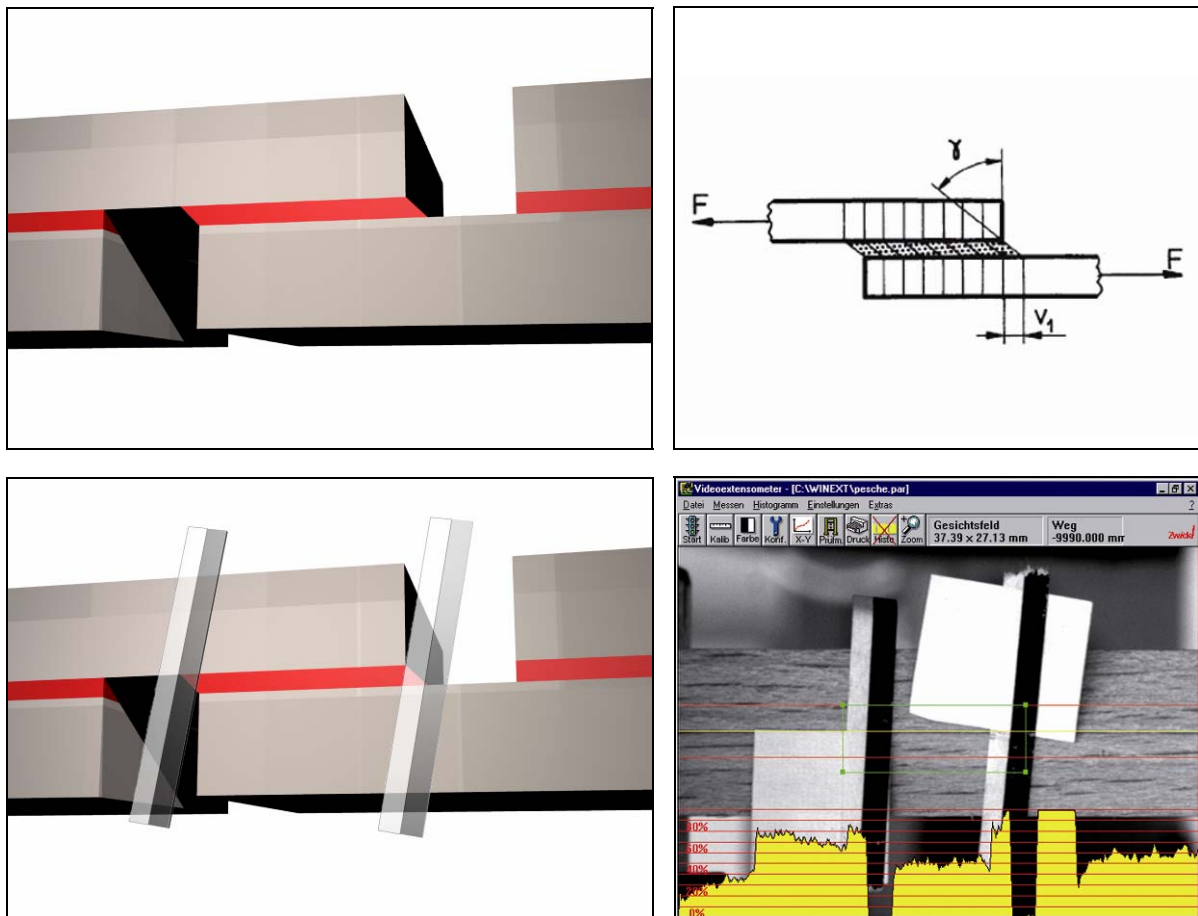


Abbildung 13 Links schematische Zugscherprobe in belastetem Zustand. Die Klebstofffuge ist überproportional dargestellt, unten mit der Position der Messmarken. Rechts unten die Ansicht auf der Bildschirmausgabe des Videoextensometers (mit Histogramm). Rechts oben Darstellung der Gleitung (Schubverformung) nach *Habenicht*⁷⁶.

Nach *Habenicht* wird die Verformung in der Literatur verschieden angegeben. Als Gleitung $\tan \gamma$ (Quotient aus v Verschiebung (vgl. Abbildung oben) und d Fugendicke), als Prozentangabe des obigen Quotienten oder als absoluter Wert der Verschiebung v . Mit diesen Angaben kann ein Schubmodul gerechnet werden (weiter unten).

⁷⁵ testXpert V11.02

⁷⁶ Habenicht S.268

3.5.2 Zweidimensionale Verzerrungsmessung

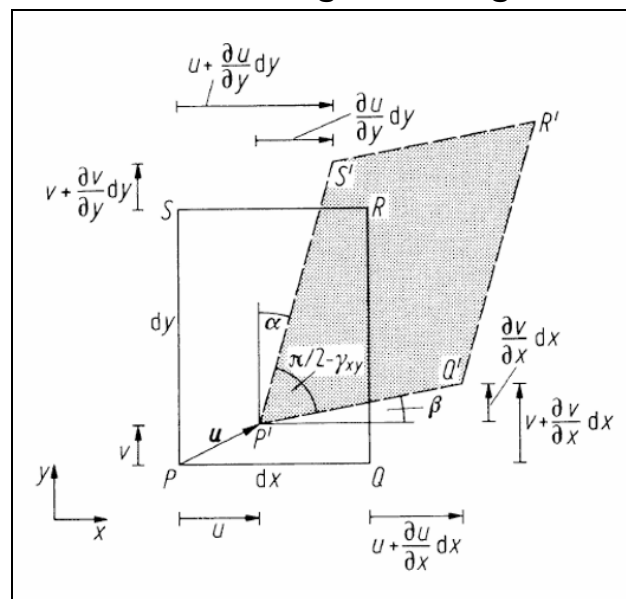


Abbildung 14 Schematische Darstellung des ebenen Verzerrungszustands.¹⁷

Die oben dargestellten Verformungen, d.h. die Verschiebungen u und v , die Dehnungen $\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x}$ ¹⁸ und $\varepsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y}$ die Gleitung $\gamma_{xy} = \alpha + \beta$ (oder $\gamma_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x}$). Der Zusammenhang zum Schubmodul G besteht in $\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$, wobei τ_{xy} die Schubspannung in xy ist.¹⁹

Bei ausgewählten Versuchsreihen (konstant: 13.5% Holzfeuchte, Presszeit und variabel: Temperatur und Lagerfolge) wurde zusätzlich zum Videoextensometer ein digitales Bildkorrelationsverfahren eingesetzt.

¹⁷ Gross2 S.57

¹⁸ Anm.: $\frac{\delta}{\delta x}$ ist die partielle Ableitung nach x

¹⁹ Gross2 S.57ff

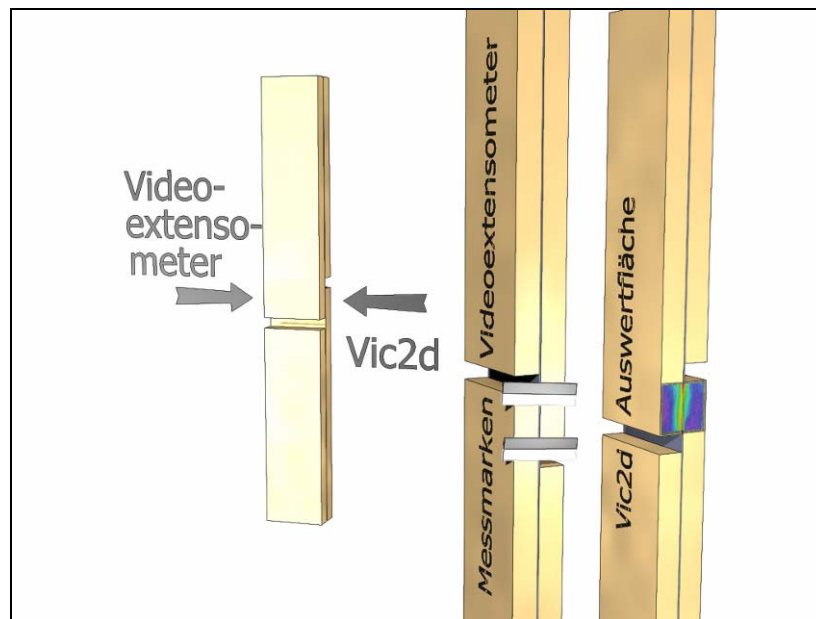


Abbildung 15 Die Videoextensometermessung und die Verformungsmessung mit Vic 2D wurde mit Blickrichtung auf die Klebefuge von der jeweils gegenüberliegenden Seite durchgeführt. Es muss wegen der Heterogenität der Materialien ein unterschiedliches Verhalten auf der jeweiligen Seite erwartet werden, die Anordnung musste jedoch so gewählt werden, weil beide Messgeräte normal zur ausgewerteten Fläche stehen müssen.

Dieses Verfahren, Vic 2D⁸⁰ (Video Image Correlation) der Firma Limes, basiert auf der Korrelation eines Musters, das auf die Probenoberfläche aufgebracht wird, im spannungsfreien Zustand mit den Mustern, die sich im Spannungszustand ergeben. Dieses Muster – Speckle Pattern - sollte möglichst hohe Kontraste und unregelmässige Formen, aber doch eine einigermaßen einheitliche Grösse aufweisen. Zudem sollte es die Verzerrungen des Probenkörpers mitmachen können, ohne zu reißen oder diesen zu stark zu beeinflussen. Zum Aufbringen des Musters wurde eine Airbrush Spritzanlage und Acryl-Wasserlack verwendet. Die Korrelationsalgorithmen beruhen wiederum wie beim Videoextensometer auf einer Grauwertanalyse der Pixel. Die Musterung wird im Folgenden speckle pattern genannt.

⁸⁰ M Vic 2D

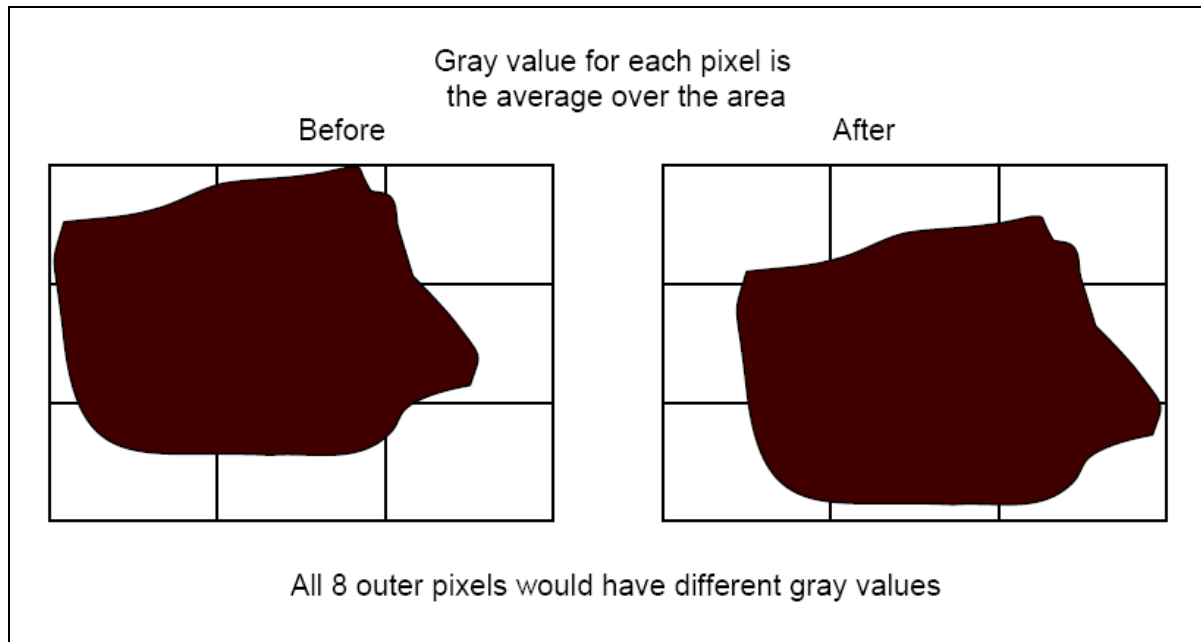


Abbildung 16⁸¹ gutes Pixel/Speckle Pattern Verhältnis und daraus resultierende Grauwerte.

Für qualitativ gute Bilder müssen einige weitere Voraussetzungen erfüllt sein: Die Aufnahmefrequenz muss der Prüfgeschwindigkeit und dem Weg angepasst sein. Die gewählten Frequenzen waren 2, 5 und 10Hz. Die betrachtete Fläche muss wie auch die gemessenen Effekte planar sein. Die Kamera soll zur untersuchten Fläche normal ausgerichtet sein. Die Beleuchtung (Kaltlicht) ist gleichmässig und schattenfrei zu halten. Reflexionen wirken sich störend aus.

Die berechneten Verzerrungen werden im Vic 2D folgendermassen dargestellt. Die Verschiebung u und v mit $u(x, y) = u_0 + u_x x + u_y y$, wobei u_0 die Verschiebung des Punktes in x und $u_x x$ und $u_y y$ analog Abbildung 14 $\frac{\delta u}{\delta x} dx$ und $\frac{\delta u}{\delta y} dy$ die Dehnung in x . Die Berechnung für v ist sinngemäss. Die Dehnungen berechnen sich gemäss dem Lagrange Tensor $\varepsilon_{xx} = u_x + 0.5(u_x^2 + v_x^2)$ und $\varepsilon_{yy} = v_y + 0.5(u_y^2 + v_y^2)$. Die Gleitung ε_{xy} entspricht $\frac{1}{2}\gamma_{xy}$ im Verzerrungstensor $\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix}$.⁸²

Diese Werte können über Auswertungspunkte, -linien oder -felder als .txt-Datei aus dem Vic 2D entnommen werden und in andere Programme wie Microsoft Excel importiert werden. Eine qualitative Darstellung wird über Falschfarben angeboten.

⁸¹ experimental2d S.26

⁸² DIC-basics2 S.23/24

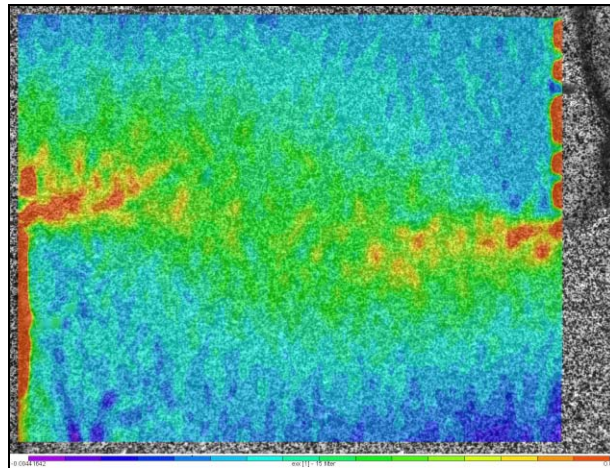


Abbildung 17 Darstellung der Dehnung e_{xx} in Zugrichtung, die roten vertikalen Bereiche sind schon im Bereich der Nut⁸³ des Probenkörpers. Schön zu sehen ist die leicht diagonale Verteilung der Dehnung und die Maxima links und rechts an der Fuge.

Ebenso müssen die Parameter bei der Auswertung so eingestellt werden, dass sie den Voraussetzungen entsprechen. Zu erwähnen sind hier vor allem das Subset und der step. Das Subset entspricht einer Auswertereinheit, innerhalb derer über die Verschiebung des Speckle Pattern die Verschiebung des Zentrums und schliesslich die Dehnung und Gleitung berechnet wird. Ein grosses Subset bedeutet eine geringere Auflösung, weniger Rauschen und höhere Rechenzeit, ein kleines Subset die gegenteilige Tendenz⁸⁴. Gleichzeitig muss die Grösse, wie oben (Abbildung 16) gezeigt, auf die Specklegrösse abgestimmt sein. Der Step ist das Mass, um das das Subset für jeden Auswertungsschritt weiterbewegt wird. Ein kleiner Step bewirkt auch wieder eine bessere Auflösung und höhere Rechenzeit. Eine Synchronisation mit der Kraftmessung auf der *Zwick* wurde nicht durchgeführt, d.h. eventuelle Berechnungen, die den Werten Laststufen zuordnen, müssen ungefähr bleiben. Die Synchronisation wurde unterlassen, da sie nach mündlicher Auskunft von an früheren Projekten Beteiligten aufwändig und die Ergebnisse nicht befriedigend waren.

⁸³ Mit 1-2mm Acryl gefüllt, um die Korrelation bis an den Rand der Klebfuge zu ermöglichen.

⁸⁴ DIC-basics2 S.22

Vergleich unter ausgesuchten Auswertungsparametern aus dem Vic2d - Dehnung in x (Zugrichtung) Purbond VN 3059/70 - 13.5% Holzfeuchte - 20°C/65%rF - 100% Presszeit - (C3F2E2A4_3)

rechts: Dehnung in Zugrichtung (exx)

Subset 17 (Step 3)

Mittelwert „0“: 0.0055

Mittelwert „X“: 0.0054

unten: graphischer Vergleich entlang verschiedener
Auswertungslinien aus den Vic2d-Darstellungen

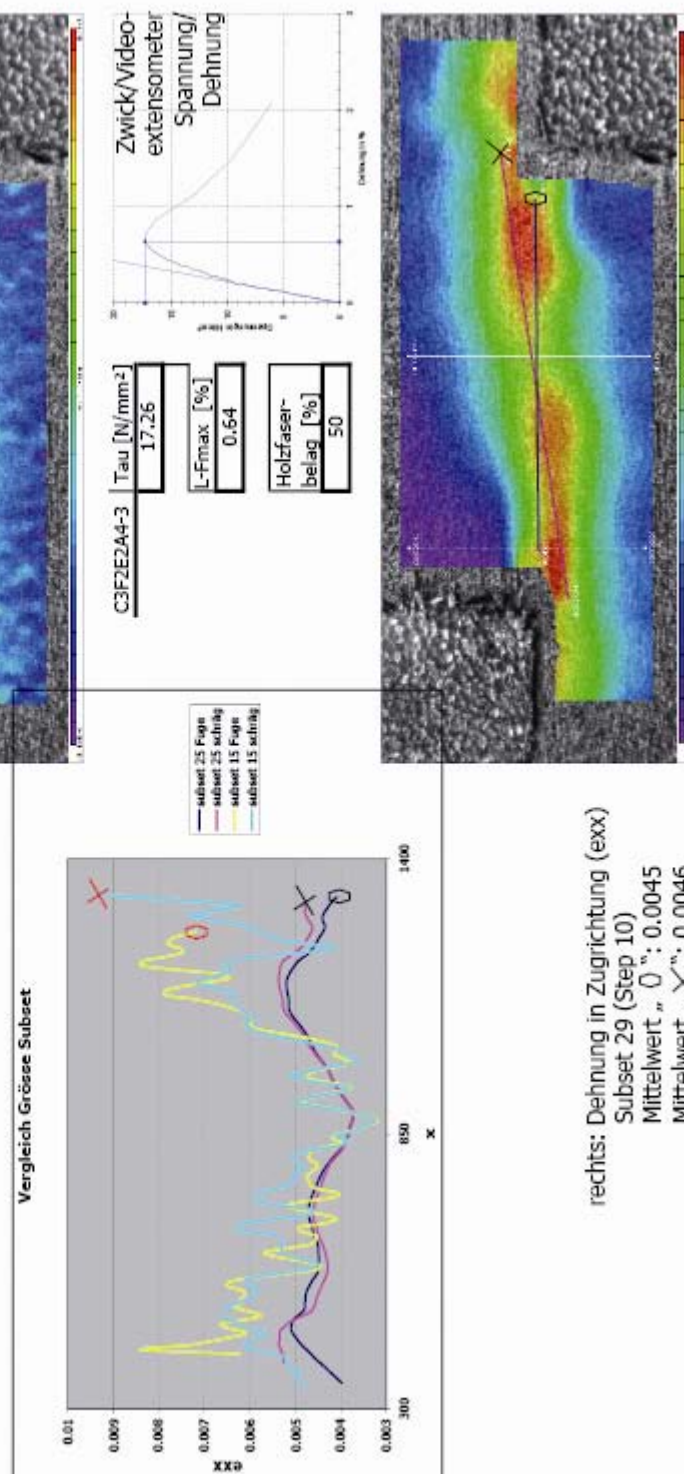


Abbildung 18 Darstellung der Differenz verschiedener Auswerteparameter. Es wurden jeweils zwei Auswertezeilen in die Region mit der höchsten Dehnung ϵ_{xx} (Zugrichtung) gelegt.

Weitere bildgebende Verfahren zur Beurteilung der Klebfuge sollten an ausgewählten Proben zur Anwendung gelangen. Die wichtigsten Grössen, die hier beurteilt werden sollten sind die Fugendicke, die Bildung, Grösse und Verteilung von Blasen und eventuell das Eindringverhalten. Verwendet wurden ein *ESEM*⁸⁵ (Environmental Scanning Electron Microscope), das im Gegensatz zum REM (Rasterelektronenmikroskop) kein Hochvakuum für den Probenraum benötigt und so vor allem für Proben mit Feuchtegehalt geeignet ist. Die Proben müssen zur Herstellung einer geeigneten Oberfläche mit dem Mikrotom geschnitten und gegen die statische Aufladung durch den Elektronenbeschuss vergoldet werden. Weiter wurden zur Bestimmung der Klebschichtdicke ein *Auflichtmikroskop*⁸⁶ und zur Darstellung der Bruchbilder eine *Stereolupe*⁸⁷ verwendet.

Dimensionsmessungen an den Prüfkörpern wurden mit verschiedenen Schieblehren⁸⁸ durchgeführt. Ebenso erfolgten die Gewichtsmessungen auf mehreren Waagen⁸⁹. Die Gewichtsmessungen für die Auftragsmengen in den Klimakammern erwiesen sich in der benötigten Genauigkeit als sehr schwierig wegen der Erschütterungen, auf die die Piezo-Kristalle in den Waagen sehr empfindlich reagieren. Es wurde versucht, möglichst wiederholbar zu arbeiten, um die Ungenauigkeit in der Messung aufzufangen. Vor allem die Zusatzwassermenge muss als Verhältniszahl und nicht als absolute Menge betrachtet werden.

3.6 Technische Einrichtungen und Software

Da die Umgebungsbedingungen während dem Verkleben kontrolliert sein sollten, wurde mit einer mobilen Presse in den jeweiligen Ausgleichsklimaten gepresst. Hierzu wurden die Klimaräume am IfB der ETH Zürich (Tabelle 3) und verschiedene Klimakammern an der BFH Architektur, Holz und Bau in Biel benutzt⁹⁰.



Laborpresse KaePress 001

technische Daten

Pressfläche	400*400	mm ²
max. Druck	180	bar
max. spez. Druck	0.8	N/mm ²
max. Hub	300	mm

Abbildung 19⁹¹ Mobile Laborpresse der Firma Purbond. Der maximale spezifische Druck bezieht sich auf die gesamte Pressfläche.

⁸⁵ M ESEM

⁸⁶ M Auflichtmikroskop

⁸⁷ M Stereolupe

⁸⁸ div. Schieblehren Mitutoyo

⁸⁹ div. Laborwaagen Mettler Toledo

⁹⁰ M Klima

⁹¹ Kägi S.31

Die Presse war durch ein Versagen des Kondensators und das resultierende Schmelzen der Wicklung des Elektromotors für eine Zeit nicht zu gebrauchen. In das geflickte Gerät wurde ein Motorschutzschalter eingebaut. Da die Klimäräume in Biel jeweils nur für einen begrenzten Zeitraum zur Verfügung standen, wurde eine Presse improvisiert.



Abbildung 20 Links die improvisierte Presse mit Kraftmessdose und Ausgabe des Pressdrucks auf dem PC-Bildschirm (Catman) in der Klimakammer. Rechts auf der Aussenseite der Klimakammer die Gleichstromspeisung für die Kraftmessdose, der Spider 8⁹² Messverstärker und das PC-Laufwerk.

Ein Hydraulikzylinder mit nominell 45kN Pressdruck wurde in einen Stahlrahmen gestellt. Die Pressfläche bestand aus je zwei übereinander angeordneten Stahlplatten. Zwischen die oberen Platten wurden Holzblöcke als Abstandhalter gelegt. Die Kraft wurde über einen Stahlzylinder ($d=30\text{mm}$, $h=20\text{mm}$) über eine Kraftmessdose und Grundplatte auf den Rahmen zurückgegeben. Der Pressdruck konnte so während des Pressens kontrolliert werden. Die Gruppen bei 10 und 30°C der Versuchsreihe 1 wurden mit dieser Einrichtung hergestellt.

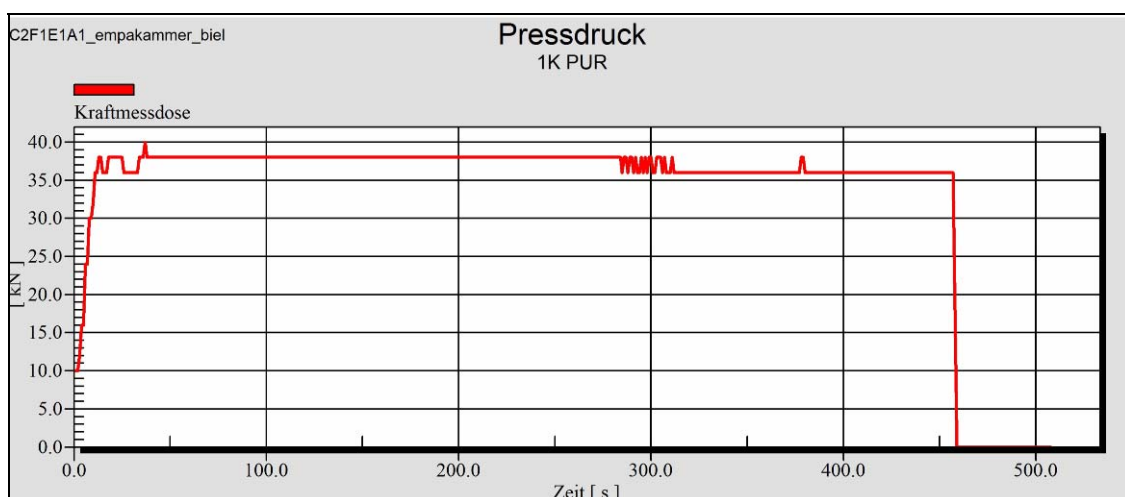


Abbildung 21 Typischer Druckverlauf während dem Pressen. Bei längeren Presszeiten konnte mit einer weiteren Stufe nach unten gerechnet werden.

⁹² Hottinger Baldwin Messtechnik

Der Druckverlauf der ursprünglichen Presse wurde in einem Versuch bei 100bar aufgezeichnet. Beide Pressen zeigten ein Abfallen des Druckes kurz nach dem Pressbeginn. Dieser Abfall wurde möglichst kompensiert, d.h. der Anfangsdruck wurde etwas erhöht.

Zur Klimatisierung des Holzes vor dem Verkleben und zur Lagerung der Probenkörper bis zur Prüfung wurden mehrere Klimaschränke⁹³ in Zürich und Biel benutzt. Die Klimaten wurden mit diversen Klimaloggern⁹⁴ kontrolliert.

Die Schreinerarbeiten wurden ebenfalls in Zürich und Biel auf verschiedenen konventionellen Maschinen mit den gängigen Einstellungen erledigt.

Die verwendete Software ist für	Berichte	Microsoft Office 2003
	Daten/Auswertung	Minitab 15
		Microsoft Excel 2003
	Diagramme	Minitab 15
		Mathcad 14
		Microsoft Excel 2003
	Graphik	Adobe Creative Suite CS2
		Rhino 3.0.

Die den einzelnen Mess- und Prüfverfahren zugeordnete Software ist im Anhang erwähnt.

3.7 Versuchsplanung

Die gelieferten Klebstoffe weisen zwar einen vergleichbaren NCO-Gehalt auf, für die gefüllten Klebstoffe mussten jedoch wegen der hochviskosen Eigenschaften modifizierte Prepolymere verwendet werden, was die direkte Vergleichbarkeit unter den Klebstoffen stark verminderte. Aus diesen Überlegungen wurden für die Hersteller Geistlich und Purbond getrennte Versuchspläne erstellt.

Der Zielwert für die Probenzahl pro Behandlung wurde auf zehn festgelegt⁹⁵. Da die Ausnutzung des Holzes sehr schlecht geworden wäre und angesichts des grossen Versuchsumfanges wurde auf die genaue Umsetzung der Norm verzichtet und acht als minimale Probenzahl pro Gruppe angestrebt. Grössere Umfänge wurden desgleichen zugelassen.

3.7.1 Versuchsreihe 1

Von beiden Herstellern wurde jeweils der Klebstoff mit der kleinsten und der grössten offenen Zeit ausgewählt, um die Effekte bei gleichzeitig minimalem Versuchsumfang möglichst deutlich zu machen.

⁹³ M Klima

⁹⁴ M Klimalogger

⁹⁵ DIN EN 302-1:2004

(Versuchsreihe 1.1) In einem ersten Schritt wurde versucht, die Klebstoffe in einem fünfstufigen Bereich von leicht unter bis leicht über der normalerweise für 1K PUR empfohlenen Holzfeuchte⁹⁶ (6% - 19% statt 8% bis 15%⁹⁷) zu beschreiben.

StdRfolge	Klebstoff	Blöcke	oT [min]	u [%]
1	Purbond	1	4	6.5
2	Purbond	1	4	8
3	Purbond	1	4	13.5
4	Purbond	1	4	17
5	Purbond	1	4	19
6	Purbond	1	70	6.5
7	Purbond	1	70	8
8	Purbond	1	70	13.5
9	Purbond	1	70	17
10	Purbond	1	70	19
11	Geistlich	1	8	6.5
12	Geistlich	1	8	8
13	Geistlich	1	8	13.5
14	Geistlich	1	8	17
15	Geistlich	1	8	19
16	Geistlich	1	90	6.5
17	Geistlich	1	90	8
18	Geistlich	1	90	13.5
19	Geistlich	1	90	17
20	Geistlich	1	90	19

Tabelle 2 Versuchsmatrix Versuchsreihe 1.1

Die Holzfeuchte u galt mit Erreichen der Gewichtskonstanz⁹⁸ als gewährleistet und unmittelbar vor dem Verkleben beim Fertighobeln stichprobenartig mittels Darrprobe festgestellt. Die jeweiligen Ausgleichsklimaten stimmen nur asymptotisch mit der Holzfeuchte überein. Sie wurden, sofern nicht anders erwähnt, während dem Konditionieren, dem Klebvorgang und der Lagerung nach dem Kleben aufrechterhalten. Dies wegen der Ausgangslage der vorliegenden Arbeit, die von zu trockenen Fertigungshallen ausgeht, d.h. einem Klima, das eher der Ausgleichsfeuchte des für den Versuch klimatisierten Holzes entspricht oder trockener ist. Im feuchten Bereich wurde dieses Vorgehen übernommen.

Die Faktoren u und Lf ergeben sich aus den entsprechenden Ausgleichsklimaten. Die höheren Holzfeuchten ergeben sich aus den vorhandenen Klimaräumen am IfB der ETH Zürich.

⁹⁶ Anm: Für die Mirapur Klebstoffe von Geistlich wird in den Datenblättern ein Holzfeuchtebereich zwischen 6 und 18% angegeben.

⁹⁷ DIN EN 386:2002

⁹⁸ Δ Masse < 0.1%/d

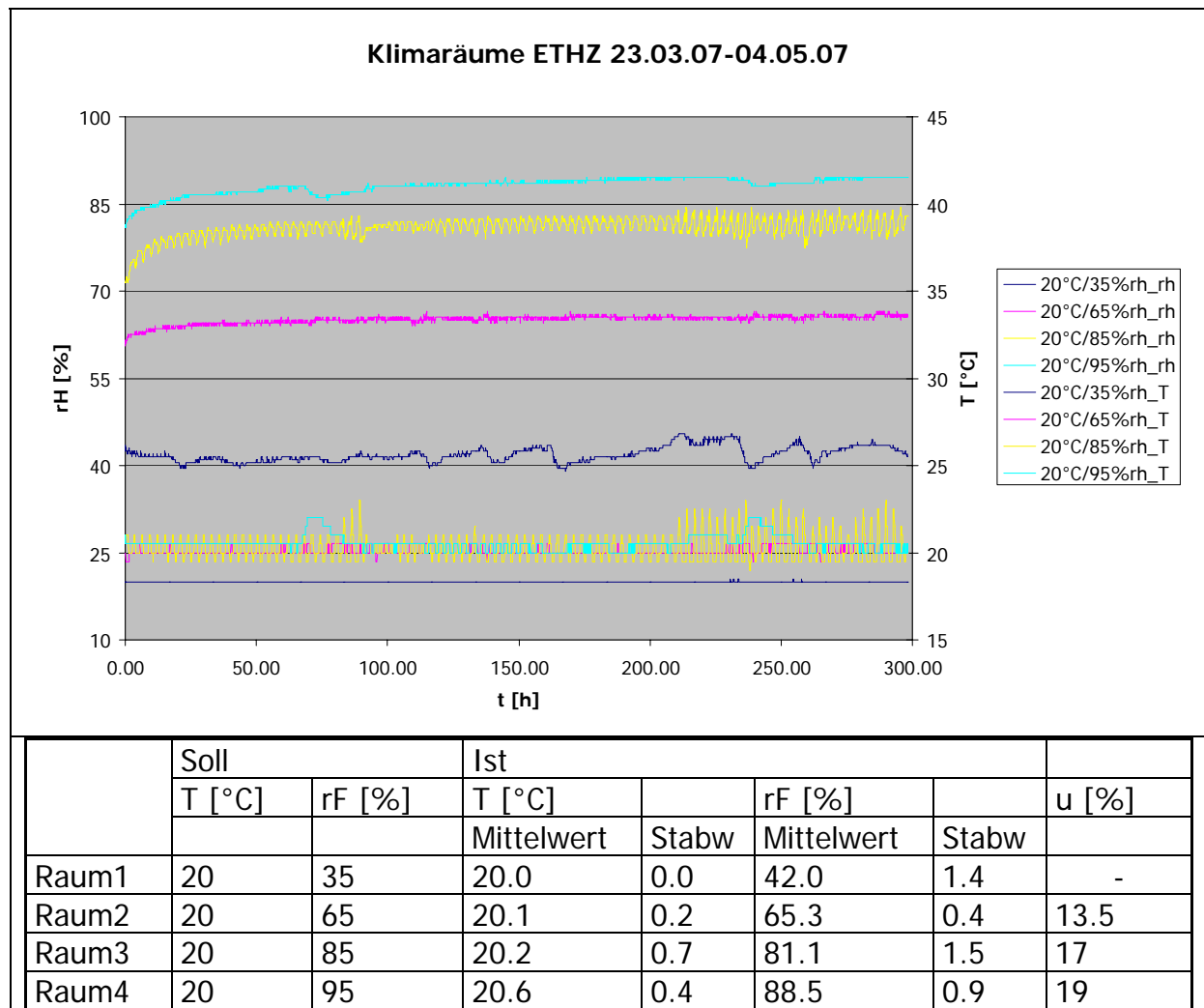


Tabelle 3 Klimaten in den Klimaräumen am IfB, ETH Zürich. Der Raum 1 wurde nur zur Vorklimatisierung verwendet, da der Unterschied zum Sollklima zu gross war. Auffallend sind die relativ grossen Schwankungen im Raum 3. Der anfängliche Anstieg der relativen Feuchte im hohen Feuchtebereich wurde regelmässig beobachtet und ist dem Messgerät⁹⁹ inhärent. Die ersten 600 Werte (50h) wurden aus der Parameterberechnung entfernt.

Für die angestrebte Holzfeuchte $u=8\%$ wurde ein Klima von 20/35 gewählt. Die Feuchtemessungen (Widerstandsmessung) ergaben eine Ausgangsholzfeuchte zwischen 15.5% und 19.5%, d.h. die Werte für die Klimaten $\leq 20/65$ sollten der Desorptionskurve (Abbildung unten) folgen. Der Temperaturunterschied von 5°C wurde vernachlässigt.

⁹⁹ EasyLog-USB

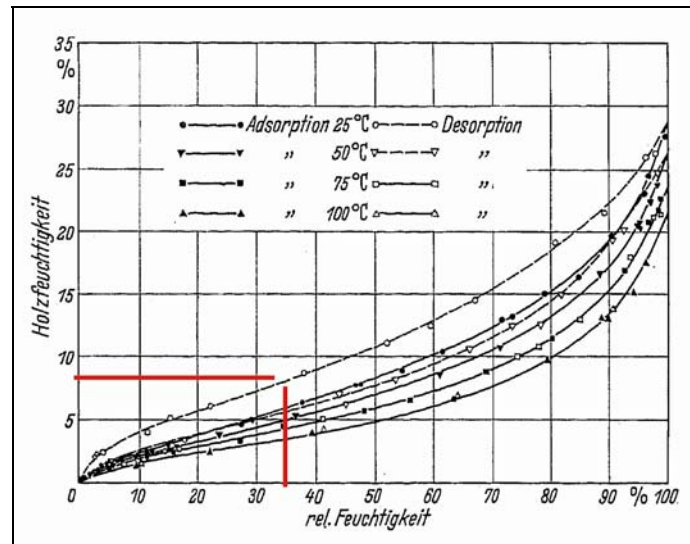


Abbildung 22 Sorptionsisothermen von unbehandeltem Buchenholz bei 25, 50, 75 und 100°C¹⁰⁰

Die geringste Holzfeuchte ergibt sich aus den technischen Möglichkeiten der Klimaschränke (das Ausgleichsklima für die Lagerung auf der jeweiligen Temperatur sollte sichergestellt sein) und einem Kompromiss, um ein von 8% genügend verschiedenes Resultat zu erreichen. Deshalb wurde leicht von der Temperatureinstellung abgewichen (25/28 zum Klimatisieren). Die Probenkörper für diese Versuche wurden im Klimaraum 1 geklebt, da zu diesem Zeitpunkt kein anderer geeigneter Raum zur Verfügung stand.

Die offene Zeit oT dient als Indikator für die Katalysatorzugabe und ist durch die Herstellerangaben gegeben und kann so als stetige Faktor verwendet werden. Parallel dazu besteht die Möglichkeit den äquivalenten kategorialen Faktor Klebstoff KI zu verwenden.

Die Temperatur T liegt in ihrer Grundeinstellung bei 20°C, was auch der Temperatur des Normklimas (20/65) entspricht.

Die Presszeit $Pr=1$ bezeichnet das 2.5fache der offenen Zeit bei Normalbedingungen¹⁰¹ und bezieht sich auf alle Klimaten.

Für die Lagerfolge Lf wurde die erreichte relative Holzfeuchte (gewichtskonstant) zum Zeitpunkt der Zugscherprüfung als Indikator verwendet. Jeweils eine Hälfte der Prüfkörper wurde für die Darrprobe verwendet.

Zusatzwasser Zw wurde in den unteren Holzfeuchtbereichen untersucht. Nicht untersuchte Faktoren wurden nach Möglichkeit auf konstanten Werten (Grundeinstellungen) belassen.

¹⁰⁰ Weichert

¹⁰¹ mündliche Auskunft Dr. Amen, Purbond

Grundeinstellungen für die Faktoren						
variabel						
Faktor	relative Holzfeuchte	offene Zeit	Temperatur	Presszeit	Zusatzwasser	Lagerfolge
Kurzzeichen	u	oT	T	Pr	Zw	Lf
Wert	- [%]	- [min]	20 [°C]	1 [-]	0 [g/m ²]	- [%]
konstant						
Faktor	Pressdruck	Auftragsmenge Klebstoff	Auftragsart (Klebstoff/Zw)	offene Zeit beim Kleben	Klima beim Kleben	Konditionierung
Wert	0.8 [N/mm ²]	200 [g/m ²]	einseitig	2.5 (4) [min]	- [T]/[%]	- [T]/[%]

Tabelle 4 Grundeinstellungen der Faktoren. Diese Faktorstufen wurden, sofern nicht anders erwähnt, als Grundwerte eingehalten. Die fehlenden Werte (-) erschliessen sich aus dem Text oben. Die offene Zeit beim Kleben ist 2.5min für ein Brett, 4min für 2 Bretter.

(Versuchsreihe 1.2) Der Einfluss von Temperatur und Presszeit wurde in einem mittleren Bereich der Holzfeuchte $u=13.5\%$ und bei $u=8\%$ Holzfeuchte betrachtet, wobei 8% dem vermuteten Grenzbereich der Klebstoffe entspricht. Auf dieser Stufe wurde gleichzeitig der Faktor Zusatzwasser getestet. Zusätzlich interessierten eventuelle Effekte von Schwind- und Quellverhalten nach dem vollständigen Aushärten. Diese Versuche auf der Stufe 13.5% Holzfeuchte durchgeführt, da auf dieser Stufe mit den Grundeinstellungen gute Festigkeiten mit kleinen Varianzen erwartet werden konnten. Ausgedrückt wird dieser Faktor mit der Variable Lf, der mit den Grundeinstellungen ungefähr u entsprechen sollte.

Die Temperaturstufen sollten einen einigermaßen realistischen Einsatzbereich abdecken und sich infolgedessen nicht zu extrem von 20°C unterscheiden. Sie wurden auf 10 , 20 und 30°C festgelegt. Die Klimaten sollten auf den jeweiligen Temperaturstufen möglichst mit der jeweiligen Ausgleichsfeuchte des Holzes übereinstimmen, sie wurden aus den Sorptionsisothermen weiter oben und dem hygroskopischen Gleichgewicht unten hergeleitet.

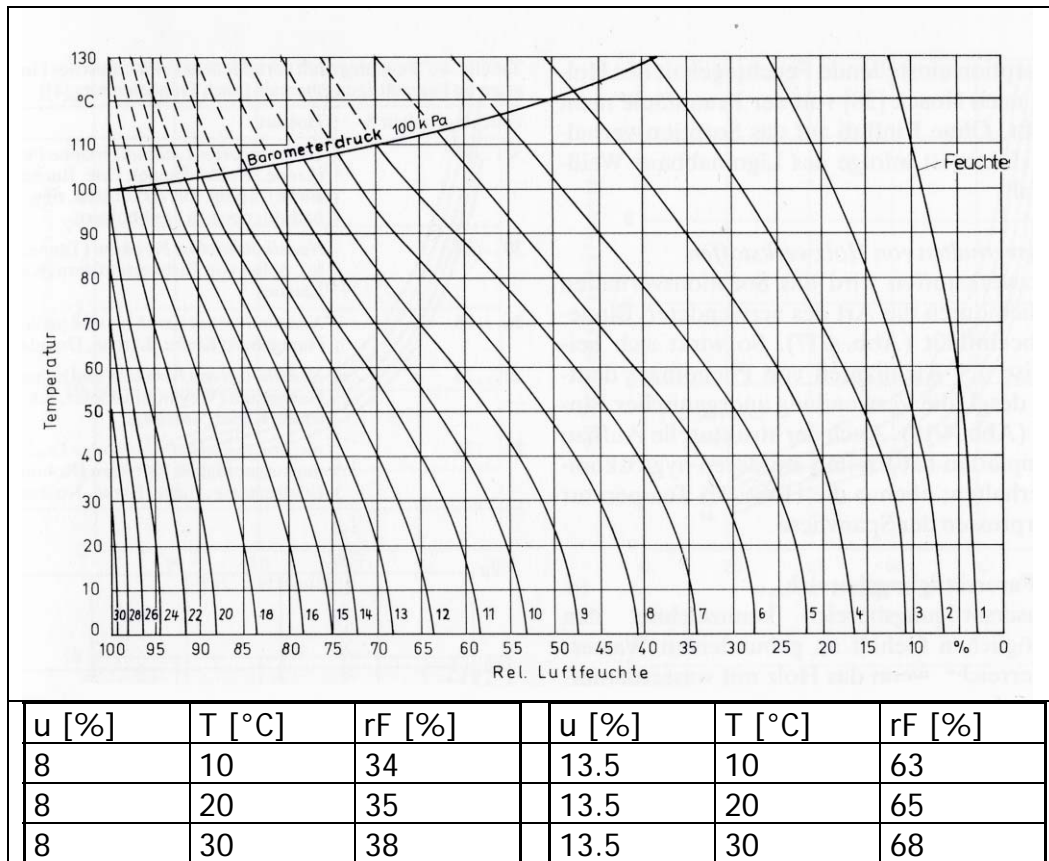


Abbildung 23 Oben Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka Fichte¹⁰² und unten daraus abgeleitete Differenzen für Ausgleichsklimaten auf verschiedenen Temperaturstufen für Buche (Desorption).

Die Faktorstufen für die Presszeit liegen asymmetrisch auf 0.75, 1 und 1.5, da nach unten das Versagensrisiko vor der Prüfung minimiert und nach oben ein eventueller Effekt möglichst deutlich gezeigt werden sollte. All zu lange Presszeiten schienen jedoch auch wirtschaftlich weniger interessant. Zusatzwasser sollte 0, 25 und 50g/m² zugegeben werden. Das entspricht den von Kägi (2005) in den Hauptversuchen verwendeten Mengen.

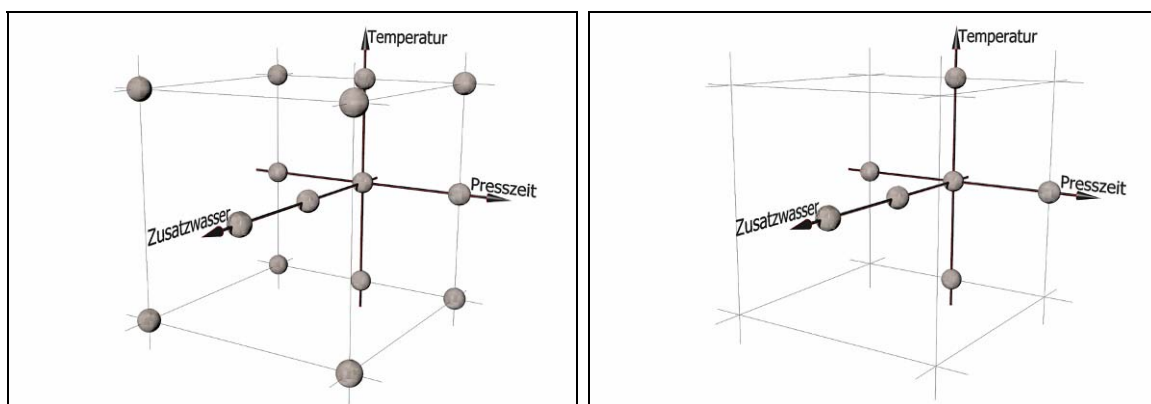


Abbildung 24 Versuchspläne auf der Faktorstufe u=8%. Links A1 und A4 (Purbond), rechts A5 und A8 (Geistlich).

¹⁰² Niemz S.49

Die Versuchspläne für wurden nicht vollfaktoriell (f^k mit f =Anzahl Faktorstufen und k =Anzahl Faktoren) ausgebildet, um den Versuchsumfang zu begrenzen. Grundsätzlich wurde die Purbond Klebstoffe eher ausgebaut, da sie als nicht gefüllte Variante eher für die grundlegenden Eigenschaften der Klebstoffe stehen sollten. Für A1 und A4 wurden die Haupteffekte T, Pr und Zw auf drei Stufen getestet (Hauptachsen). Weiter wurden Versuchsplanpunkte für Wechselwirkungen auf zwei Stufen geplant (Eckpunkte des Würfels). Die T-Pr-Ebene wurde vollständig gekreuzt. Für die gefüllte Klebstoffvariante A5 und A8 wurden die Haupteffekte auf drei Stufen betrachtet. Die Wechselwirkungen wurden hier nicht berücksichtigt.

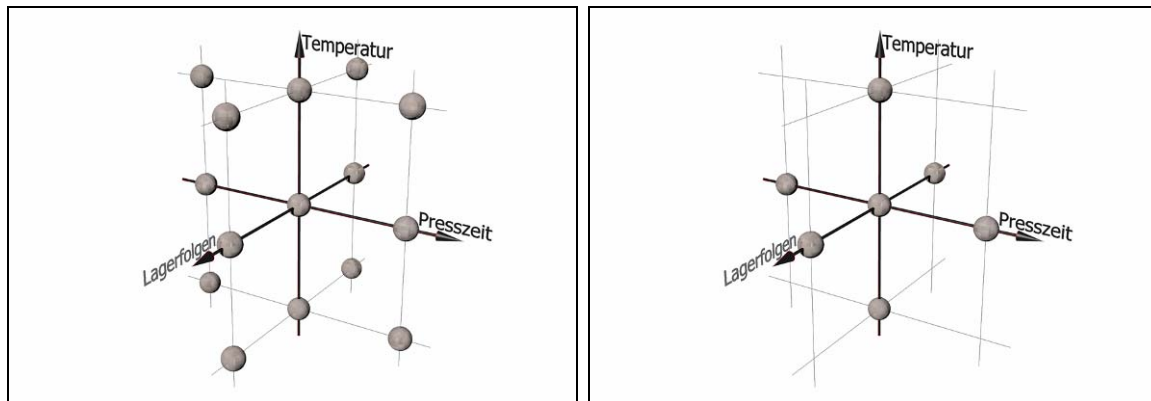


Abbildung 25 Versuchspläne auf der Faktorstufe $u=13.5\%$. Links A1, A4 (Purbond) und A5 (Geistlich), rechts A8 (Geistlich).

Für die Klebstoffe A1, A4 und A5 wurde die Hauptebe mit den Faktoren T und Pr vollständig ausgebaut. Diese Faktoren wurden auf den Faktorstufen $u=8\%$ und $u=13.5\%$ geprüft. Die Lagerfolge Lf wurde hier zusätzlich als Faktor eingeführt und in der T-Lf-Ebene vollständig gekreuzt. Dieser Versuchsaufbau lässt die Betrachtung von 2FWW zu. Die Betrachtung von A8 beschränkte sich dann wieder auf die Haupteffekte wie auf der Stufe $u=8\%$.

3.7.2 Versuchsreihe 2

Die zweite Versuchsreihe sollte nur noch die signifikanten Faktoren beinhalten und mit einem statistischen Verfahren optimiert, d.h. reduziert werden, ohne die Aussagekraft der Versuche wesentlich zu beeinträchtigen.

Es sollen hier zuerst einige Punkte zur statistisch optimierten Versuchsplanung betrachtet werden. Es werden einige ausgewählte Verfahren vorgestellt, anhand derer die Vorgehensweise und die Problematik der optimierten Versuchspläne gezeigt werden.

Fraktionelle faktorielle 2^{k-p} Versuchspläne¹⁰³ ermöglichen die Aufnahme von p Faktoren durch p Zuordnungen auf Wechselwirkungsspalten eines vollfaktoriellen 2^k Versuchsplans. Statt 2^k-1 Effekte können nur noch $(2^k-1)/2^p$ Effekte geschätzt werden (die Effekte werden vermengt). Die gleiche Methodik kann auf 3^{k-p} Pläne angewendet werden. Als Beispiel soll die Umwandlung eines 2^3 Planes (vollfaktorieller Versuchsplan mit 3 Faktoren auf 2 Stufen) in einen 2^{4-1} Plan dienen.

¹⁰³ Kleppmann S.115 ff

StdRfolge	Faktoren/Effekte						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

StdRfolge	Faktoren			
	A	B	C	D
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

Tabelle 5 links vollständiger 2^3 Plan, rechts 2^{4-1} mit der Spalte ABC als Faktor D.

Die Vorzeichen in den Wechselwirkungsspalten berechnen sich nach den Multiplikationsregeln. Der 2^{4-1} enthält genau die Hälfte der Faktorstufenkombinationen des vollständig gekreuzten Planes. Stellt man den Versuchsplan mit den Effekten auf für die acht Kombinationen, so erkennt man folgende identische Spalten:

$A=BCD$
 $B=ACD$
 $C=ABD$
 $D=ABC$
 $AB=CD$
 $AC=BD$
 $AD=BC$

Die obigen Effekte werden somit miteinander vermengt (addiert). ABCD vermengt sich mit dem Mittelwert. Stellt sich einer der Faktoren als nicht signifikant heraus, kann er durch Projektion des Versuchsplans entfernt werden. Fehlende Kombinationen können ergänzt werden. Zur Beurteilung der Effekte müssen technische Überlegungen herangezogen werden, die Statistik kann hier nicht weiterhelfen. Die gleiche Vorgehensweise kann auf Pläne mit mehr Faktorstufen angewendet werden.

Das Box-Behnken-Design, das in der Vorgängerstudie (*Kägi*, 2005) verwendet wurde, ist ein Versuchsplan mit Zentralpunkt, der gute Schätzungen von linearen und quadratischen Effekten erlaubt. Er weist keinen eingebetteten faktoriellen Versuchsplan auf und ist deshalb für sequenzielle Versuche nicht geeignet.

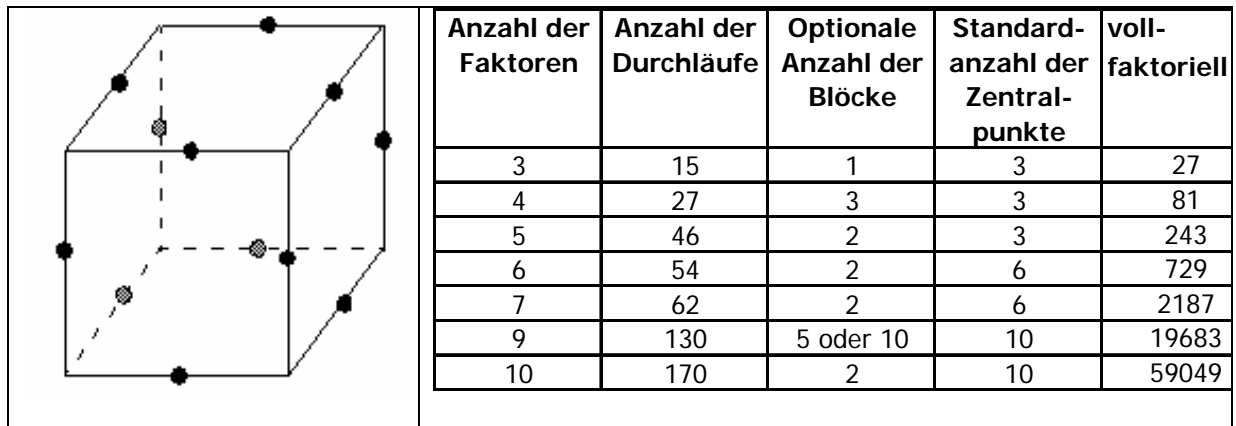


Abbildung 26 links Box Behnken Versuchsplan für drei Faktoren (ohne zentralen Punkt), rechts die Anzahl von Durchläufen, generiert von Minitab 15.¹⁰⁴

Die Versuchsplanmatrix der Versuchsreihe 1 ist weder orthogonal, noch verfügt sie für alle Faktoren über die gleiche Anzahl Stufen, gleichzeitig sind nicht alle Stufenabstände gleich. Die Möglichkeit zur Integration der Ergebnisse aus der Versuchsreihe 1 in die Versuchsreihe 2 sollte aber gegeben bleiben. Als Alternative zu den oben beschriebenen und anderen Versuchsplänen wurde daher die Methode der D-Optimalität ausgewählt.

D-optimale Designs haben folgende Vorteile¹⁰⁵:

- Freie Wahl der Anzahl Faktorstufen, sie kann unterschiedlich gewählt werden und müssen nicht äquidistant sein.
- Freie Wahl des Modells.
- Möglichkeit zur Verwertung bereits durchgeführter Versuche.
- Möglichkeit zur Eingabe von Neben- und Zwangsbedingungen.

¹⁰⁴ MinitabHelp

¹⁰⁵ Klein S.155

D-optimal Designs haben folgende Nachteile¹⁰⁶:

- Der Versuchsplan ist nicht orthogonal, die Abweichungen sind aber meist nur klein.
- Das Modell ist normalerweise nicht im Voraus bekannt, die D-Optimalität gilt jedoch nur für einen bestimmten Ansatz.
- D-optimale Pläne können nur mit entsprechender Software realisiert werden.

Der Name D-optimal leitet sich aus dem Verfahren der Versuchsplanung ab, das die Determinante der Versuchsmatrix maximiert und damit die Korrelation unter den Schätzwerten minimiert. Vollfaktorielle Versuchspläne sind per se D-optimal. Das Verfahren besteht nun darin, bei einer festgelegten Anzahl Durchgänge die maximale Determinante zu finden. Die minimale Anzahl Durchläufe wird durch die Anzahl Terme im Modell bestimmt. Eine gute Schätzung für die optimale Anzahl Durchläufe wird durch folgende Faustregel gegeben: $\text{Durchläufe} \leq 1.5 \times (\text{Anzahl Koeffizienten im Modell})$ ¹⁰⁷.

Versuchsplan	Anzahl Faktoren (n)				
	2	3	4	5	6
2^n	4	8	16	32	64
3^n	9	27	81	243	729
D-Pläne					
linear minimal	3	4	5	6	7
linear maximal	4	6	7	9	10
quadratisch minimal	6	10	15	21	28
quadratisch maximal	9	15	23	32	42

Tabelle 6¹⁰⁸ Versuchsumfänge bei verschiedenen Modellen.

Ein 3^5 Plan, der mit dem Box-Behnken-Verfahren mit 46 statt 243 Durchläufen realisiert wird, kann so je nach Modell mit 6 bis 32 Durchläufen realisiert werden. Die Maximierung der Determinante kann nur iterativ geschehen, d.h. bei komplexen Aufgabenstellungen sind nur noch rechnergestützte Verfahren denkbar. Das Verfahren wird unten an einem einfachen Beispiel¹⁰⁹ erörtert. Gegeben sei ein vollfaktorieller 2^3 -Versuchsplan und das Modell $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2$, d.h. die Hauptwirkungen und die Wechselwirkung AB werden in das Modell aufgenommen. Die minimale Anzahl Versuche ist fünf.

¹⁰⁶ Kleppmann S.205

¹⁰⁷ Klein S.155

¹⁰⁸ Klein S.156

¹⁰⁹ Beispiel aus Klein S.158 f, Berechnungen in Microsoft Excel

Behandlung Nr	A	B	C		X^T							
1	-1	-1	-1		-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
2	1	-1	-1		-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
3	-1	1	-1		-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
4	1	1	-1									
5	-1	-1	1		$X^T X$							
6	1	-1	1		8	0	0					
7	-1	1	1		0	8	0				$\det(X^T X)$	
8	1	1	1		0	0	8					512

Tabelle 7 Links die vollfaktorielle Designmatrix X , rechts oben die transponierte Matrix X^T , unten in der Mitte die multiplizierte Matrix $X^T X$ und die resultierende Determinante unten rechts.

Aus der Designmatrix oben werden die Behandlungen für das Modell entnommen und in der neuen Matrix gesetzt. Eine Behandlung bleibt zu bestimmen, sie wird an Hand der Determinanten der möglichen Kombinationen ermittelt.

Behandlung Nr	A	B	C		Nr	A	B	C				
2	1	-1	-1		2	1	-1	-1				
3	-1	1	-1		3	-1	1	-1				
5	-1	-1	1		5	-1	-1	1				
4	1	1	-1		4	1	1	-1			$\det(X^T X)$	
?	?	?	?		1	-1	-1	-1				112

Tabelle 8 links die unvollständige Designmatrix, in der Mitte die Behandlung 1 in die Matrix eingesetzt und rechts die resultierende Determinante.

Für die zugefügten Behandlungen 1, 6, 7, 8 ergeben sich der Reihe nach die Determinanten 112, 64, 64, 112. Das gleichwertig beste Ergebnis liefert das Hinzufügen der Behandlung 1 oder 8. Das weitere Hinzufügen von Behandlungen liefert wieder bessere Ergebnisse bis zur vollfaktoriellen Lösung.

Der zeitliche Aufwand für Probenherstellung und Prüfung wurde aus der Versuchsreihe 1 abgeschätzt und der Umfang auf ein Maximum von ca. 80 Behandlungen festgelegt. Es mussten noch je 5 Vollholzmuster (alle 5 Stufen von u, Buche und Fichte) gemacht werden, zusätzlich waren pro Klebstoff 8 Kontrollserien Fichte eingeplant. Es blieben demnach 54 Behandlungen übrig für die Versuchsplanung. Festgesetzt wurden 30 pro Klebstoff.

In einer ersten Auswertung¹¹⁰ erschienen für die Purbond Klebstoffe ausser Zw, das in der Versuchsreihe 2 nicht mehr verwendet wurde, alle Faktoren signifikant. Der Faktor u sollte im tiefen Feuchtebereich gehalten werden (Stufen 6.5 und 8%). Der Faktor T wurde nur noch auf zwei Stufen untersucht (20 und 30°C), da die Resultate

¹¹⁰ PD Dr. Mandallaz, D-UWIS ETHZ; ANOVA mit SAS Statistical Analysis Software

für die Stufe 10°C in der Versuchsreihe 1 sehr schlecht ausfielen. P_r wurde näher an 1 geführt, weil $P_r=0.75$ sehr schlechte Resultate lieferte, die Abstände wurden gleichzeitig äquidistant gemacht, was zu den Faktorstufen 0.85, 1 und 1.15 führte. Die Resultate der Versuchsreihe 1 legten nahe, dass die schnelleren Systeme (kleinere offene Zeit) generell besser funktionieren im tiefen Feuchtebereich, die langsamen Systeme hatten grosse Ausfallraten. Die Faktoren u , T und P_r ergeben zwölf Kombinationen, was es erlaubte, die drei schnelleren Varianten des Klebstoffs zu prüfen. Der vollfaktorielle Plan enthielt 36 Behandlungen.

Für die Geistlich-Klebstoffe wurde Z_w ebenfalls als signifikant eingestuft, was die Einführung eines weiteren Faktors auf drei Stufen bedeutete, sodass bei zwei geprüften Klebstoffvarianten ($oT=8\text{min.}$ und $oT=15\text{min.}$) im vollfaktoriellen Plan 72 Kombinationen entstanden. Die vollfaktoriellen und D-optimalen Versuchspläne finden sich in *S7* und *S2*.

4 Ergebnisse

Anm.: Die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 und der Versuchsreihe 2 werden miteinander vermischt, sofern dies der Übersichtlichkeit und der Reduktion des Umfangs dient. Die Boxen in den Boxplots stellen den Interquartil-Bereich dar. Diagramme der Zugscherfestigkeit sind normalerweise (ausser bei grösseren Einzelwerten) von 0 bis 20N/mm² skaliert.

4.1 Klimatisierung

Die Klimatisierung der Versuchsreihe 1 wurde mit genügend Zeit angegangen. Obwohl das verwendete Buchenholz offenbar aus verschiedenen Stämmen und aus verschiedener Lagerung stammte ($14\% \leq u \leq 21\%$ ¹¹¹), konnte es mit guter Gewichtskonstanz den einzelnen Klimaten angeglichen werden. Das Holz erwies sich, da es vermutlich relativ alt und luftgetrocknet war, als ausgesprochen ruhig. Die Darrproben wurden kontinuierlich beim Aushobeln vor dem Fügen genommen. Die Bretter wurden im gleichen Raum gelagert, in dem auch geklebt wurde, das heisst auf den jeweiligen Temperaturstufen. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in der Feuchte gefunden. Die Stichprobengrösse für C1, C4 und C5 ist klein, da dort nur jeweils vier Gruppen geplant waren.

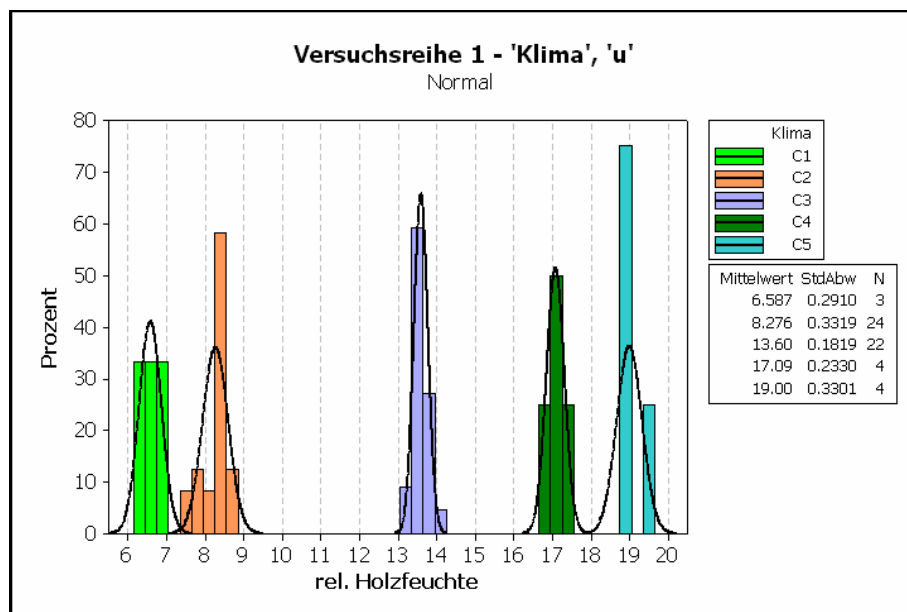


Abbildung 27 Erreichte Holzfeuchte (prozentuale Häufigkeit) u beim Fügen der Versuchsreihe 1.

(Abbildung 28) Die Werte für den Faktor Lf – Holzfeuchte beim Prüfen - sinken tendenziell gegenüber u ausser auf der Stufe C1 ($u=6.5\%$). Die Differenz nach unten ist am deutlichsten auf der Stufe C4 ($u=17\%$ auf $u \approx 16\%$). Sonst ist die Übereinstimmung gut, auch in Anbetracht der z.T. relativ langen Lagerung (2 - 5 Wochen) bis zur Prüfung und dem verschiedenen Zeitpunkt ihrer Herstellung (10 und 30°C in Biel und 20°C in Zürich).

¹¹¹ Einschlags-Widerstandsmessgerät BES Bollmann combo 100

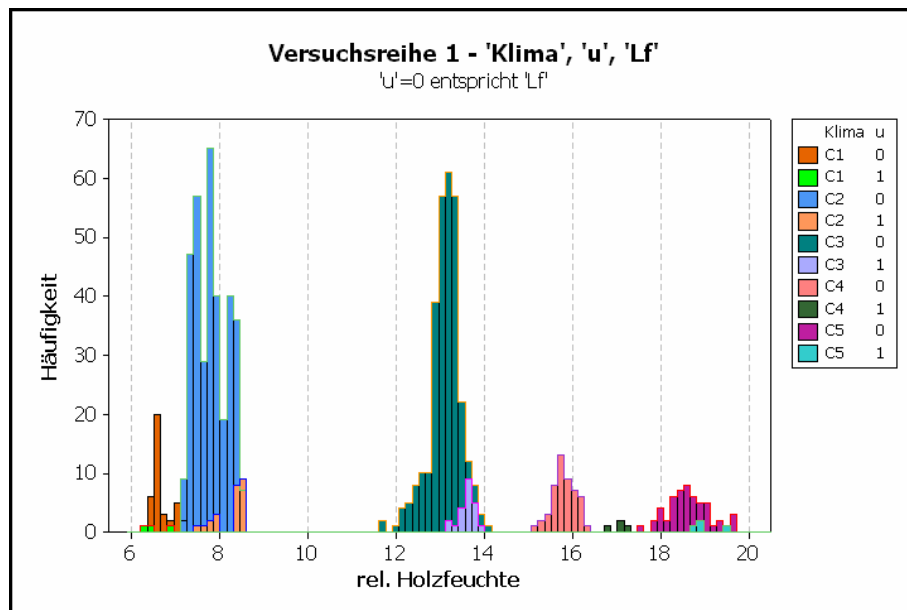


Abbildung 28 Holzfeuchten (absolute Häufigkeit) u beim Fügen und Lf beim Prüfen. u=0 in der Legende bedeutet die entsprechende Reihe ist Lf, die Farben sind für u die gleichen wie oben.

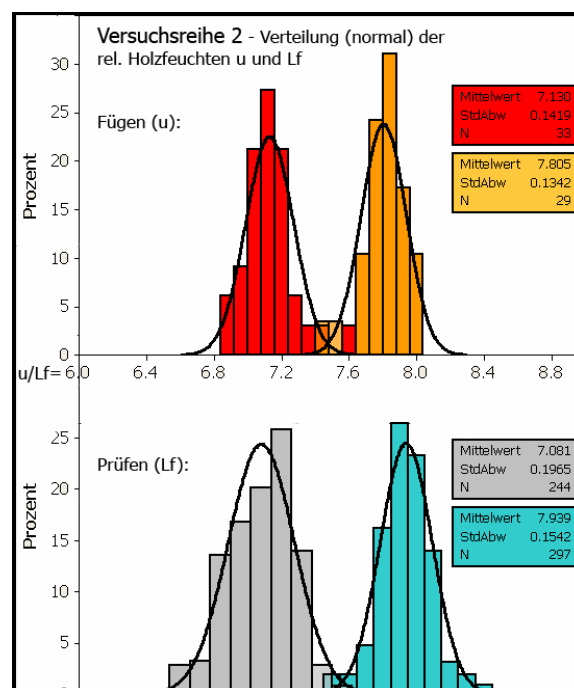


Abbildung 29 Holzfeuchte (prozentuale Häufigkeit) u beim Fügen und Lf beim Prüfen für die Versuchsreihe 2.

(Abbildung 29) Das Holz für die Versuchsreihe 2 war ofentrockene, besäumte Ware aus verschiedenen Stämmen. Die relative Feuchte lag bei 12-14%¹¹². Die Bretter waren relativ aufgeworfen und wurden deshalb noch nicht in der Dicke aufgetrennt, um ein nochmaliges Abrichten zu ermöglichen. Dadurch wurde natürlich die Vorklimatisierung verzögert, die in der Werkstatt durchgeführt wurde (ca. 23/40). Ein ers-

¹¹² Einschlags-Widerstandsmessgerät BES Bollmann combo 100

ter Klimaschrank war erst ca. vier Wochen vor dem Verkleben zur Verfügung. Zwei Wochen vor dem Verkleben konnte ein zweiter Schrank benützt werden und die Holzfeuchten getrennt. Die Menge zum Klimatisieren war etwas zu gross, so dass die Fichtenmuster und die Vollholzmuster nicht auf eine identische Holzfeuchte gebracht werden konnten. Die untere Holzfeuchte von $u=6.5\%$ wurde nicht ganz erreicht und eine bessere Trennung zwischen den zwei Faktorstufen wäre wünschenswert gewesen.

4.2 Fugendicke und –beschaffenheit

Die Fugendicke [μm] und ihre Beschaffenheit wurde vor allem anhand der Bildern von 15 Prüfkörpern aus der Versuchsreihe 1, die mit einem Auflichtmikroskop mit Vergrösserungen 5, 10 und 20 und ESEM-Bildern ($\times 32$ - $\times 200$, z.T. bis $\times 1000$) aus der Versuchsreihe 2 ausgewertet. Die Bildqualität der Lichtmikroskopbilder lässt die Fugendicke erkennen, aber auch Bearbeitungsspuren. Dies wurde in Kauf genommen, um die Muster nicht in Harz eingiessen zu müssen und eventuell zu verändern. Die Klebstoffe wurden jeder für sich ausgewertet.

4.2.1 Auflichtmikroskop

Die Geistlich Klebstoffe (gefüllt) A5 (8min. offene Zeit) und A8 (90min. offene Zeit) wurden getrennt betrachtet. Die Werte auf der Stufe $Pr=0.75$ wurden nicht in die Statistik aufgenommen ($400\mu\text{m}$ bei $u=13.5\%$, $T=20^\circ\text{C}$).

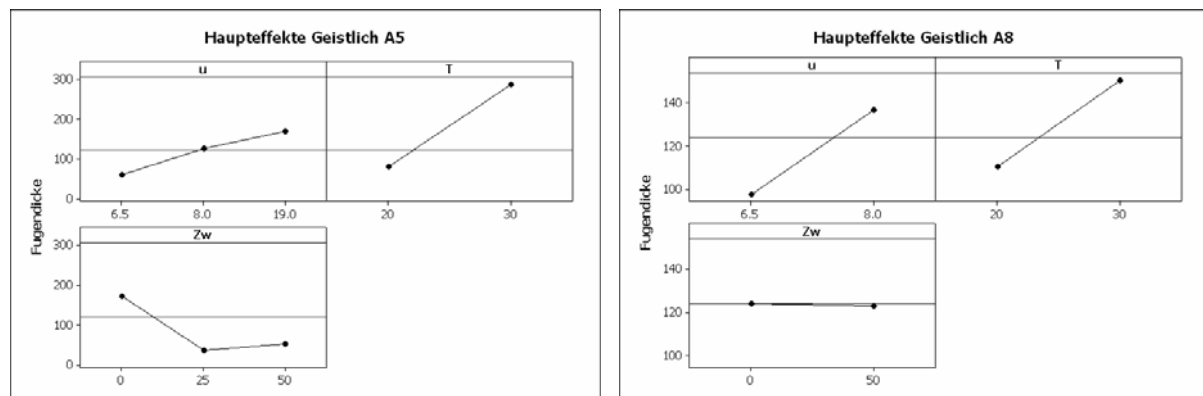


Abbildung 30 Die Holzfeuchte beim Kleben u und die Temperatur T scheinen sich beide in Richtung einer Verbreiterung der Fuge auszuwirken. Das schnellere System reagiert auf Zusatzwasser Zw , das Langsame scheint indifferent. Die Presszeit Pr ist 1.

Deskriptive Statistik für Geistlich A5:

N	N*	Mittelwert	StdAbw	Median	Minimum	Maximum	Schiefte	Kurtosis
75	0	121.907	95.9812	64	29	301	0.825484	-0.901188

Deskriptive Statistik für Geistlich A8

N	N*	Mittelwert	StdAbw	Median	Minimum	Maximum	Schiefte	Kurtosis
45	0	123.867	24.8327	127	80	176	-0.0161601	-1.00984

Es ist zu beachten, dass die Anzahl Versuchsplanpunkte und die Stichprobe gering war. Die Schätzung der Haupteffekte ist mit der entsprechenden Zurückhaltung zu betrachten. Eine Schätzung der Wechselwirkungen ist nicht möglich. Auffallend ist die Verschiedenheit der Verteilungen zwischen den 2 Klebstoffen. Während A8 gut

normalverteilt ist, weist A5 eine extreme Streuung oberhalb des Medians auf (links-schief). Die Mittelwerte sind auffallend gleich.

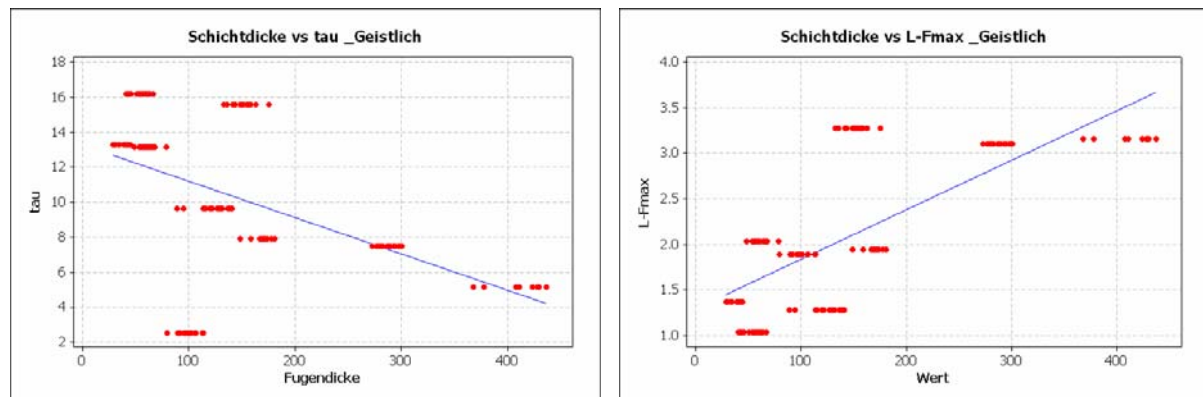


Abbildung 31 Einzelmessungen der Fugendicke gegen Bruchscherkraft tau und Bruchverschiebung L-Fmax.

Der Zusammenhang zwischen Fugendicke und Bruchscherkraft wird nicht sehr deutlich. Der Wert für tau unten links entstand bei $u=6.5\%$. Die 3 genügenden Gruppen (über 10N/mm^2) besitzen alle eine Fugendicke unter $200\mu\text{m}$. Der Zusammenhang zur Bruchverschiebung ist ebenfalls nicht offensichtlich. Es gibt eine Häufung von Werten wiederum unterhalb $200\mu\text{m}$ Fugendicke. Die Werte oberhalb sind bei 30°C entstanden.

Anm.: Homogene Zonen mit Klebstoff stellen sich mattschwarz dar. Die Spannungs-Dehnungsdiagramme (Abbildungen rechts) stammen aus der Videoextensometermessung (vgl. 3.5.1). Der Begriff Dehnung in den Diagrammen ist entsprechend zu verstehen und meint die Verschiebung L-Fmax.

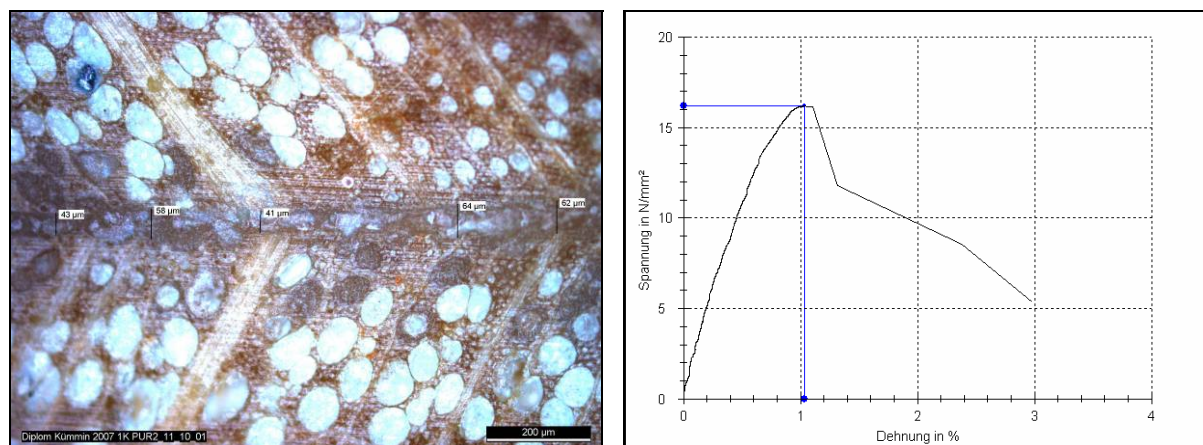


Abbildung 32 (x10) A5 mit Zusatzwasser $Zw=50\text{g/m}^2$ bei 20°C . Die Klebflächenlage ist tangential/radial. Die Fugendicke ist $50\mu\text{m}$. Die Fuge scheint nicht homogen, es kann nicht entschieden werden, ob unter der Klebstoffoberfläche Blasen sind.

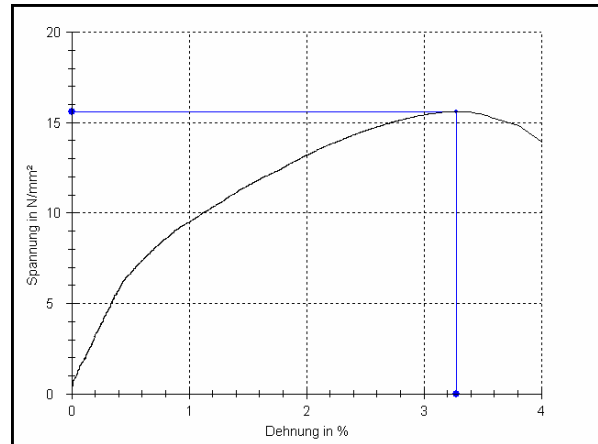
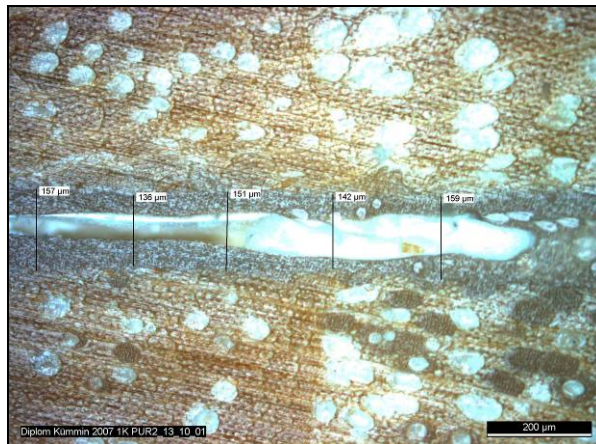


Abbildung 33 (x10) A8 bei $u=8\%$ und 30°C , Klebfläche radial. Die Fugendicke ist $150\mu\text{m}$. Deutliche Blasenbildung in der Fugenmitte. Rechts unten Eindringen bis ca. $200\mu\text{m}$.

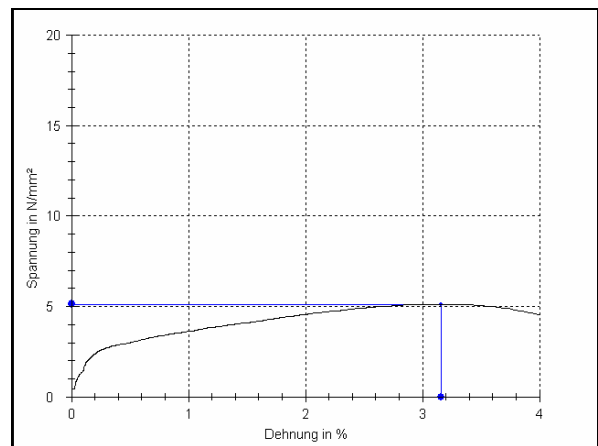
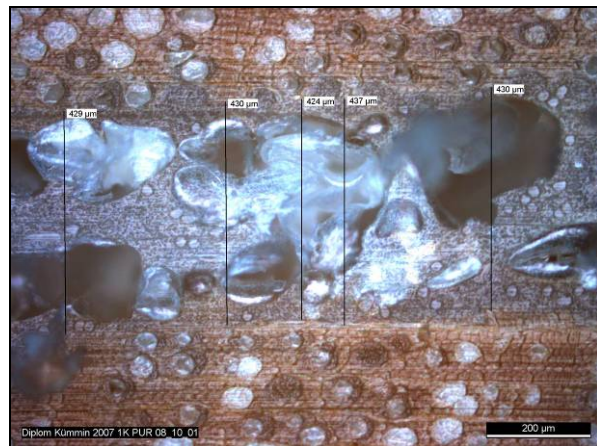


Abbildung 34 (x10) A5 bei 20°C ohne Zusatzwasser, $Pr=0.75$, Klebfläche radial. Die Fugendicke ist $400\mu\text{m}$. Starke Blasenbildung über die ganze Fugenbreite.

Die Lage für die Purbond Klebstoffe A1 (4min. offene Zeit) und A4 (70min offene Zeit) ist ähnlich in Bezug auf die Stichprobengröße. Die Klebstoffe wurden nicht getrennt betrachtet. Es konnte keine Normalverteilung der Daten erreicht werden.

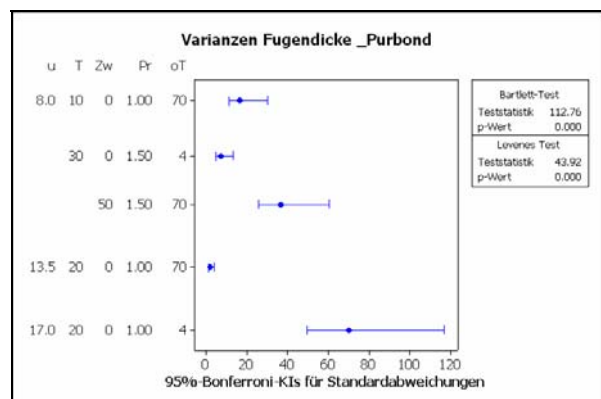
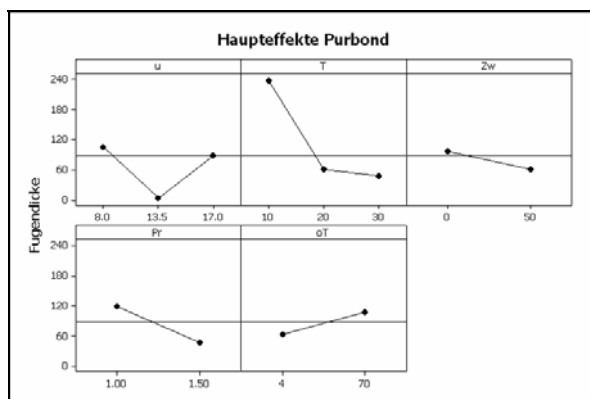


Abbildung 35 Haupteffekte für Purbond und Konfidenzintervalle der Standardabweichungen.

Es fallen auf der Knick bei $u=13.5\%$, das starke Abfallen von $T=10^\circ\text{C}$ nach 20°C und die grosse Varianz bei $u=17\%$ und $oT=4\text{min}$. Die Verteilung ist wie oben A5 linkssteil.

Deskriptive Statistik für Purbond A1 und A4

N	N*	Mittelwert	StdAbw	Median	Minimum	Maximum	Schiefte	Kurtosis
80	0	88.4875	86.8767	57	0	258	0.782418	-0.858598

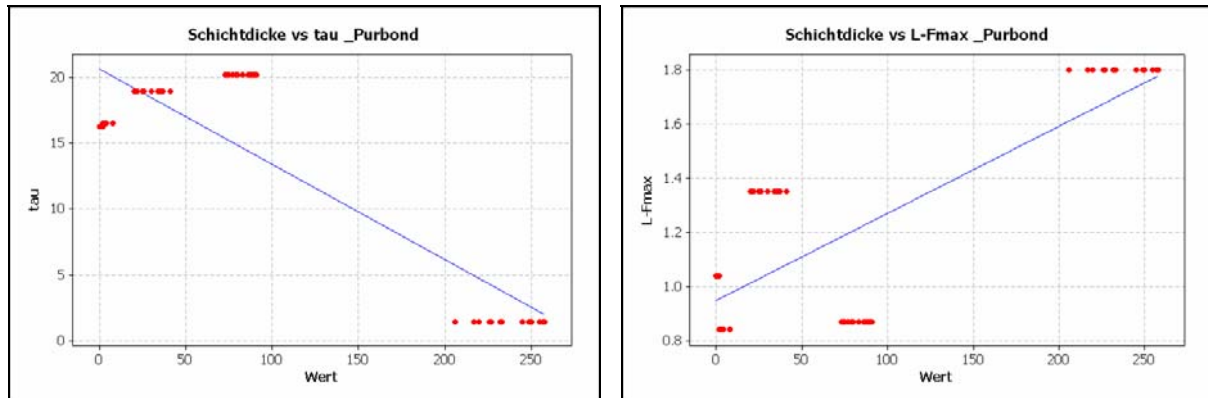


Abbildung 36 Einzelmessungen der Fugendicke gegen Bruchscherkraft tau und Bruchverschiebung L-Fmax.

Es scheint für den Purbond eher eine Grenze bei $100\mu\text{m}$ als bei $200\mu\text{m}$ (Geistlich) zu bestehen. Es ist auch plausibel, dass die Festigkeiten bei Fugendicken gegen Null wieder sinken.

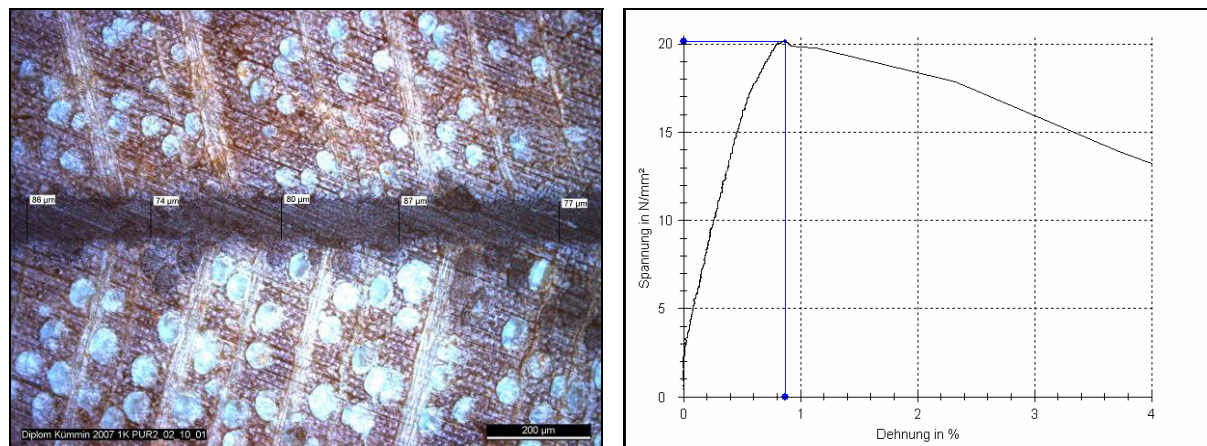


Abbildung 37 (x10) Purbond A1 bei 30°C und $50\text{g}/\text{m}^2$ Zusatzwasser, $Pr=0.75$, tangentielle Klebfläche. Die Fugendicke ist $80\mu\text{m}$. Ausgeprägt homogene Struktur der Klebstoffschicht ohne Blasenbildung, wenig Eindringen.

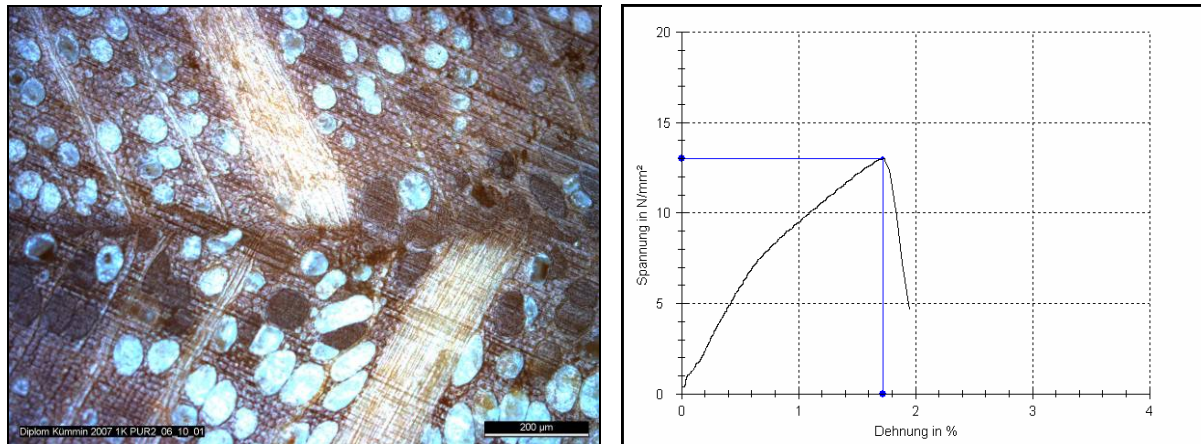


Abbildung 38 (x10) Die gleichen Faktorstufen wie oben, die Klebfläche wieder beinahe tangential, aber die Presszeit P_r ist 1.5. Der Klebstoff füllt die Hohlräume in und neben der Fuge. Eine eigentliche Fugendicke ist nicht mehr auszumachen, da immer wieder Zellmaterial der Fügeteile scheinbar nahtlos ineinander übergeht. Es wird keine Blasenbildung im Klebstoff beobachtet.

Die Fuge oben ist regelrecht verhungert. Die Probe stammt aus einer Serie mit den höchsten Festigkeitswerten überhaupt ($\text{Max.}: 22.25 \text{ N/mm}^2$) und hoher Streuung ($\text{VarKoeff}=0.32$). Sie wurde wegen ihres für die Prüfsreihe einigermaßen uncharakteristischen Kurvenverlaufs im Spannungs-Dehnungsdiagramm ausgewählt. Vor allem die höheren Werte zeigten einen annähernd linearen Verlauf bis zum Bruch. Die erhöhte Presszeit wirkte sich negativ aus, da die ideale Fugendicke unterschritten wurde.

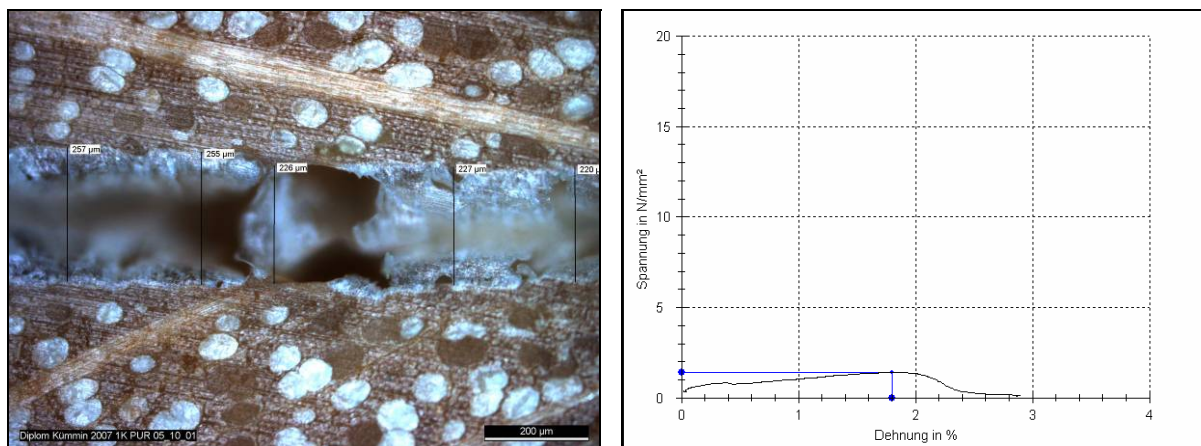


Abbildung 39 (x10) A4 bei $T=10^\circ\text{C}$, beinahe radiale Klebfläche. Die Fugendicke ist $240 \mu\text{m}$. Die beiden Fügeteile sind kaum verbunden, eine eigentliche Blasenbildung kann nicht beobachtet werden. Ein tiefes, unvollständiges Eindringen ist zu beobachten.

Bei 10°C und nomineller Presszeit scheint die Anfangsfestigkeit nicht erreicht zu werden, so dass die Fügeteile nach dem Entfernen aus der Presse sich wieder voneinander weg bewegen.

Der Mittelwert von Geistlich liegt mit $120 \mu\text{m}$ höher als der für Purbond mit $90 \mu\text{m}$. Die Mediane sind jedoch zwischen A5 und A1/A4 fast gleich, A8 hat den doppelten Wert. Die Klebstoffe scheinen auf den Temperatureinfluss verschieden zu reagieren, Purbond mit einer Verringerung der Schichtdicke, Geistlich mit einer Vergrößerung (kein

Wert für Geistlich bei 10°C). Es ist anzunehmen, dass zwischen den Faktoren Wechselwirkungen bestehen. Der gefüllte Klebstoff neigt eher zur Blasenbildung, was starken Einfluss auf die elastisch-plastischen Eigenschaften und auch auf die Festigkeit der Klebverbindung hat.

4.2.2 ESEM¹¹³ (Environmental Scanning Electron Microscope)

Aus der Versuchsreihe 2 wurden vier Behandlungen ausgewählt, die eine auffällig grosse Streuung in Bezug auf Bruchscherspannung und Dehnung aufwiesen. Aus diesen Behandlungen wurden je eine Probe aus dem unteren und dem oberen Bereich der Werte verwendet.

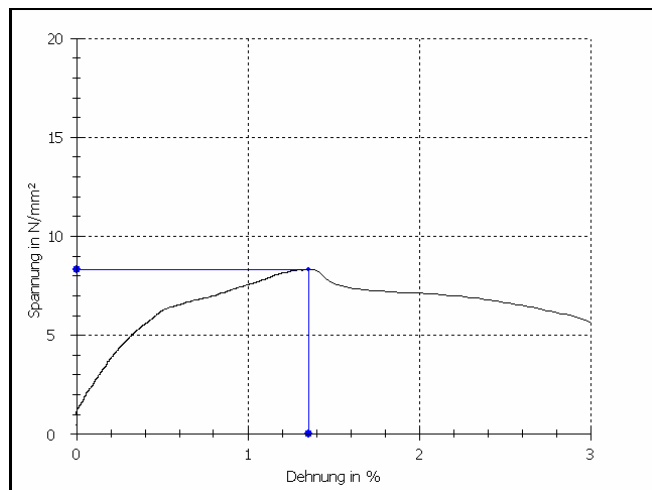
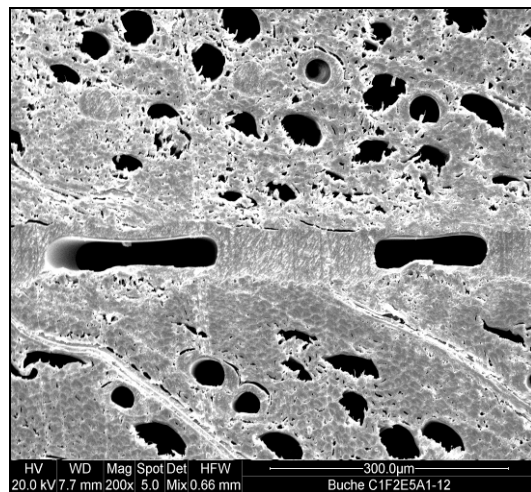
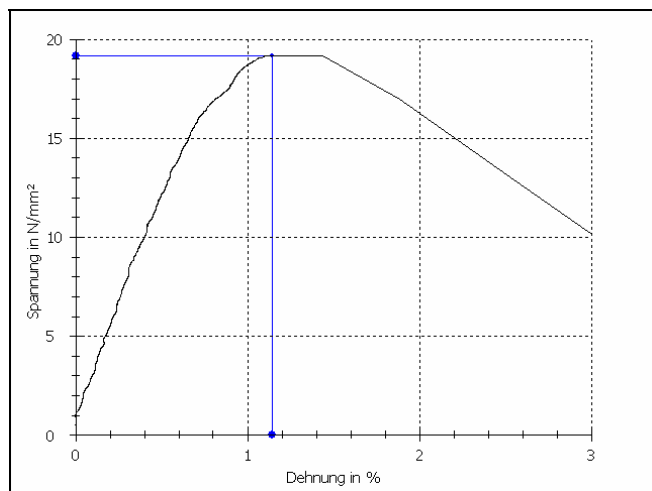
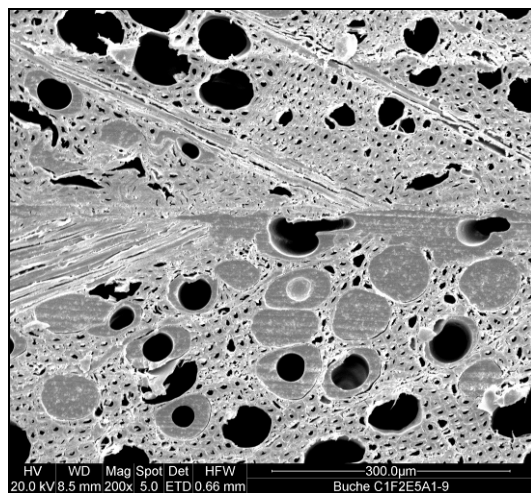


Abbildung 40 (x200) Klebstoff A1, $u=7.1\%$, $Pr=1.15$. Die Blasenbildung ist oben geringer, d.h. sie sind kleiner und werden kaum beobachtet. Gleichzeitig nimmt die Fugendicke nach unten zu, oben wird mehr Eindringen beobachtet ($>200\mu\text{m}$, einseitig). Die Loslösung des Klebstoffs unten an den Zellwänden der Gefässe ist wahrscheinlich durch das Mikrotom verursacht worden, trotzdem könnte dies auch ein Hinweis auf eine verminderte Adhäsion sein.

¹¹³ Alle ESEM- und EDX-Aufnahmen wurden von Gabriele Peschke, IfB, ETH Zürich erstellt.

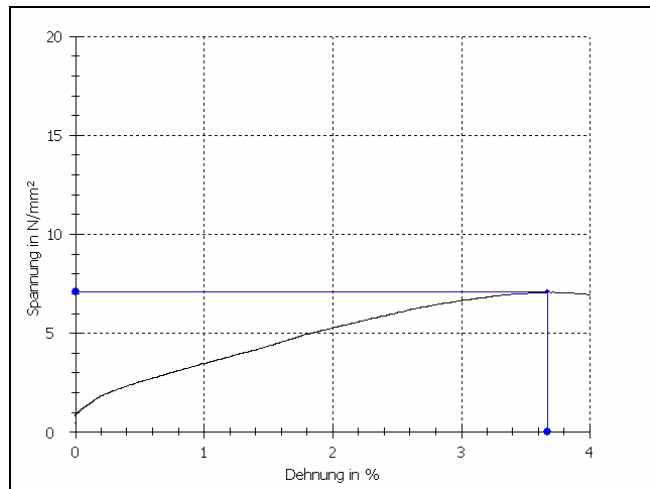
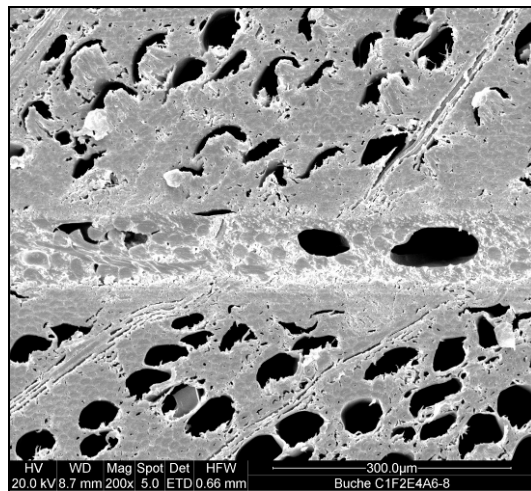
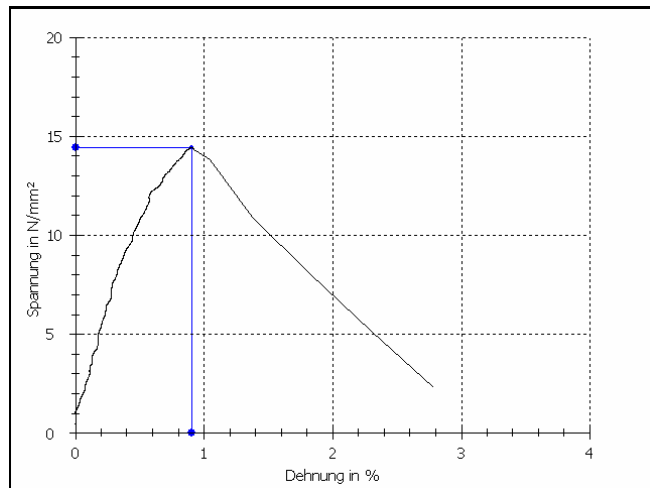
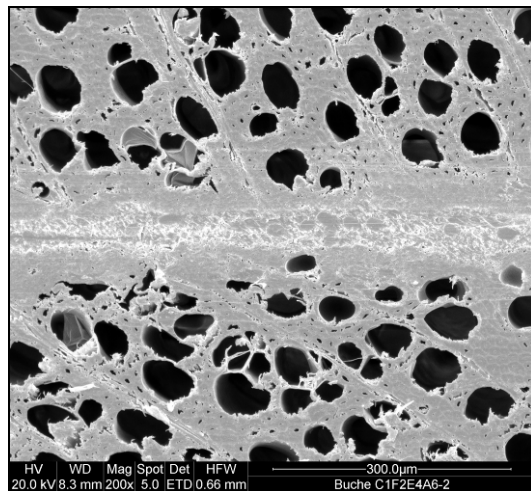


Abbildung 41 (x200) Klebstoff A6, $u=7.1\%$, $Pr=0.85$. Der Klebstoff erscheint bei beiden Proben gekörnt. Wiederum sind unten grosse und zahlreiche Hohlräume zu sehen. Die Fuge ist unten deutlich dicker. Bei starker Blasenbildung nimmt die reale Bruchspannung mit abnehmender Übertragungsfläche für die Scherkraft zu.



Abbildung 42 (x8) Bruchbilder der Probe von Abbildung 41, links der gute Wert mit Faserbruch, der Klebstoff ist kaum sichtbar, dennoch ist Blasenbildung deutlich, rechts sind die Blasen deutlich grösser, die glänzenden Stellen haben keinen Bruch erlitten.

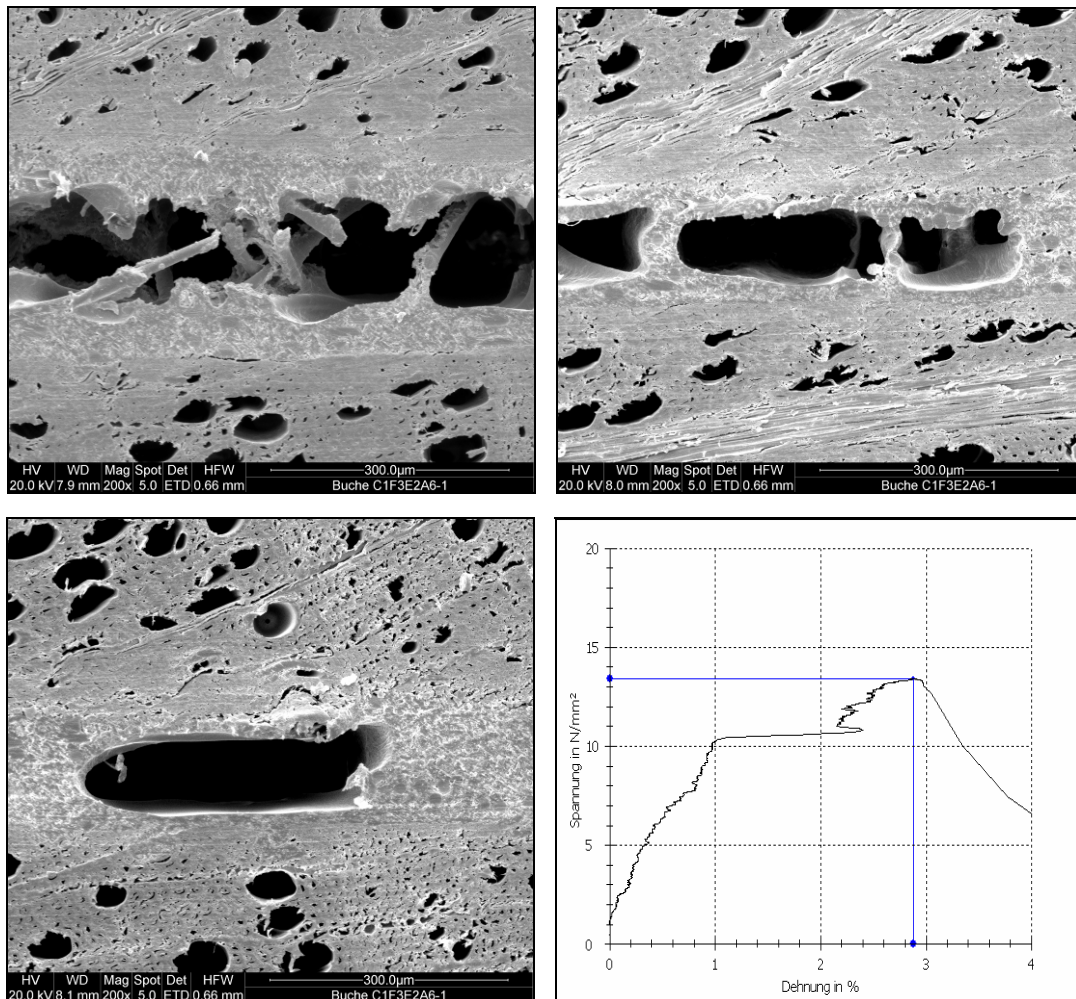


Abbildung 43 (x200) Klebstoff A6, $u=7.1\%$, $T=30^\circ\text{C}$, drei Aufnahmen aus einem Bereich $<10\text{mm}$. Von links mit fast keiner Verbindung bis rechts alternierend Blasen mit guter Verbindung. Die Verbindung an der Bruchfläche war eher besser als der dargestellte Bereich. Der fehlende Spannungsanstieg zwischen 1 und 2% Dehnung fällt auf und könnte ein Ausdruck der heterogenen Struktur der Klebfuge sein.

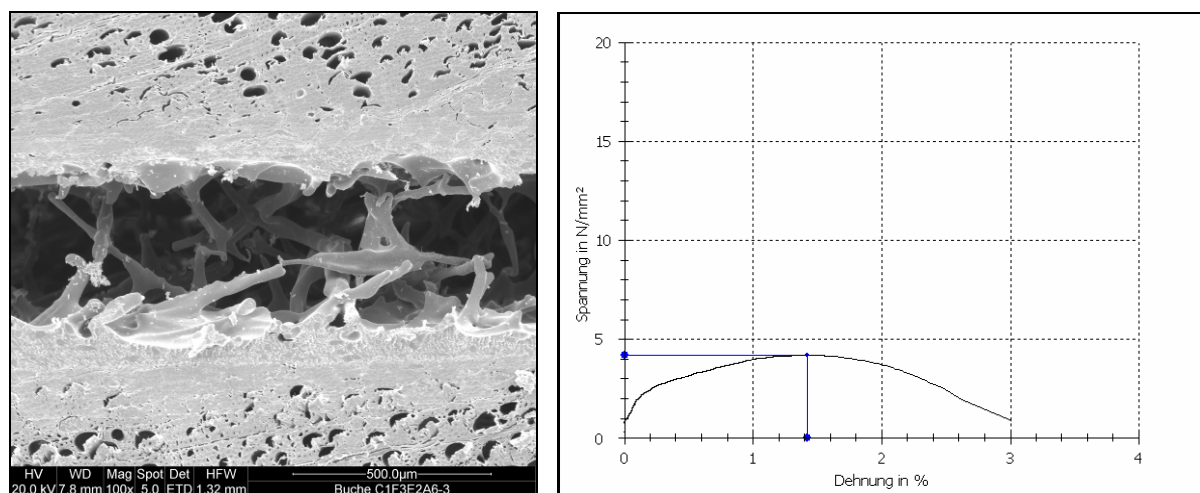


Abbildung 44 (x200) Klebstoff A6, $u=7.1\%$, $T=30^\circ\text{C}$. Es besteht im betrachteten Bereich zwischen den Fügepartnern nur eine Verbindung über verfilzte Klebstofffäden.

Vor allem die Blasen- und Hohlraumbildung und in beschränkterem Mass die Fugendicke scheinen einen Einfluss auf die erreichten Scherfestigkeiten zu haben. Da die Fläche zum Übertragen der Kraft kleiner wird, ist natürlich auch die Schubspannung im Klebstoff grösser. Der gefüllte Geistlich Klebstoff zeigt eher eine Neigung zur Blasenbildung und vermittelt den Eindruck einer körnigen oder faserigen Struktur.

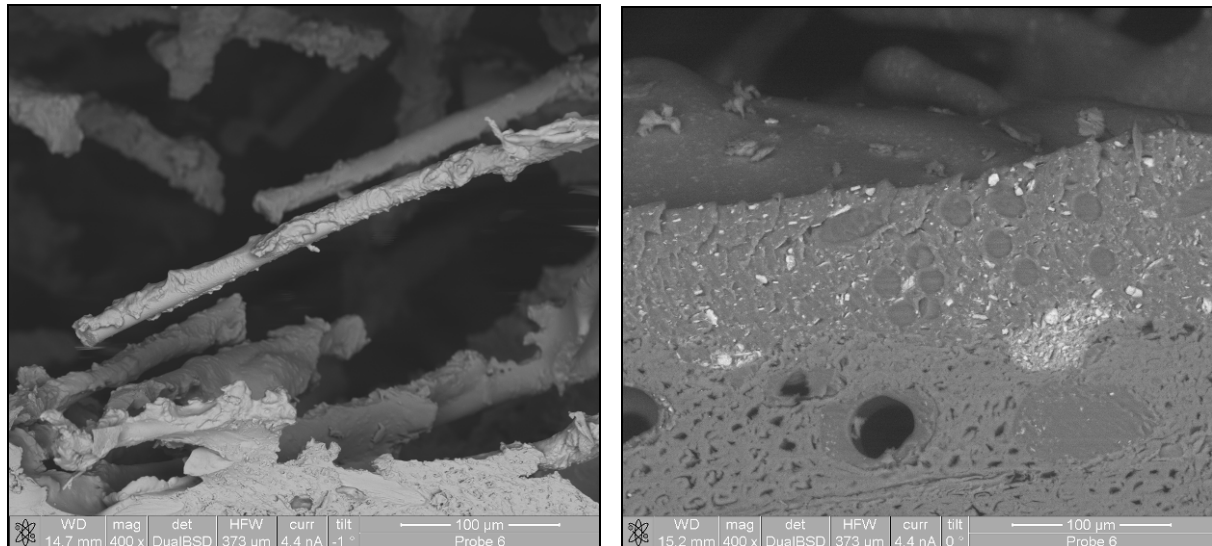


Abbildung 45 (x400) Links werden in der offenen Fuge die sonst schlecht sichtbaren Polyamidfäden gut sichtbar. Rechts (nicht gesputtert) sind die angeschnittenen PA-Fäden gut erkennbar. Der Füllstoff wird als helle Flecken sichtbar.

Es ist gut möglich, dass die hohen Festigkeitswerte, die die Geistlich Klebstoffe auch bei hohen Verschiebungen erreichen, durch die Anwesenheit der Polyamidfasern verursacht wird.

Während der ESEM-Untersuchungen wurden die Fasern im Klebstoff entdeckt und es tauchte die Frage nach ihrer Natur auf. Gleichzeitig war die Verteilung des Füllstoffs im vernetzten Klebstoff unbekannt. Eine EDX-Analyse¹¹⁴ sollte hier weiterhelfen. Das EDX benützt monoenergetische Elektronen, die spezifische Elemente anregen und so sichtbar gemacht werden können.

¹¹⁴ Energiedispersive Röntgenanalyse

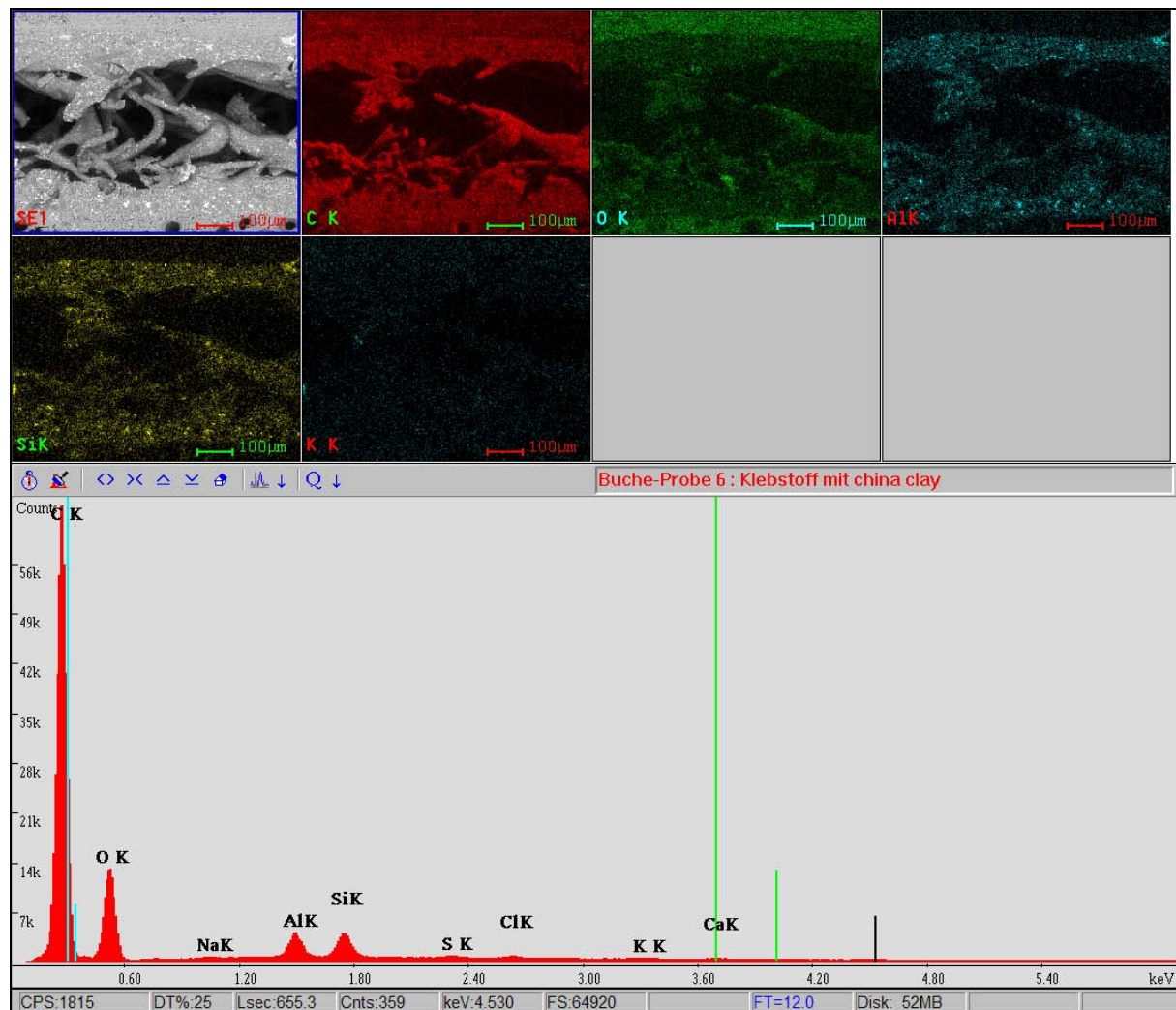


Abbildung 46 EDX-Mapping mit den Elementen C, O, Na, Al, Si, S, Cl, K und Ca. Das K steht für die K-Schale des Atoms, von dem der Peak stammt.

Die Elemente Aluminium und Silizium sind dem Füllstoff Tonerde zuzuschreiben. Schön zu sehen sind die Begrenzung der Fuge und das teilweise Eindringen des Klebstoffs in das Holz. Das Element Sauerstoff ist häufiger vertreten im Holz als im Klebstoff. Der Füllstoff scheint einigermaßen gleichmässig im Klebstoff verteilt, wobei einzelne insulare Konzentrationen zu beobachten sind. Die Polyamidfäden sind auf den Einzelbildern für Aluminium und Silizium als dunkle Flecken zu erkennen.

4.3 Zugscherfestigkeit und Verschiebung

Die Hauptzielgrösse der Untersuchung ist die Zugscherfestigkeit. Die Verschiebung – L-Fmax (in den Diagrammen auch Dehnung genannt) – wird eher summarisch behandelt. Der Versuchsraum wird zuerst entlang der Achsen (Haupteffekte) und auf ausgewählten Ebenen (Haupteffekte und Wechselwirkungen) graphisch und statistisch erkundet. Darauf werden die möglichen Synthesen betrachtet. Dazu werden jeweils verschiedene Methoden, die für die Datenstruktur am sinnvollsten scheinen, angewendet. Zum Verständnis der einzelnen statistischen Verfahren wird auf das ausführliche statistische Glossar verwiesen. Regressionen werden vorzugsweise linear durchgeführt und nur dort, wo eine entsprechende Aussagekraft erreicht werden kann.

4.3.1 Massivholzproben

Es wurden über den untersuchten Holzfeuchtebereich Buchen-Massivholzproben nach der gleichen Prüfvorschrift geprüft. Die Feuchten entsprechen nicht genau den geklebten Proben.

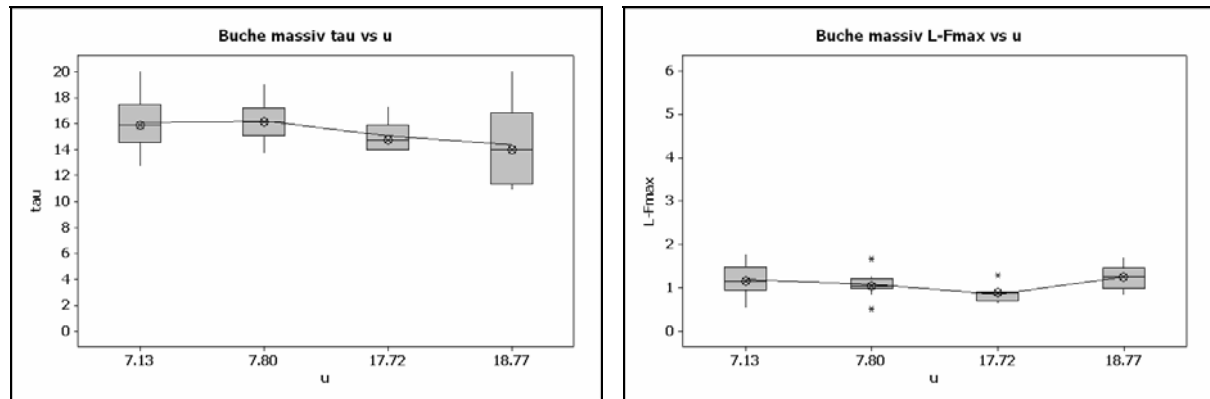


Abbildung 47 (Anm.: Die Verbindungslinie ist der Mittelwert, die Symbole in der Interquartilbox der Median) Die Bruchflächen zeigten die erwarteten Bruchbilder. Das Maximum bei $u=7.8\%$ entspricht den Literaturangaben¹¹⁵. Die Verschiebung liegt bei allen Behandlungen etwa im gleichen Bereich.

Die Festigkeitswerte in der Literatur stammen aus anderen Prüfungen und können nicht direkt verglichen werden. Die spezielle Probengeometrie der Zugscherprüfkörper ist vor allem bei schrägem Faserverlauf problematisch. In dem Fall können einzelne Fasern auf Zug belastet werden, was die Werte massiv verfälscht. Die Festigkeitswerte des Holzes beeinflussen die Festigkeitswerte der Zugscherproben erst bei grossen Holzbruchanteilen. Die Verzerrungen werden wahrscheinlich stark durch die mechanischen Eigenschaften des Holzes beeinflusst.

4.3.2 Fünf Holzfeuchtestufen

Geprüft wurden die Klebstoffe A1 ($\sigma T=4\text{min}$), A4 ($\sigma T=70\text{min}$), sowie die gefüllten Varianten A5 ($\sigma T=8\text{min}$) und A8 ($\sigma T=90\text{min}$), jeweils auf den Grundstufen der Faktoren. Die Werte für A1 und A5 auf den Holzfeuchtestufen $u=7.1\%$ und $u=7.8\%$ stammen aus der Versuchsreihe 2 und wurden eingefügt, weil die relative Luftfeuchte beim Verkleben der Proben für die Versuchsreihe 1 mit 52% (20.5°C) zu hoch lag (rot gekennzeichnet). Die Luftfeuchte im Klimaraum war damit im Sommer deutlich höher als bei der ersten Messung (42%) im Frühling.

¹¹⁵ Kollmann S.902

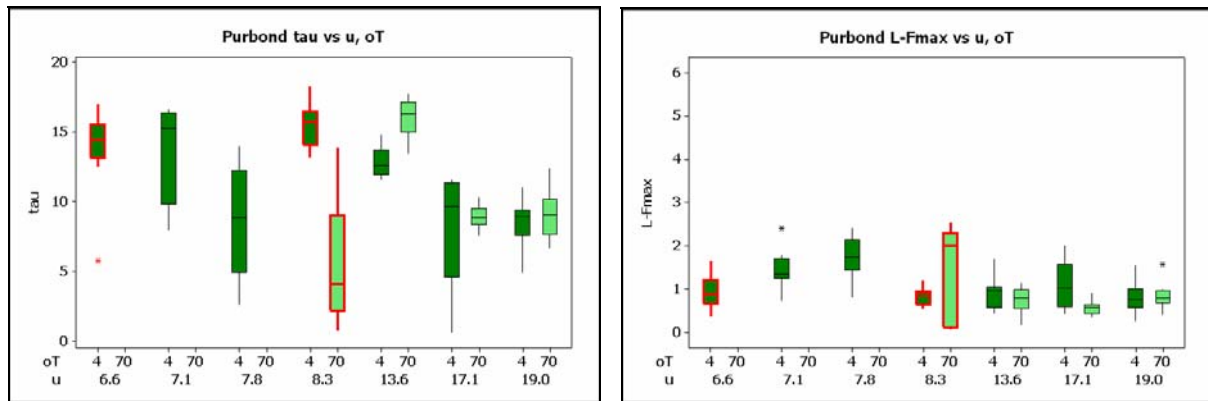


Abbildung 48 Die Purbond Klebstoffe über den Feuchtebereich $6.5\% < u < 19\%$. Die rot eingefassten Boxen wurden unter zu hoher Luftfeuchte verklebt. A4 hat auf der Stufe $u=6.6\%$ vollständig versagt und taucht somit nicht auf. Auf den Stufen $u=7.1\%$ und $u=7.8\%$ (Versuchsreihe 2) wurde A4 nicht geprüft.

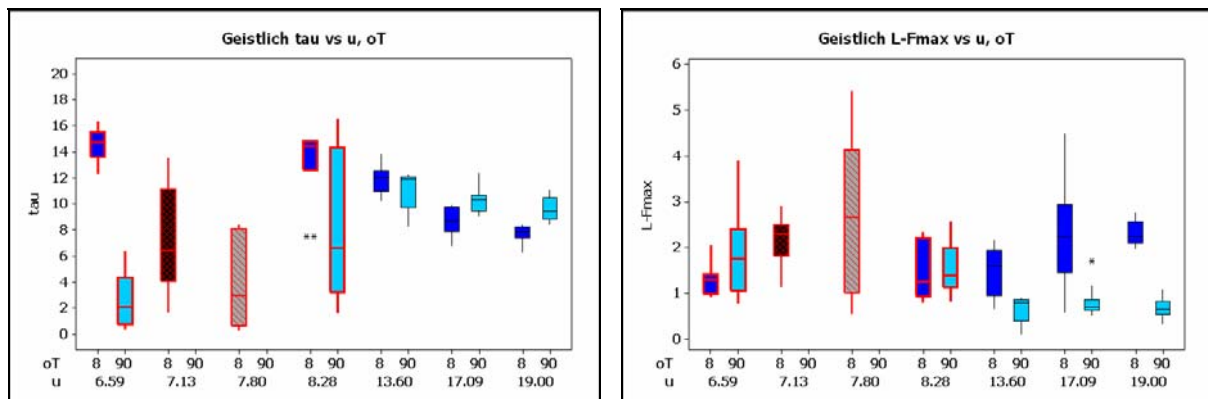


Abbildung 49 Die Geistlich Klebstoffe über den Feuchtebereich $6.5\% < u < 19\%$. Die rot eingefassten Boxen wurden unter zu hoher Luftfeuchte verklebt. Schwarz ist $Pr=1.15$, grau ist $Pr=0.85$, diese beiden Serien wurden genommen, da der D-optimale Versuchsplan $Pr=1$ nicht enthielt (Stufen $u=7.13\%$ und $u=7.80\%$, Versuchsreihe 2, A8 wurde nicht geprüft).

Geistlich A8 und Purbond A4 wiesen auf der Stufe $u=8.3\%$ je einen Totalversager auf, der nicht geprüft werden konnte. Auf der Stufe $u=6.5\%$ versagte A4 total. Dies obwohl bei zu hoher Luftfeuchte geklebt wurde. Die Parallelität zwischen den Geistlich und Purbond Klebstoffen für die Zugscherfestigkeit fällt auf.

Der schnelle Klebstoff A1 von Purbond zeigt unterschiedliche Varianzen. Betrachtet man $u=13.5\%$ als Optimum, so zeigt der Klebstoff dort gute Werte, ober- und unterhalb nehmen die Varianzen jedoch stark zu (mit Ausnahme von $u=19\%$). Die Mittelwerte für die Varianten, die bei zu hoher Luftfeuchte verklebt wurden, sind höher, aber mit grösserer Varianz.

Der Faktor u ist hochsignifikant (p-Wert) und der Bestimmtheitsgrad R^2 ist mit knapp 80% akzeptabel. Die lineare Regression ergibt eine quadratische (aus der Box Cox Transformation) und eine lineare Variante. Im betrachteten Wertebereich liegen die beiden Kurven praktisch aufeinander.

Die Regressionsgleichung lautet:

$$\tau = 22.38 - 0.7821 u$$

,für die transformierten Werte ergibt sich $\tau = (5.12 - 0.125 u)^2$

$S = 0.985020$ $R^2 = 77.5\%$ $R^2(\text{kor}) = 76.9\%$

Varianzanalyse

Quelle	DF	SS	MS	F	p
Regression	1	120.313	120.313	124.00	0.000
Fehler	36	34.930	0.970		
Gesamt	37	155.243			

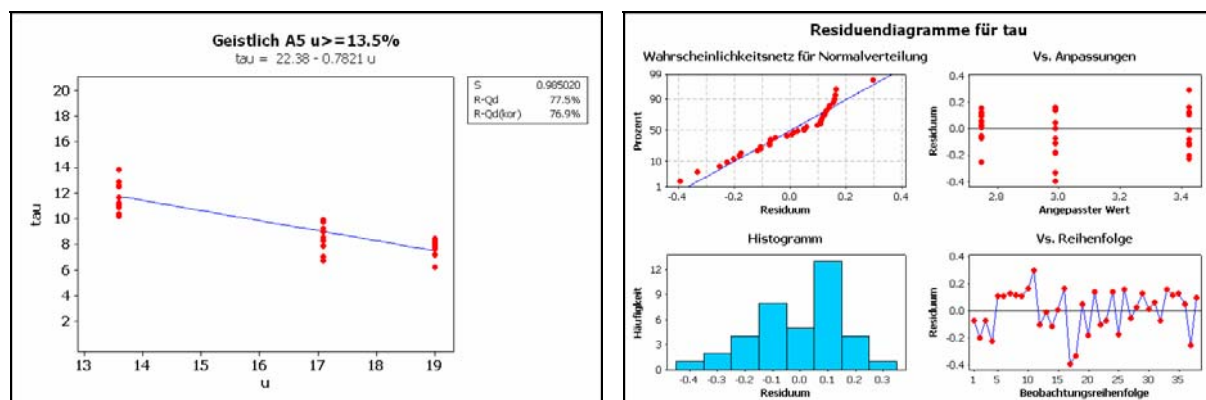


Abbildung 51 Regressionsgerade für A5 und Residuendiagramme. Die Residuen gegen die Beobachtungsreihenfolge könnten auf einen Trend hinweisen. Die Anpassung an die Normalverteilung ist für die Daten vor der Transformation.

(S7) Der langsame Klebstoff von Geistlich A8 stellt sich ab $u \geq 13.5\%$ ähnlich dar, die Bruchscherkraft ist aber mit zunehmenden u nur leicht fallend. Eine Varianzanalyse ergibt trotz guter Normalverteilung und Varianzen einen sehr schlechten Bestimmtheitsgrad, was auch auf eine Beziehung höheren Grades deuten könnte. Der Unterschied zum schnellen System liegt vor allem im kleineren Einfluss der Holzfeuchte. Es kann nur zwischen $u=13.5\%$ und $u=19\%$ ein signifikanter Unterschied gefunden werden. Im unteren Feuchtebereich nimmt die Streuung stark zu bei gleichzeitig abnehmenden Festigkeitswerten.

Tukey 95% Simultane Konfidenzintervalle¹¹⁷

Alle paarweisen Vergleiche zwischen den Stufen von u

Individuelles Konfidenzniveau = 98.04%

u = 13.60 subtrahiert von:

u	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
17.09	-1.924	-0.810	0.303
19.00	-2.561	-1.409	-0.257

```

u      +-----+-----+-----+-----+
17.09      (-----*-----)
19.00      (-----*-----)
      +-----+-----+-----+-----+
      -2.4      -1.2      0.0      1.2

```

u = 17.09 subtrahiert von:

u	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
19.00	-1.657	-0.599	0.460

```

u      +-----+-----+-----+-----+
19.00      (-----*-----)
      +-----+-----+-----+-----+
      -2.4      -1.2      0.0      1.2

```

4.3.3 Partialdruck

Der Partialdruck p [Pa] des Wasserdampfs im Umgebungsklima kann vor während der offenen Zeit einen Einfluss auf die Vernetzungsreaktion haben¹¹⁸. Die Gruppen, die in der Versuchsreihe 1 unter zu grosser relativer Feuchte verklebt wurden, werden ihren Entsprechungen in der Versuchsreihe 2 gegenübergestellt. Der Partialdruck wurde nicht von Anfang her als Faktor eingeführt und kann sonst auch nicht ausgewertet werden. Er vermengt sich mit den Faktoren Temperatur T und Holzfeuchte u .

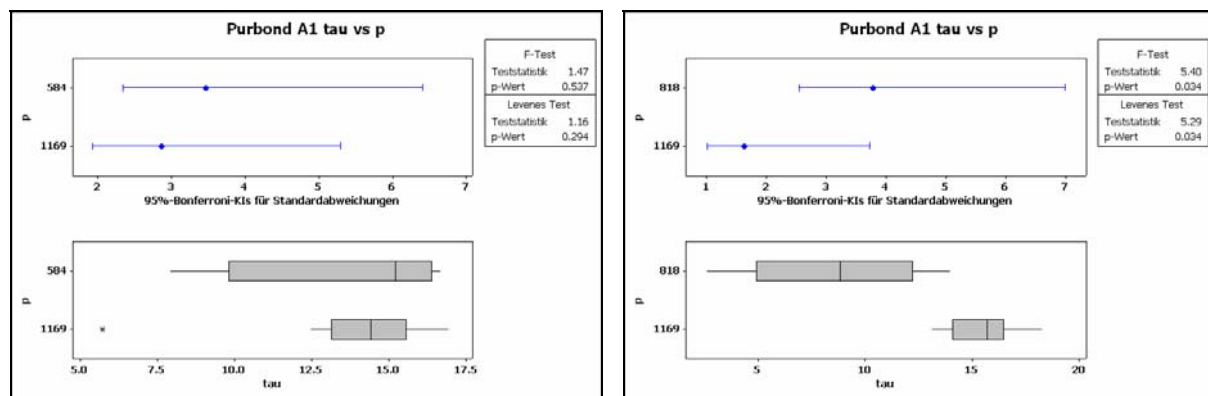


Abbildung 52 Purbond A1, Einfluss des Partialdrucks p [Pa] auf den Stufen $6.5\% \leq u \leq 7.2\%$ links und $7.8\% \leq u \leq 8.3\%$ rechts. Die Gleichheit der Varianzen wird rechts abgelehnt.

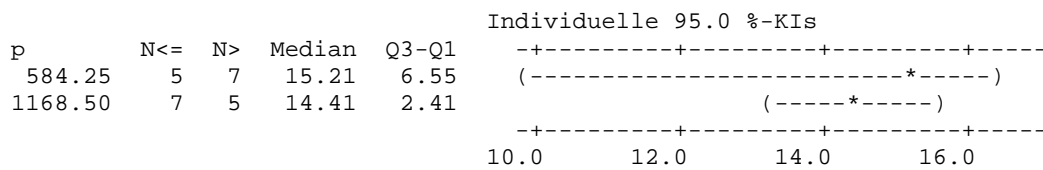
¹¹⁷ Anm.: Wird 0 von der Differenz nicht mehr überdeckt, ist die Faktorstufe signifikant.

¹¹⁸ Cognard S.188

Purbond A1, $6.5\% \leq u \leq 7.2\%$

Mood-Median-Test für tau

Chi-Quadrat = 0.67 DF = 1 P = 0.414

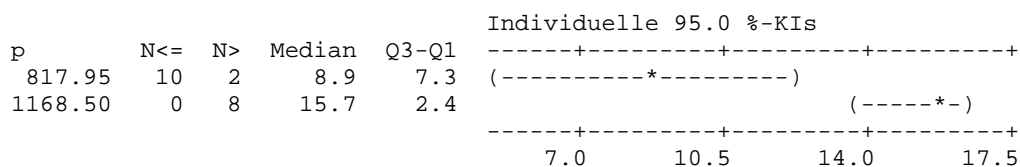


Gesamtmedian = 14.80

Purbond A1, $7.8\% \leq u \leq 8.3\%$

Mood-Median-Test für tau

Chi-Quadrat = 13.33 DF = 1 P = 0.000



Gesamtmedian = 12.9

Auf der unteren Holzfeuchtestufe kann statistisch kein Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden. Auch die Varianzen sind nicht signifikant verschieden. Erst mit leicht erhöhter Holzfeuchte setzt sich der Einfluss des Partialdrucks signifikant durch. So gesehen, kann der positive Einfluss vor allem auf die Streuung doch dem Partialdruck zugeschrieben werden.

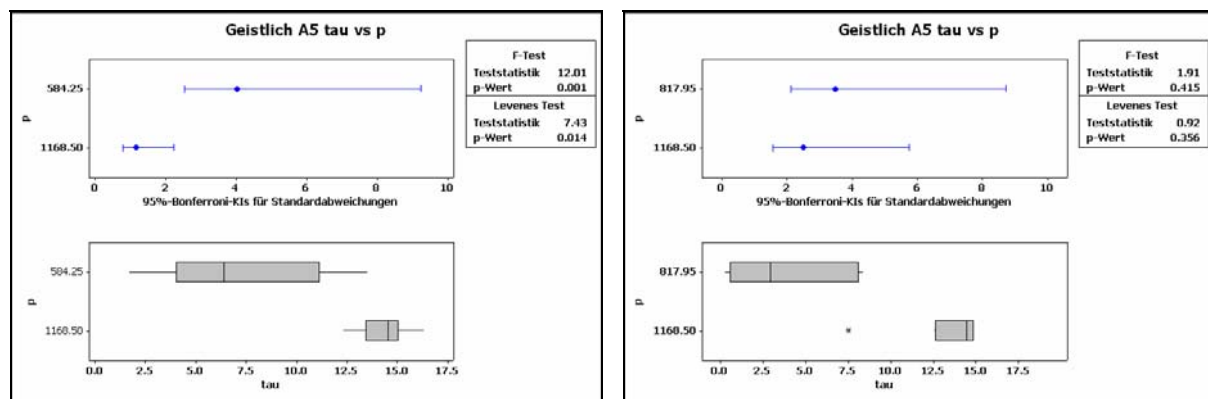


Abbildung 53 Geistlich A5, Einfluss des Partialdrucks p [Pa] auf den Stufen $6.5\% \leq u \leq 7.2\%$ links und $7.8\% \leq u \leq 8.3\%$ rechts. Links ist $Pr=1.15$ für $p=584$ und rechts ist $Pr=0.85$ für $p=818$.

Geistlich A5, $6.5\% \leq u \leq 7.2\%$

Mood-Median-Test für tau

Chi-Quadrat = 6.74 DF = 1 P = 0.009

p	N<=	N>	Median	Q3-Q1	Individuelle 95.0 %-KIs
584.25	7	1	6.4	7.1	(-----*-----)
1168.50	3	8	14.6	1.6	(---*)

3.5 7.0 10.5 14.0

Gesamtmedian = 13.4

Geistlich A5, $7.8\% \leq u \leq 8.3\%$

Mood-Median-Test für tau

Chi-Quadrat = 11.48 DF = 1 P = 0.001

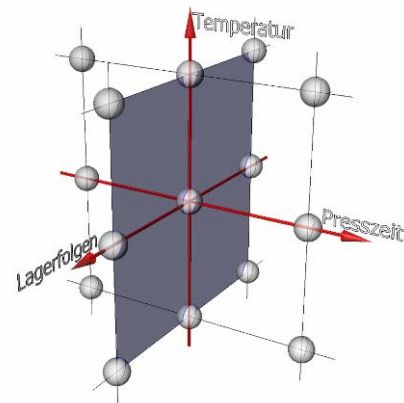
p	N<=	N>	Median	Q3-Q1	Individuelle 95.0 %-KIs
817.95	7	0	3.0	7.5	(-----*-----)
1168.50	1	7	14.5	2.2	(-----*)

4.0 8.0 12.0

Gesamtmedian = 8.4

Der Einfluss des Partialdrucks führt bei Geistlich A5 schon auf der unteren Feuchtestufe zu einer signifikanten Veränderung. Die Varianzen verbessern sich auf der oberen Feuchtestufe vor allem wegen des Ausreissers nicht.

4.3.4 Lagerfolgen und Temperatur



Die Lagerfolgen wurden auf der Stufe $u=13.5\%$ untersucht, weil man hier stabile Werte erwartete, was sich auch bestätigt hat (4.3.2). Die Lagerfolgen erfolgten auf den jeweiligen Temperaturstufen und wurden nicht früher als eine Woche nach dem Fügen begonnen.

4.3.4.1 Purbond A1

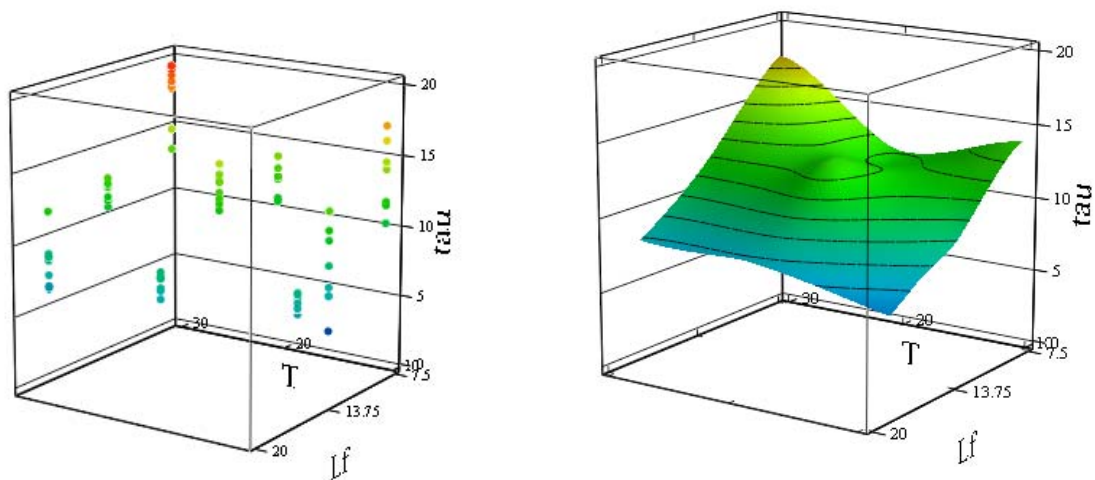


Abbildung 54 Scherfestigkeit tau von Purbond A1 gegen Lagerfolge (nach links vorne) und Temperatur (nach links hinten). Links Einzelwertdiagramm, rechts die Wirkungsfläche aus neun Mittelwerten.

Die Lagerfolge wirkt sich über den ganzen Temperaturbereich aus. Eine feuchte Lagerung ($u \approx 17\%$) senkt die Scherfestigkeit, eine trockene ($u \approx 8\%$) erhöht sie. Bei $T = 20^\circ\text{C}$ ist kein Effekt sichtbar von $u = 13.5\%$ auf $u = 8\%$. Auf der Stufe $u = 8\%$ scheint der Einfluss von $T = 30^\circ\text{C}$ positiv zu sein. Die Streuung der Werte scheint bei $T = 10^\circ\text{C}$ relativ hoch.

Es sind beide Haupteffekte und die Wechselwirkung signifikant. Es konnten keine homogenen Varianzen erreicht werden und sechs Beobachtungen auf ca. hundert mit ungewöhnlich grossem Residuum¹¹⁹ sind relativ viel. Die Anpassung ist mit $R^2 = 80\%$ akzeptabel.¹²⁰

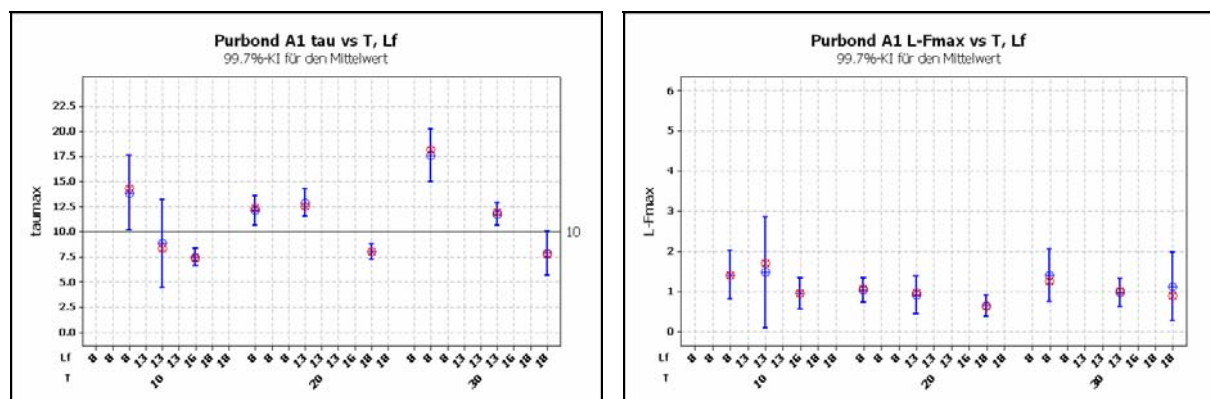


Abbildung 55 Purbond A1, 3σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von tau und L-Fmax gegen Temperatur T und Lagerfolge Lf. Die Skala für tau geht bis 22.5N/mm^2 .

¹¹⁹ standardisiertes Residuum > 2

¹²⁰ S8

Mit trockener Lagerung nimmt die Festigkeit, ausser bei 20°C zu. Dieser Wert lässt auch den Zweifel zu, dass der beobachtete Effekt von der Vorspannung herrührt. Die Verschiebungen sind bei 20°C am stabilsten und liegen im Bereich von 1%.

4.3.4.2 Purbond A4

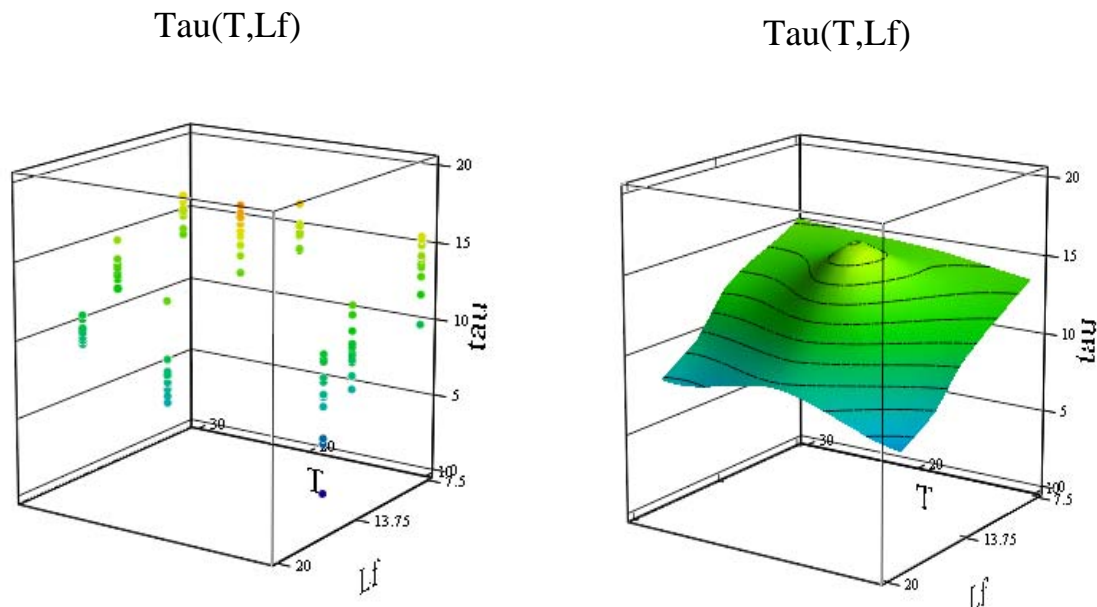


Abbildung 56 Scherfestigkeit τ von Purbond A4 gegen Lagerfolge (nach links vorne) und Temperatur (nach links hinten). Links Einzelwertdiagramm, rechts die Wirkungsfläche aus neun Mittelwerten.

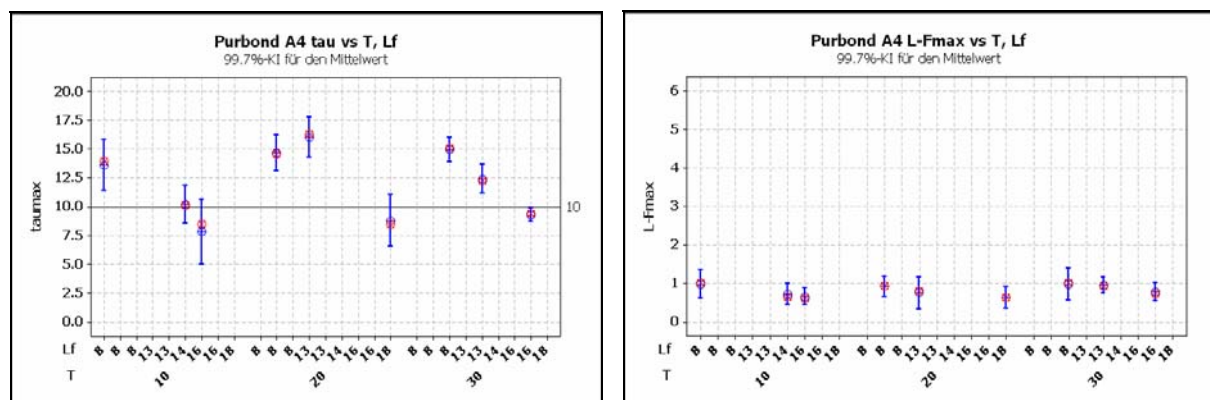


Abbildung 57 Purbond A4, 3 σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von τ und L_{Fmax} gegen Temperatur T und Lagerfolge L_f .

Der langsame Purbond Klebstoff A4 stellt sich für die Bruchscherspannung ähnlich dar wie für A1. Wieder fällt das Optimum bei $T=20^\circ\text{C}$ und $u=13,5\%$ auf, wobei die Werte etwas höher sind und sich hier das Maximum über alle Temperaturen findet. Auf den anderen Temperaturstufen ist wiederum die Abnahme der Festigkeit von trocken nach feucht zu beobachten. Die Verschiebungen bewegen sich mit kleinen Streuungen um 1%.

Die Temperatur T , die Lagerfolge Lf_std und ihre Wechselwirkungen sind signifikant. Es konnten keine homogenen Varianzen erreicht werden, die Varianzanalyse wurde trotzdem durchgeführt, der Bestimmtheitsgrad beträgt knapp 80%. Eine lineare Regression liefert hingegen einen schlechten Bestimmtheitsgrad, vor allem wegen dem Maximum bei $u=13.5\%$ und $T=20^\circ\text{C}$.¹²¹

4.3.4.3 Purbond A1 und A4

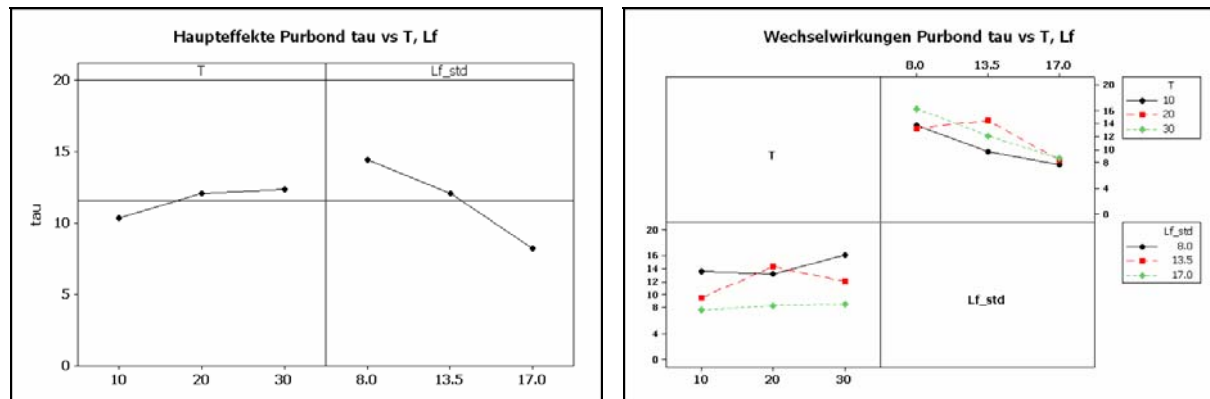


Abbildung 58 Haupteffekte und Wechselwirkungen für Purbond A1 und A4. Die Lagerfolge Lf_std ¹²² wirkt stärker als die Temperatur. Die Wechselwirkungen sind ausser bei $T=20^\circ\text{C}$ und $Lf=13.5\%$ schwach. Das Maximum wird gut sichtbar in den Wechselwirkungen (rote Linie).

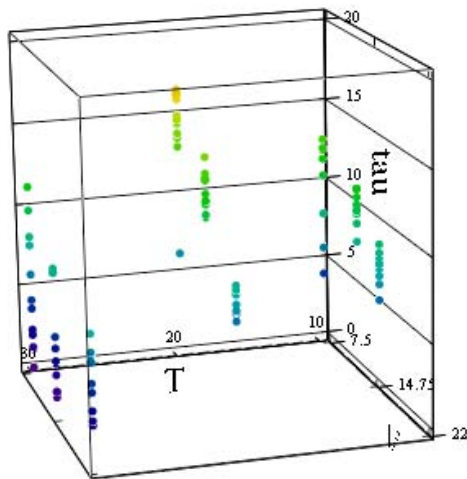
Beide Purbond Klebstoffe reagieren auf abnehmende Holzfeuchte Lf mit steigenden Werten. Höhere Temperatur bedeutet ebenfalls für beide Klebstoffe höheres τ_{\max} . Die Ausnahme bildet die Faktorstufenkombination $T=20^\circ$ und $Lf=13.5\%$, welche ein Maximum ist und für A4 deutlicher ist. A1 reagiert stärker auf eine erhöhte Temperatur. Die Verschiebungen von A4 sind stabiler und haben kleinere Varianzen.

¹²¹ S9

¹²² gerundeter Wert von Lf (17%)

4.3.4.4 Geistlich A5

$\tau(T, L_f)$



$\tau(T, L_f)$

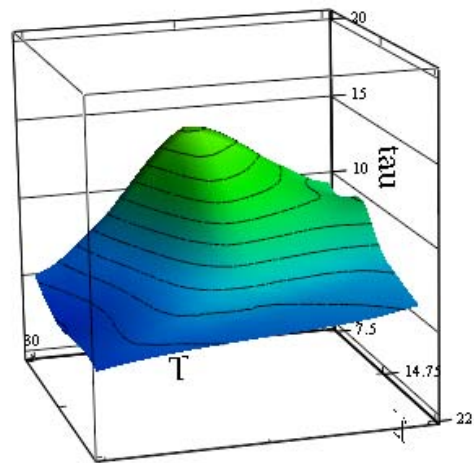


Abbildung 59 Scherfestigkeit τ von Geistlich A5 gegen Lagerfolge (zunehmend nach rechts vorne) und Temperatur (zunehmend nach links). Links Einzelwertdiagramm, rechts die Wirkungsfläche aus neun Mittelwerten.

Die Lagerfolge wirkt sich für Geistlich A5 auf der Stufe $T=20^\circ\text{C}$ aus. Der Kleber scheint eher positiv auf 10°C als auf 30°C (1 Totalausfall bei $L_f=8\%$) zu reagieren. Auf der Stufe $T=10^\circ\text{C}$ besteht ein Optimum bei $u=13.5\%$. Die feuchte Lagerfolge wirkt sich durchwegs negativ auf die Scherfestigkeit aus.

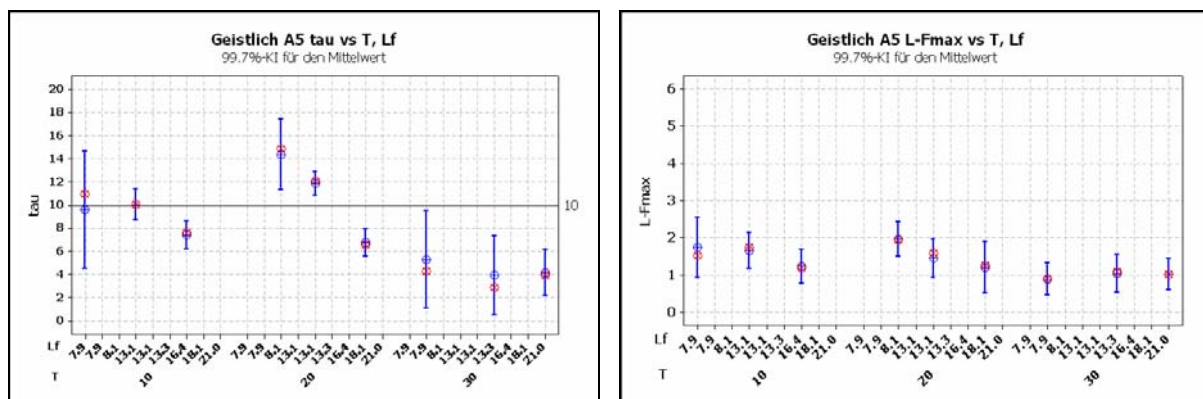
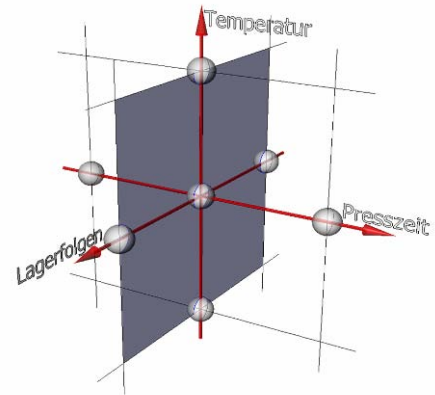


Abbildung 60 Geistlich A5, 3σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von τ und $L\text{-Fmax}$ gegen Temperatur T und Lagerfolge L_f . Nur zwei Gruppen liegen über dem Referenzwert von 10N/mm^2 .

Der Einfluss der Lagerfolge stellt sich hier gut dar, er ist am grössten bei 20°C . Die Varianzen nehmen zu mit $L_f=8\%$ und bei 30°C . Die Faktoren und die Wechselwirkungen sind signifikant. Die lineare Anpassung ist wegen der offensichtlichen Wölbung der Zielfläche schlecht. Die paarweisen Vergleiche zeigen dies deutlich. Zudem

sind nicht alle Faktorstufen signifikant.¹²³ Die Verschiebungen nehmen mit zunehmender Holzfeuchte Lf und Temperatur T eher ab.

4.3.4.5 Geistlich A8



Die Versuchsreihe 1 auf der Stufe 10°C musste wiederholt werden, da sie bei der Lagerung zu grosser Feuchte ausgesetzt war. Deshalb wurde auf die Temperaturvarianten für Geistlich A8 verzichtet, da dieser die längste Presszeit aufweist.

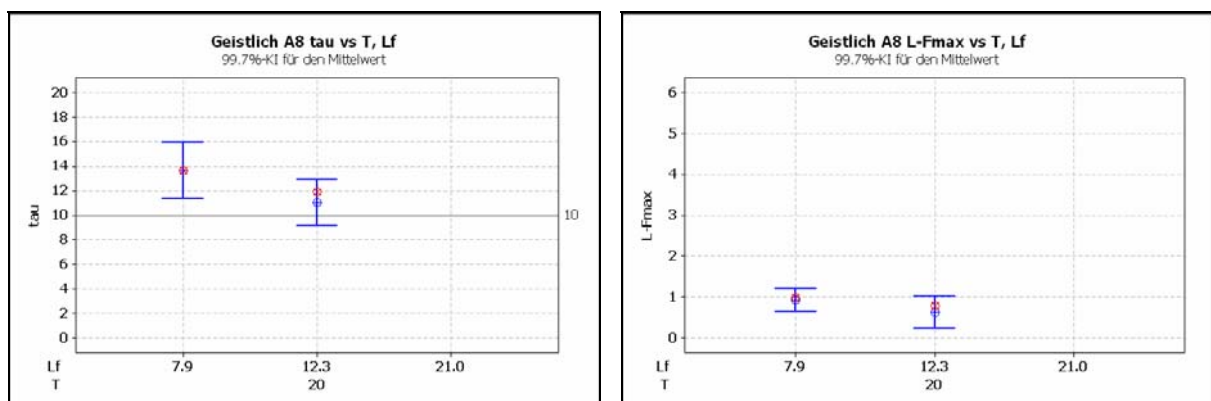


Abbildung 61 Geistlich A8, 3 σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von tau und L-Fmax gegen Lagerfolge Lf. Nur eine Gruppe liegt über dem Referenzwert von 10N/mm²

Der Geistlich Klebstoff A8 spricht gut auf eine trockene Lagerung an und führte zu einer unteren Grenze des Konfidenzintervalls grösser als 10N/mm^2 . Die feuchte Lagerstufe bewirkte ein Totalversagen der ganzen Gruppe.

Mood-Median-Test für tau
Chi-Quadrat = 3.20 DF = 1 P = 0.074

Individuelle	95.0 %-KIs
10.0	12.0
12.0	14.0
14.0	16.0

Gesamtmedian = 12.10

Der Effekt ist auf dem 95% Konfidenzniveau nicht signifikant. Es kann kein Test mit grösserer Power verwendet werden, da die Verteilung der Gruppen ungleich ist (auf der Stufe $L_f=12.3\%$ rechtssteil). Dennoch ist der p-Wert klein mit 0.074 und der Unterschied kann nicht völlig abgelehnt werden.

4.3.5 Purbond A1 und A4 – Zusatzwasser, Temperatur und Presszeit

Das Zusatzwasser wurde für die Purbond Klebstoffe nur in der Versuchsreihe 1 geprüft, da es in einer ersten Auswertung als nicht signifikant erschien¹²⁴. Die Probenkörper der Stufe $T=20^\circ\text{C}$ wurden unter zu grosser Luftfeuchte hergestellt, sie wurden hier aber in der Auswertung belassen, da es für die Stufen mit Zusatzwasser keine Muster in der Ausgleichsfeuchte hergestellt wurden.

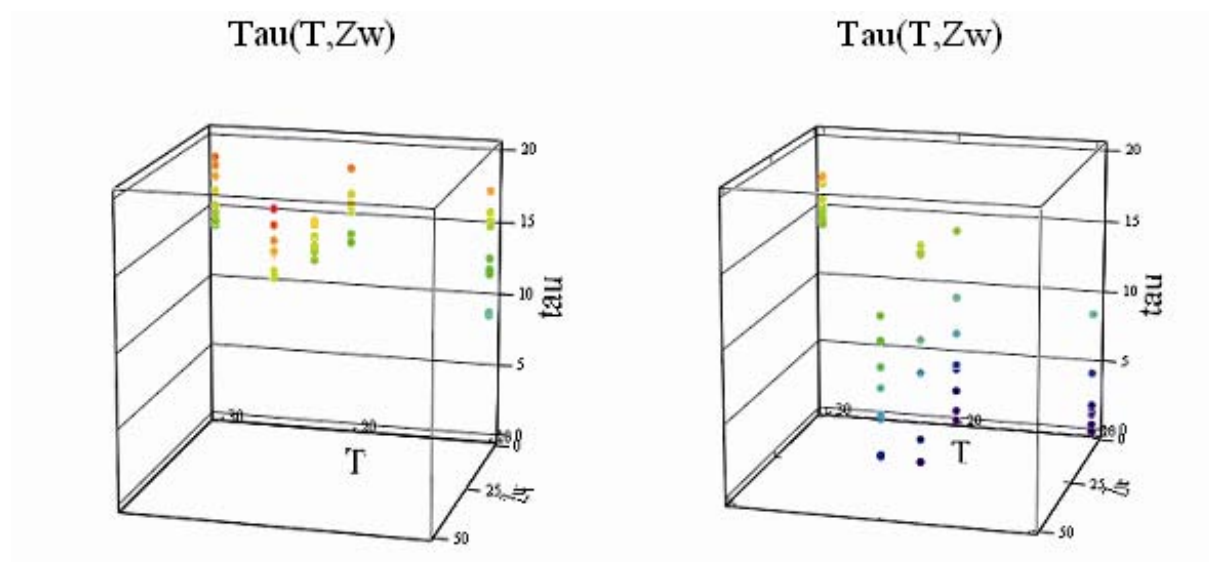
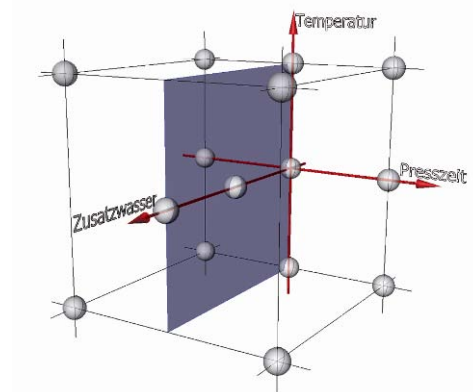
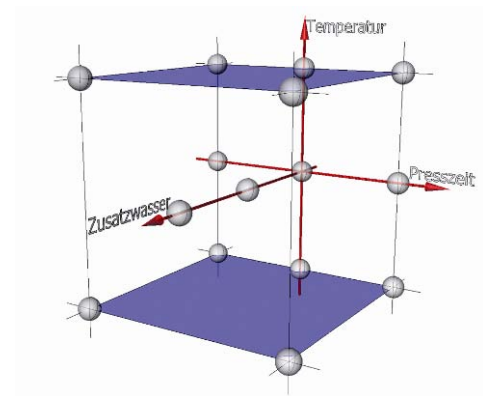


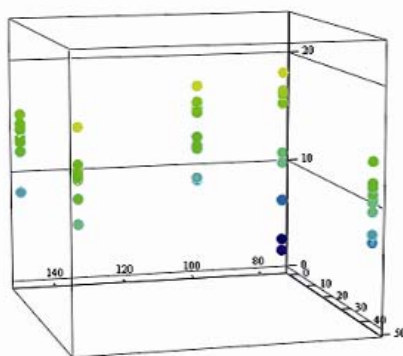
Abbildung 62 Die Einzelwerte der Bruchscherspannung für Purbond A1 links und A4 rechts gegen Temperatur T (nach links) und Zusatzwasser Zw (nach vorne). Die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen vor der Prüfung ist für A4 0.3 für $T=10^\circ\text{C}$, 0.125 für $T=20^\circ\text{C}$ und 0.25 mit 25g/m^2 Zusatzwasser Zw .

Purbond A1 liefert ausser auf der Stufe $T=10^\circ\text{C}$ gute Ergebnisse. Der Klebstoff A4 dagegen zeigt nur auf der Stufe $T=30^\circ\text{C}$ befriedigende Resultate.

¹²⁴ S3, S4



Tau (Zw, Pr)



Tau (Zw, Pr)

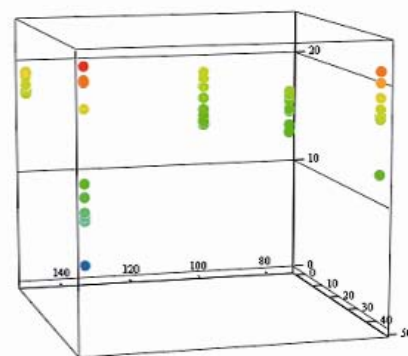
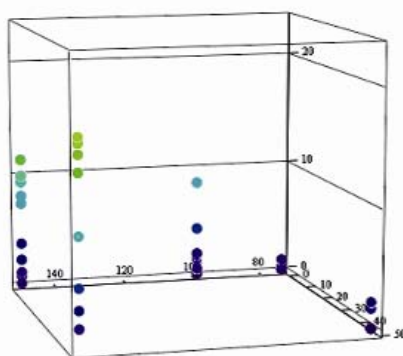


Abbildung 63 Purbond A1 gegen Presszeit Pr in % (nach links) und Zusatzwasser (nach vorne rechts) links bei $T=10^{\circ}\text{C}$ und rechts bei 30°C .

Tau (Zw, Pr)



Tau (Zw, Pr)

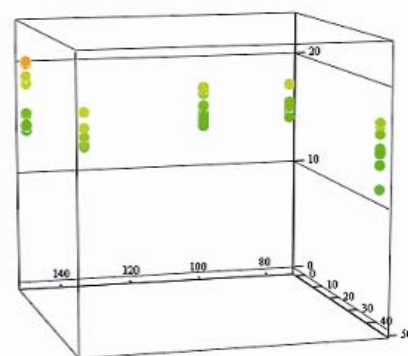


Abbildung 64 Purbond A4 gegen Presszeit Pr in % (nach links) und Zusatzwasser (nach vorne rechts) links bei $T=10^{\circ}\text{C}$ und rechts bei 30°C .

Das Zusatzwasser Zw scheint bei den Purbond Klebstoffen praktisch keinen Einfluss zu haben. Bei Purbond A1 kann auf der Stufe $T=10^{\circ}\text{C}$ und $Pr=0.75$ ein positiver Einfluss des Zusatzwassers vor allem auch auf die Streuung festgestellt werden. Auf der Stufe $T=30^{\circ}\text{C}$ wird das Gegenteil beobachtet. Die Reaktion auf die Presszeit ist unterschiedlich, vor allem bei niederen Temperaturen wirkt sie sich positiv aus. Der po-

sitive Einfluss der Temperatur vor allem auf das langsame System A4 ist deutlich, das auf den anderen Temperaturstufen an seine Grenzen stösst.

Die Resultate von Purbond A1 zeigen auf der Stufe $T=10^{\circ}\text{C}$ und auf der Stufe $T=30^{\circ}\text{C}$ grosse Varianzen. Die Anpassung des Modells wird dadurch zu schlecht. Die Temperatur scheint im betrachteten Bereich der einzige signifikante Faktor zu sein.

Die Ergebnisse von Purbond A4 wurden nur auf den Temperaturstufen $T=20$ und $T=30^{\circ}\text{C}$ statistisch ausgewertet, weil die Varianzen auf der Stufe $T=10^{\circ}\text{C}$ zu heterogen waren. Zusatzwasser Zw ist nur sehr knapp nicht signifikant mit $p=0.07$ und hat ein Maximum bei 25g/m^2 . Der Einfluss der Presszeit ist nicht signifikant, die Temperatur dagegen ist hochsignifikant. Die Anpassung des Modells ist mit $R^2=65\%$ nicht gut.¹²⁵

4.3.6 Holzfeuchte, Temperatur und Presszeit – Purbond Klebstoffe

Die Werte mit dem zu hohen Partialdruck P wurden für Purbond A1 und Geistlich A5 entfernt, da der Einfluss dort signifikant war. Die Klebstoffe Purbond A4 und Geistlich A8 wurden in der Auswertung belassen, da diese Klebstoffe nur in der Versuchsreihe 1 geprüft wurden und die offene Wartezeit im Verhältnis zur offenen Zeit oT klein war. Gleichzeitig zeigte sich auf den entsprechenden Stufen eine hohe Versagenswahrscheinlichkeit vor der Prüfung, so dass sich eine positive Beeinflussung nicht wesentlich auswirken dürfte.

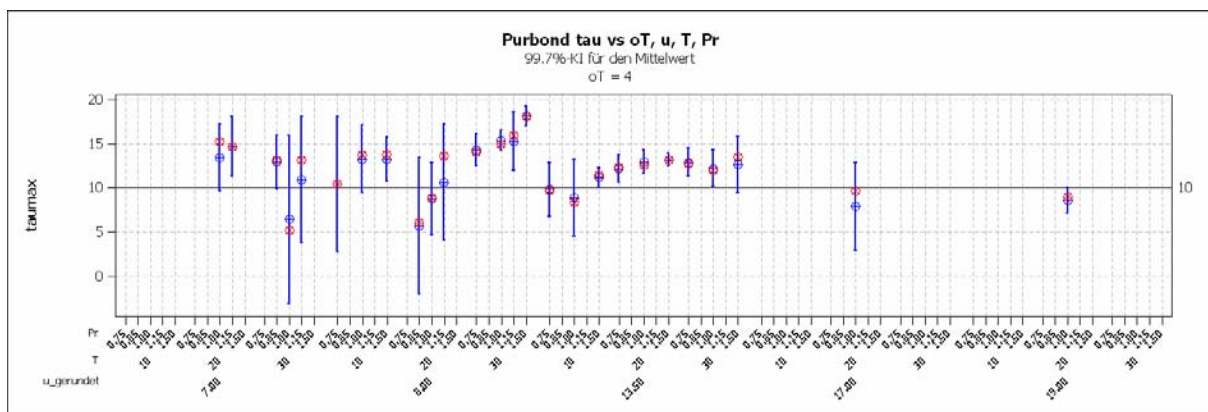


Abbildung 65 Purbond A1 3 σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.2% mit einer Standardabweichung von 0.56.

Der Purbond Klebstoff A1 reagiert nicht auf allen Holzfeuchtestufen u gleich auf den Einfluss der Temperatur T. Auf der Stufe $u=8\%$ erreicht er ein Optimum, auf $u=7\%$ ist eine sehr grosse Streuung der Resultate festzustellen. Auf der Stufe $u=13.5\%$ ist der Einfluss einer erhöhten Temperatur negativ auf die Streuung, vor allem bei steigender Presszeit. Erhöhte Presszeiten wirken sich vor allem im niederen Holzfeuchte- und Temperaturbereich positiv aus. Auf der Stufe $u=8\%$ und $T=20^{\circ}\text{C}$ ist ein Abfallen der Werte zu verzeichnen.

Die Resultate der Bruchscherspannung für Purbond A1 können statistisch nicht ausgewertet werden, da die Varianzen zu heterogen sind und das lineare Modell der

ANOVA nicht genügt. Dies ist auch der Fall für die Gruppen mit dem 3σ -KI oberhalb 10N/mm^2 . Es ist auch möglich, dass Kovariablen existieren, die im Modell nicht berücksichtigt sind.

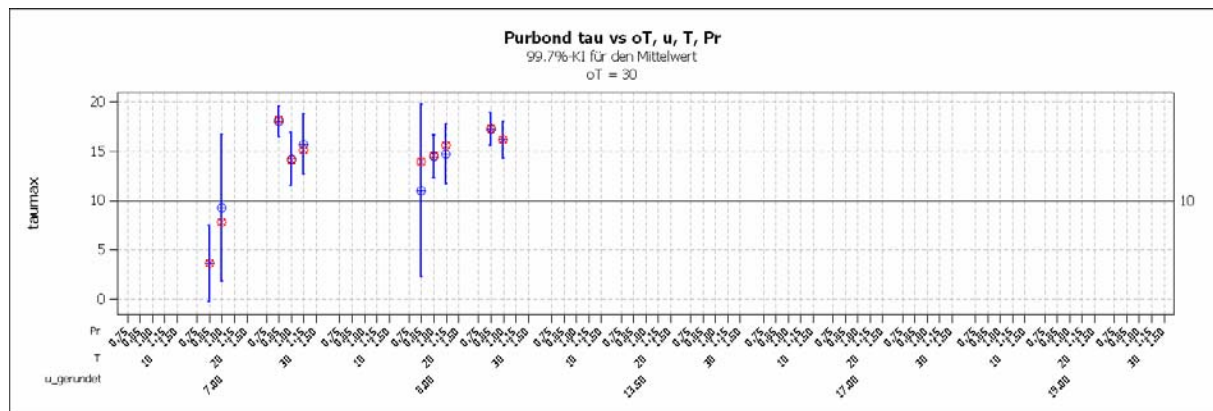


Abbildung 66 Purbond A2 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.1% mit einer Standardabweichung von 0.54. Auf der Stufe $T=20^\circ\text{C}$, $Pr=0.85$ und $u=7\%$ besteht eine Versagenswahrscheinlichkeit vor der Prüfung von 0.25, auf der Stufe $u=8\%$ 0.1.

Auf der Stufe $u=7\%$ reagiert der Purbond Klebstoff A2 stark positiv auf die höhere Temperaturstufe $T=30^\circ\text{C}$. Die Stufe $u=8\%$ erbringt schon ab der Presszeit $Pr=1$ gute Resultate. Die Erhöhung der Temperatur auf $T=30^\circ\text{C}$ wirkt sich wiederum positiv aus. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist auf der Stufe Presszeit $Pr=0.85$ und $u=7\%$ 0.25 und auf der Stufe $u=8\%$ 0.1.

Die Residuen sind gut normalverteilt, aber die Varianzen sehen ähnlich schlecht aus wie für A1. Der Bestimmtheitsgrad für das lineare Modell ist mit $R^2 \approx 40\%$ nicht gut. Die Holzfeuchte u und die Temperatur T sind signifikant. Die Stufe Presszeit von $Pr=0.85$ auf $Pr=1$ ist ebenfalls signifikant.¹²⁶

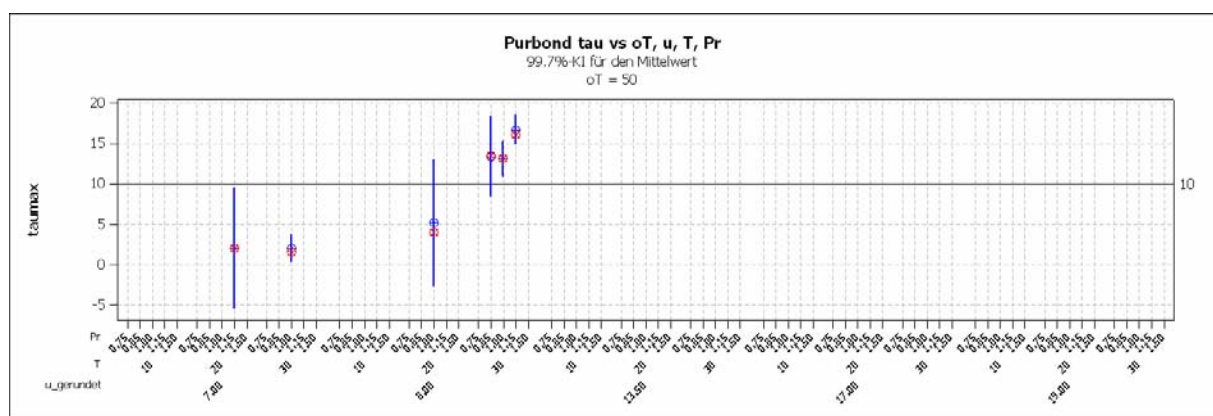


Abbildung 67 Purbond A3 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.0% mit einer Standardabweichung von 0.8. Die Versagenswahrscheinlichkeit auf der Stufe $u=7\%$ ist

Für Purbond A3 beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit vor der Prüfung auf der Stufe $u=7\%$ und $T=20^\circ\text{C}$ knapp 1. Einziger Faktor, der die Versagenswahrscheinlichkeit senkt, ist die leicht erhöhte Presszeit $Pr=1.15$.

eine leichte Verbesserung. Auf der Stufe $T=30^{\circ}\text{C}$ nimmt sie für $Pr=1$ schon wesentlich ab. Auf der Stufe $u=8\%$ ist ebenfalls der starke Einfluss der Temperatur offensichtlich. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist auch mit der nominalen Presszeit noch fast 0.5. Auf der Stufe $T=30^{\circ}\text{C}$ sinkt sie jedoch auf 0. Eine statistische Auswertung macht mit den vorliegenden Varianzen und Versageranteilen keinen Sinn. Die Tendenz ist jedoch deutlich und der Klebstoff funktioniert im untersuchten Bereich nur unter erhöhten Temperaturen.

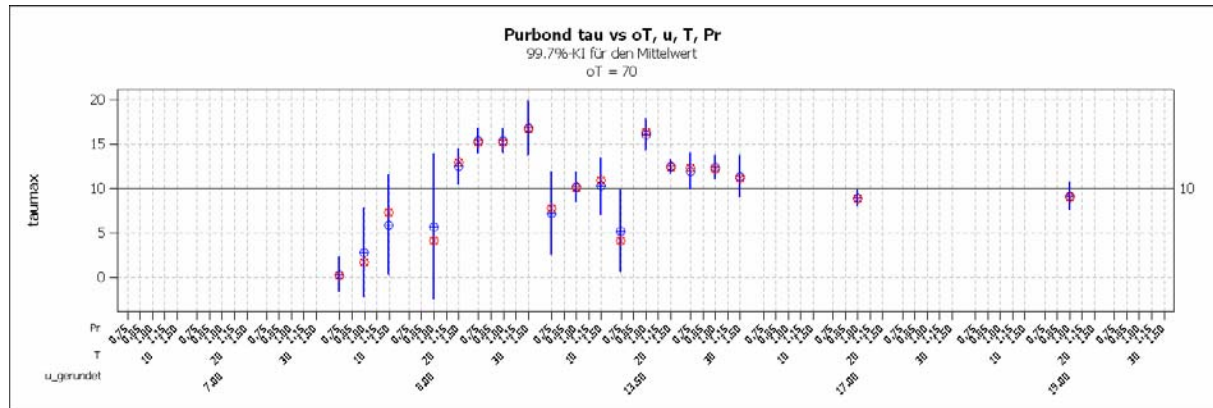


Abbildung 68 Purbond A4 3 σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 0.9% mit einer Standardabweichung von 0.41.

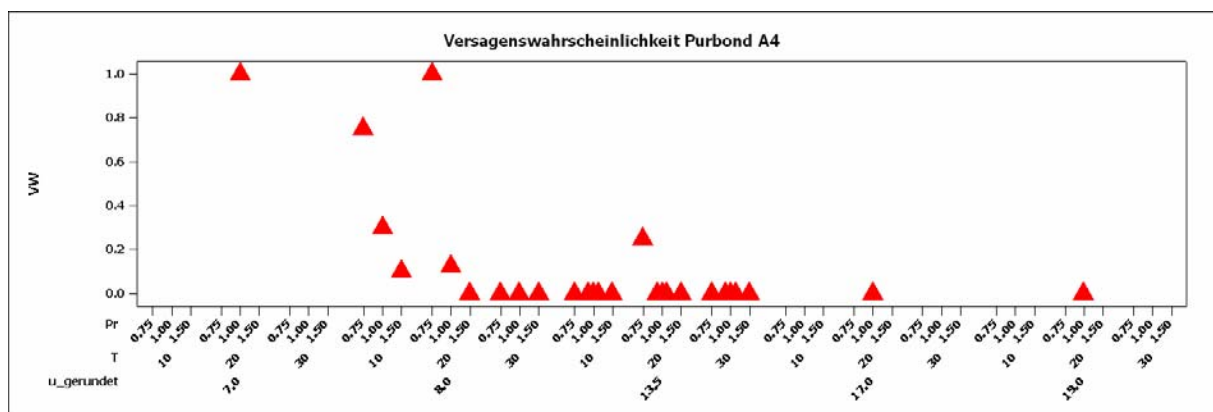


Abbildung 69 Purbond A4 Wahrscheinlichkeit für Totalversagen vor der Prüfung.

Der Purbond Klebstoff A4 ergibt ähnliche Resultate wie A3. Er wurde nur in der Versuchsreihe 1 geprüft, da die Resultate im tiefen Feuchtebereich ungenügend waren. Wiederum fällt die positive Reaktion auf die Temperaturstufe $T=30^{\circ}\text{C}$ auf. Auf der Stufe $u=13.5\%$ ist der Einfluss einer erhöhten Temperatur sowie der erhöhten Presszeit eher negativ.

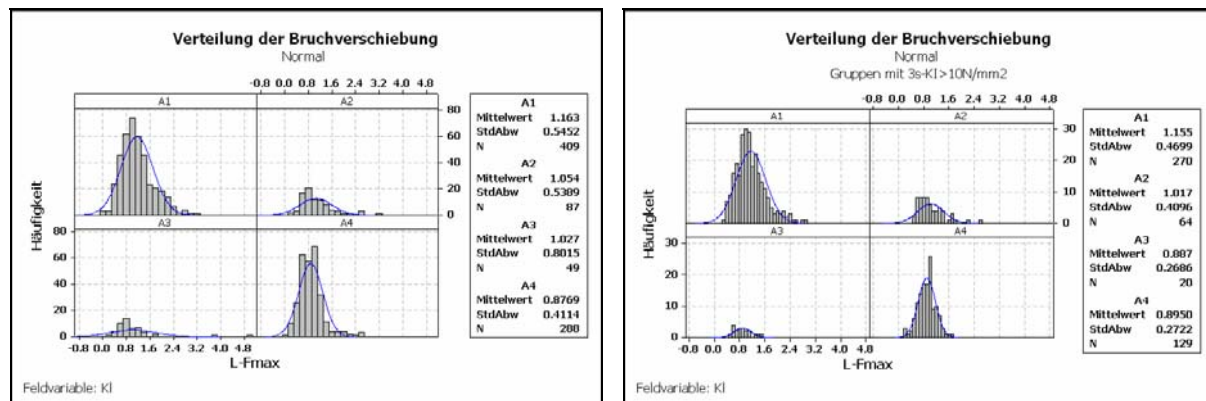


Abbildung 70 Bruchverschiebungen der Purbond Klebstoffe. Links die Verteilung für alle in diesem Abschnitt behandelten Gruppen, rechts die Verteilung der Gruppen, deren untere Grenze des 3σ -KI für den Mittelwert über 10N/mm^2 liegt.

Die Mittelwerte für die Bruchverschiebung verändern sich nicht stark für die beiden Grundgesamtheiten und liegen ca. bei 1%. Die Standardabweichungen nehmen jedoch deutlich ab für die ‚gute‘ Gruppen.

Die einzelnen Klebstoffe müssen differenziert betrachtet werden, wie auch die Faktorstufen und ihre Kombinationen. Betrachtet man die offene Zeit der Klebstoffe, so zeigt sich ein Optimum bei $\sigma T = 30\text{min}$, also einigermaßen in der Mitte des untersuchten Bereichs. Auffällig ist vor allem die gute Reaktion auf die Temperaturstufe $T = 30^\circ\text{C}$ auf der Holzfeuchte $u = 8\%$. Dieser Effekt bestätigt sich bei grösserer Holzfeuchte nicht. Eine erhöhte Presszeit hat im unteren Feuchtebereich ebenfalls eine positive Wirkung und bei niederen Temperaturen ebenfalls einen positiven Einfluss. Auch dieser Effekt kehrt sich auf anderen Stufen ins Negative um. Die besten Resultate werden jedoch nicht bei Normalklima und nomineller Presszeit erreicht, sondern auf den oben erwähnten Faktorstufen.

Die Gesamtheit der Daten ist zu komplex und heterogen, da die Klebstoffe vor allem in ihrem Grenzbereich geprüft wurden und ist so nicht geeignet für die Auswertung mit einem linearen Modell.

4.3.7 Holzfeuchte, Temperatur, Presszeit und Zusatzwasser - Geistlich Klebstoffe

Die Graphiken in diesem Abschnitt wurden zur besseren Lesbarkeit eingefärbt, da die vier Faktoren sonst sehr unübersichtlich werden. Die einzelnen Farben stellen je einen Feuchtebereich u (7, 8, 13.5%) dar. Die braunen Punkte am unteren Graphikrand sind die Grenzen der Faktorstufen für das Zusatzwasser Z_w (0, 25, 50g/m²) und die dunkler eingefärbten Farbstreifen sind jeweils die Temperaturspannweite T (10, 20, 30°C).

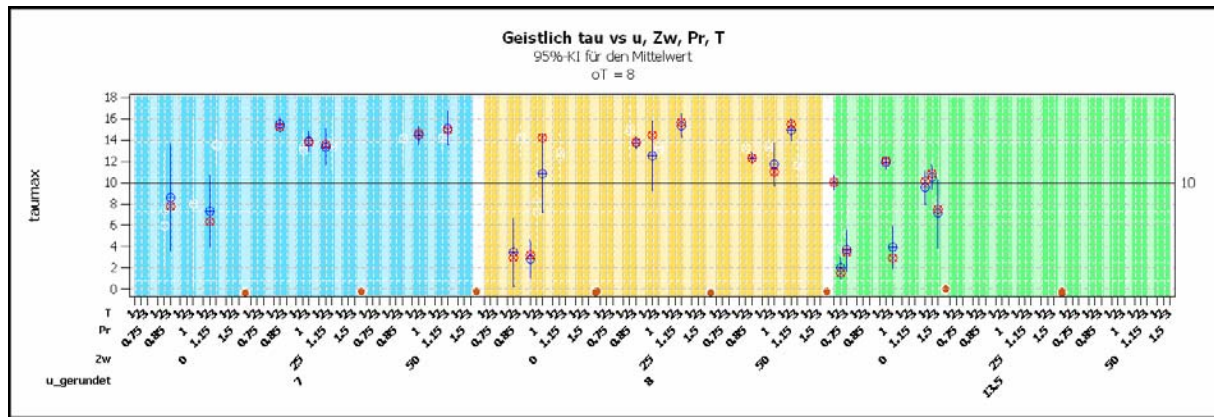


Abbildung 71 Geistlich A5 3 σ -KI für den Mittelwert von τ gegen u , Z_w , Pr und T . Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.8% mit einer Standardabweichung von 0.97.

Der Geistlich Klebstoff A5 zeigt eine gute Reaktion auf das Zusatzwasser. Der Holzfeuchte gegenüber wird erst bei $u=13.5\%$ eine positive Reaktion sichtbar.

Die Varianzanalyse wurde trotz schlecht homogener Varianzen durchgeführt. Es sind alle Faktoren signifikant, T knapp auf dem 95%-Niveau. Die Effekt u zeigt zwei Gruppen die stark nach unten abweichen und das Ergebnis eventuell beeinflussen. Der Bestimmtheitsgrad liegt wahrscheinlich auch deshalb nur bei ca. 60%, was sich auch in den ungewöhnlichen Beobachtungen widerspiegelt *S14*. Die Einwirkung von u kann trotzdem nicht abgelehnt werden, vor allem wenn die Entwicklung der Werte über den ganzen Feuchtebereich betrachtet wird. Die Wechselwirkungen konnten nicht geschätzt werden.

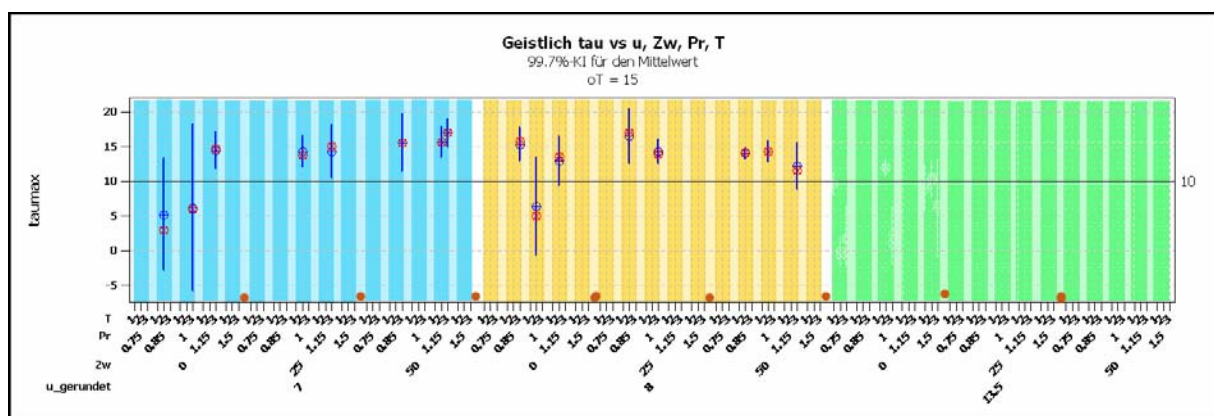


Abbildung 72 Geistlich A6 3 σ -KI für den Mittelwert von τ gegen u , Z_w , Pr und T . Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 2.0% mit einer Standardabweichung von 0.74.

Für Geistlich A6 scheint vor allem wieder das Zusatzwasser im Zusammenspiel mit der Presszeit für gute Resultate zu sorgen. Die Wirkung der Presszeit scheint sich bei $u=8\%$ etwas abzuschwächen. Die Versuche bei $u=8\%$; $Pr=1$, $Z_w=0$ und $T=20^\circ\text{C}$ zeigen eine ungewöhnliche Abweichung nach unten. Auf $u=7\%$, $T=30^\circ\text{C}$, $Pr=1$ und $Z_w=0$ ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit von 0.4, auf $u=7\%$, $Pr=1$, $Z_w=25$ und $T=20^\circ\text{C}$ 0.08. Dies kann auch auf eine ungleichmässige Verteilung beim Aufsprühen des Wassers hindeuten.

Die Resultate weisen wiederum bei guter Normalverteilung eine starke Streuung der Varianzen auf. R^2 ist mit ca. 30% ungenügend. Dennoch erweisen sich die gleichen Faktoren wie oben als signifikant.¹²⁷

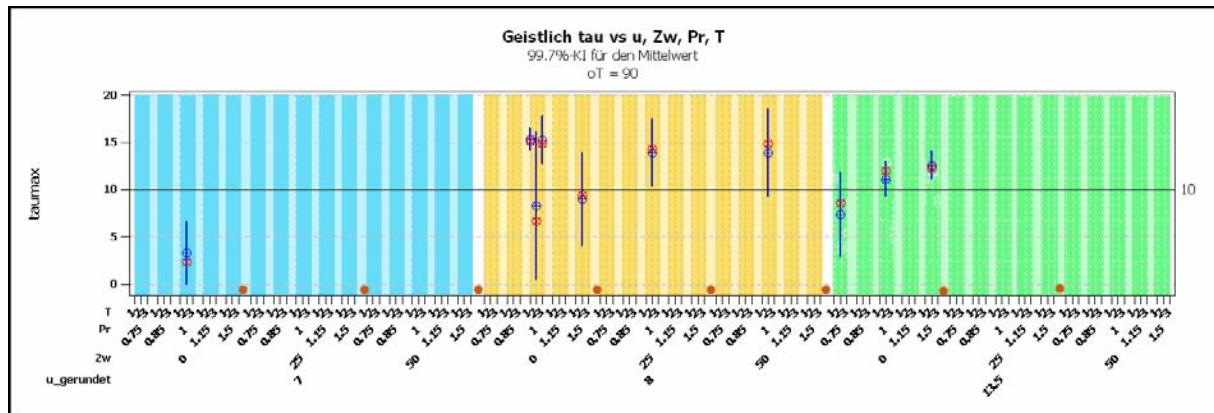


Abbildung 73 Geistlich A8 3 σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, Zw, Pr und T. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.29% mit einer Standardabweichung von 0.97.

Der Geistlich Klebstoff A8 wurde wie Purbond A4 nur in der Versuchsreihe 1 geprüft. Wiederum ist bei $u=8\%$, $Zw=0$, $Pr=1$ und $T=20^\circ\text{C}$ ein massives Abfallen der Werte zu verzeichnen. Auf der Stufe $u=13.5\%$ ist ein positiver Einfluss der Presszeit festzustellen.

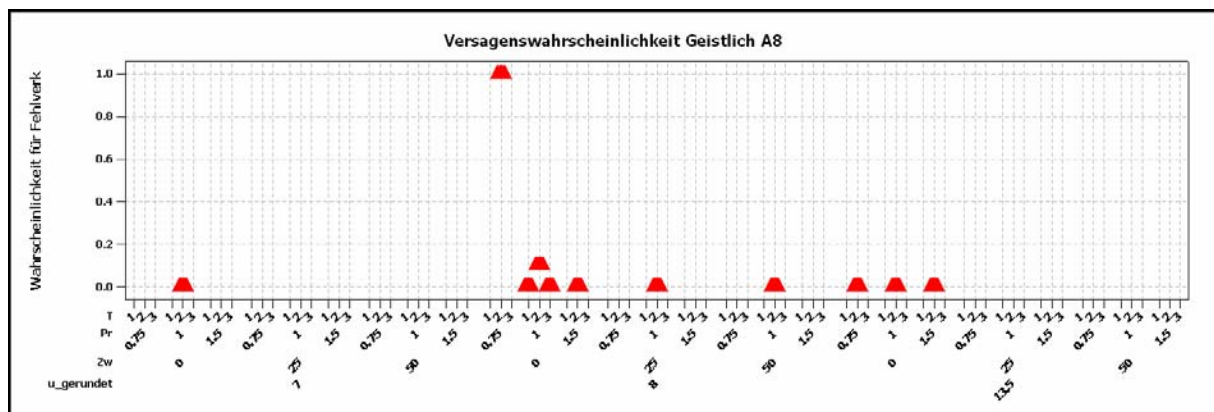


Abbildung 74 Versagenswahrscheinlichkeit für Geistlich A8.

Der Effekt Presszeit ist sehr stark vor allem, wenn er unter $Pr=1$ fällt.

Es wurde wiederum trotz der schlechten Varianzen eine Analyse durchgeführt. Für die ANOVA mit den genauen Werten für u musste ein Term im Modell entfernt werden. Dazu wurde die Temperatur T ausgesucht, da sie bis jetzt den kleinsten Effekt beigetragen hatte. Die Faktoren Holzfeuchte u und Zusatzwasser sind hochsignifikant, p für Pr ist 0.025 und R^2 ist ca. 60%. In der Auswertung mit den gerundeten Werten erscheinen alle Faktoren hochsignifikant, T zeigt jedoch ein Abfallen der Werte bei 20°C . Der Bestimmtheitsgrad ist gleich.

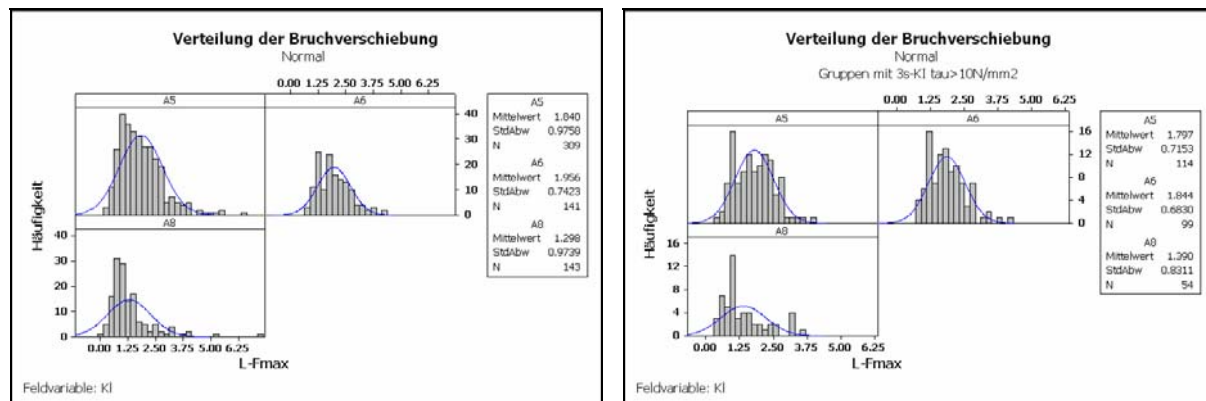


Abbildung 75 Bruchverschiebungen der Geistlich Klebstoffe. Links die Verteilung für alle in diesem Abschnitt behandelten Gruppen, rechts die Verteilung der Gruppen, deren untere Grenze des 3 σ -KI für den Mittelwert über 10N/mm² liegt.

Die Abnahme der Bruchverschiebung der ‚guten‘ Gruppen ist sehr klein. Die Standardabweichung nimmt nicht ab über alle drei Gruppen betrachtet.

4.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Bruchscherspannung

Die Purbond wie die Geistlich Klebstoffe zeigen bei der ANOVA der Einzelwerte und bei der linearen Regression einen sehr schlechten Bestimmtheitsgrad (knapp über 20%). Dies rührt zum Teil von den heterogenen Varianzen, aber auch der Krümmung der Antwortflächen her. Aus diesem Grund müssen die einzelnen Faktoren und Kombinationen eher getrennt betrachtet werden, als in einer zusammenfassenden Betrachtung. Im folgenden wird versucht, an Hand einer Rangfolge der unteren Grenze des 3 σ -KI für den Mittelwert der Bruchscherkraft τ , eine Tendenz sichtbar zu machen.

Die gelb markierten Bereiche der Untergrenze für das Konfidenzintervall wurden in einen 4 σ -Bereich umgewandelt, da die Normalverteilung¹²⁸ für die Bruchscherkraft nicht gegeben war. Das Konfidenzintervall wird trotzdem weiter 3 σ -KI genannt. Es wurden nur die Gruppen, bei denen eine erste Einteilung eine Einordnung über 10N/mm² ergab, auf Normalverteilung getestet. Die nicht normalverteilten Gruppen betrafen auffallend oft jeweils die schnellen Systeme Purbond A1 (6 von 7) und Geistlich A5 (3 von 4). Für den Faktor Lf wurden die speziellen Lagerfolgen rot gekennzeichnet. Im betrachteten Bereich tritt nur die trockene Lagerfolge Lf=8% auf. Der Faktor p wurde nicht weiter betrachtet, da er sich wie schon gesehen mit anderen Faktoren vermischt. Rot gekennzeichnet sind die Gruppen, die bei überhöhter Luftfeuchte verklebt wurden.

Für beide Klebstoffe wurden die Faktorstufen im 3 σ -KI oberhalb 10N/mm² Bruchspannung ausgezählt, gewichtet und standardisiert. Die Darstellung erfolgte in Säulendiagrammen. Wiederum können so natürlich keine Wechselwirkungen erkannt werden, trotzdem kann die relative Häufigkeit so mit den anderen Auswertungen zusammen Hinweise für eine globale Beurteilung der Klebstoffe geben. Zu beachten ist auch die Veränderung der Rangfolge der Mittelwerte (Spalte ganz rechts in den Tabellen).

¹²⁸ Anderson-Darling Test, 95% Konfidenzniveau.

4.3.8.1 Purbond Klebstoffe

PrID	u	T	Pr	Kl	oT	Zw	Lf (u)	p	Mittelwert tau	Varianz	stabw	varKoeff	Mittelwert L-Fmax	Varianz	stabw	varKoeff	Mittelwert Fbr	3s_MW_u	1.96s_u	Reihe N	Rangfolge Mittelwert		
nr	[%]	[°C]	[%]	[]	[min]	[g/m²]	[%]	(Pa)	[N/mm²]			[%]	[%]	[%]		[%]							
C2F3E3A1	7.9	30	0.85	A1	4	0	7.3	1612	18.13	0.49	0.70	3.86	1.11	0.08	0.27	24.69	0.875	0.00	17.27	16.76	1	8	2
C1F3E4A2	7.1	30	0.85	A2	30	0	7.2	1188	18.00	0.89	0.95	5.26	0.84	0.02	0.13	15.91	0.55	0.00	16.84	16.14	2	8	3
C2F3E4A2	7.8	30	0.85	A2	30	0	8.1	1612	17.23	0.99	0.99	5.77	0.99	0.17	0.42	42.03	0.74	0.00	16.01	15.28	2	8	5
C2F3E3A4D3	7.9	30	1.5	A4	70	50	7.3	1612	17.08	1.29	1.14	6.66	0.89	0.05	0.23	26.10	0.6125	0.00	15.69	14.85	1	8	7
C2F2E2A1D3	8.3	20	1.1	A1	4	50	7.6	1169	17.22	2.41	1.55	9.01	1.29	0.23	0.48	37.48	0.3625	0.00	15.32	14.18	1	8	6
C2F3E1A1D3	7.9	30	0.75	A1	4	50	7.2	1612	18.34	7.60	2.76	15.03	1.57	0.32	0.57	36.14	0.3875	0.00	14.96	12.93	1	8	1
C2F3E2A2	7.8	30	1.1	A2	30	0	7.9	1612	16.16	1.27	1.13	6.97	1.02	0.09	0.29	28.87	0.84	0.00	14.78	13.95	2	8	10
C2F3E2A1H1	13.4	30	1.1	A1	4	0	7.9	2885	17.61	4.22	2.05	11.66	1.41	0.27	0.52	36.75	0.64	0.00	14.71	13.59	1	10	4
C2F3E5A3	7.8	30	1.15	A3	50	0	7.8	1612	16.67	2.54	1.59	9.56	0.92	0.10	0.32	34.74	0.60	0.00	14.66	13.55	2	12	9
C3F2E2A4	13.6	20	1.1	A4	70	0	12.8	1519	16.04	1.85	1.36	8.47	0.74	0.09	0.30	40.44	0.18	0.00	14.60	13.38	1	10	11
C2F2E2A1D2	8.3	20	1.1	A1	4	25	7.7	1169	15.60	0.75	0.87	5.57	0.82	0.05	0.23	27.91	0.6375	0.00	14.54	13.90	1	8	13
C2F3E1A4	7.9	30	0.75	A4	70	0	7.4	1612	15.38	0.75	0.87	5.64	0.79	0.02	0.13	16.41	0.275	0.00	14.32	13.68	1	8	17
C2F3E2A4	7.9	30	1.5	A4	70	0	7.3	1612	15.43	1.51	1.23	7.97	0.94	0.04	0.20	21.75	0.36667	0.00	14.26	13.02	1	12	16
C3F3E2A4H1	13.4	30	1.1	A4	70	0	8.3	2885	14.94	0.67	0.82	5.46	0.97	0.10	0.32	33.13	0.34	0.00	14.07	13.34	1	10	20
C2F3E2A1	7.8	30	1.1	A1	4	0	8.0	1612	15.50	1.62	1.27	8.21	0.88	0.03	0.19	21.23	0.21	0.00	13.94	13.00	2	8	15
C2F3E2A1	7.9	30	1.1	A1	4	0	7.4	1612	15.29	2.96	1.72	11.25	1.40	0.15	0.39	27.76	0.308333	0.00	13.66	11.92	1	12	18
C2F2E2A1	8.3	20	1.1	A1	4	0	7.7	1169	15.56	2.64	1.63	10.45	0.84	0.04	0.21	24.99	0.4125	0.00	13.57	12.37	1	8	14
C2F2E2A4H1	13.6	20	1.1	A4	70	0	8.3	1519	14.66	0.98	0.99	6.74	0.91	0.03	0.17	18.77	0.325	0.00	13.45	12.72	1	8	23
C1F3E5A2	7.1	30	1.15	A2	30	0	6.9	1188	15.69	5.94	2.44	15.53	0.83	0.05	0.23	28.07	0.06	0.00	13.11	10.91	2	10	12
C2F3E1A1	7.9	30	0.75	A1	4	0	7.5	1612	14.28	2.16	1.47	10.29	0.95	0.51	0.71	75.04	0.26	0.00	12.72	11.40	1	10	26
C2F3E1A4D3	7.9	30	0.75	A4	70	50	7.4	1612	14.87	3.26	1.81	12.14	0.99	0.16	0.39	39.77	0.017288	0.00	12.66	11.33	1	8	21
C2F2E2A2	7.8	20	1.2	A2	30	0	7.9	818	14.47	3.97	1.99	13.77	1.36	0.37	0.61	44.79	0.35	0.00	12.58	10.57	2	12	25
C3F2E3A1	13.5	20	1.5	A1	4	0	13.5	1519	13.16	0.41	0.64	4.89	1.16	0.23	0.48	41.63	0.533333	0.00	12.55	11.90	1	12	35
C2F2E5A2	7.8	20	1.15	A2	30	0	8.1	818	14.71	3.27	1.81	12.29	0.99	0.11	0.33	32.89	0.38	0.00	12.49	11.17	2	8	22
C2F3E5A1	7.8	30	1.15	A1	4	0	7.9	1612	15.22	6.79	2.61	17.12	1.56	0.17	0.41	26.28	0.40	0.00	12.46	10.11	2	10	19
C1F3E2A2	7.1	30	1.2	A2	30	0	6.9	1188	14.20	4.52	2.12	14.96	0.98	0.10	0.32	32.19	0.85	0.00	11.95	10.04	2	10	27
C2F3E3A4	13.5	20	1.5	A4	70	0	13.5	1519	12.48	0.42	0.65	5.22	0.81	0.06	0.25	30.92	0.141667	0.00	11.86	11.20	1	12	42
C3F2E2A1	13.6	20	1.1	A1	4	0	13.0	1519	12.88	1.13	1.06	8.25	0.91	0.14	0.37	40.62	0.3	0.00	11.75	10.80	1	10	39
C3F1E2A4H1	13.3	10	1.1	A4	70	0	7.8	760.7	13.59	3.07	1.75	12.91	0.97	0.09	0.30	30.55	0.56	0.00	11.73	10.15	1	10	31
C1F2E5A1	7.1	20	1.15	A1	4	0	7.2	584.3	14.65	9.75	3.12	21.31	1.08	0.15	0.39	35.78	0.58	0.00	11.69	8.53	2	12	24
C2F2E3A1	8.3	20	1.5	A1	4	0	7.4	1169	13.77	2.94	1.72	12.46	0.88	0.14	0.37	42.38	0.2125	0.00	11.67	10.41	1	8	30
C3F3E1A1	13.4	30	0.75	A1	4	0	13.4	2885	12.87	1.65	1.28	9.99	1.09	0.07	0.27	24.88	0.81	0.00	11.50	10.35	1	10	40
C2F3E2A3	7.8	30	1.1	A3	50	0	8.0	1612	13.08	1.72	1.31	10.02	0.84	0.03	0.17	20.10	0.22	0.00	11.48	10.51	2	8	36
C3F3E2A4	13.4	30	1.1	A4	70	0	13.4	2885	12.40	0.93	0.96	7.77	0.94	0.03	0.16	17.47	0.11	0.00	11.38	10.51	1	10	43
C1A1	6.6	20	1.1	A1	4	0	6.6	1169	13.87	8.19	2.86	20.63	0.93	0.13	0.36	39.09	0.26667	0.00	11.16	8.26	1	12	28
C3F1E2A1H1	13.3	10	1.1	A1	4	0	8.0	760.7	13.86	5.60	2.37	17.07	1.41	0.15	0.39	27.59	0.175	0.00	10.96	9.22	1	8	29
C3F2E2A1H1	13.6	20	1.1	A1	4	0	7.8	1519	12.16	1.32	1.15	9.46	1.03	0.06	0.25	23.84	0.89	0.00	10.94	9.90	1	10	44
C2F1E3A1D3	7.9	10	1.5	A1	4	25	7.9	417.2	13.53	4.86	2.20	16.29	1.04	0.43	0.65	63.03	0.15	0.00	10.83	9.21	1	8	32
C2F2E3A4	8.3	20	1.5	A4	70	0	8.3	1169	12.50	4.13	2.03	16.26	0.76	0.10	0.31	40.95	0.242857	0.00	10.74	8.52	1	14	41
C3F3E2A1	13.4	30	1.1	A1	4	0	13.4	2885	11.74	0.50	0.71	6.02	0.97	0.05	0.22	22.71	0.75	0.00	10.59	10.36	1	8	47
C3F2E1A1	13.6	20	0.75	A1	4	0	13.1	1519	12.04	2.15	1.47	12.17	1.10	0.11	0.33	29.70	0.1	0.00	10.57	9.17	1	11	45
C3F3E3A1	13.4	30	1.5	A1	4	0	13.0	2885	12.96	5.60	2.37	18.26	1.69	0.36	0.60	35.50	0.24	0.00	10.45	8.32	1	10	37
C2F1E3A1	7.9	10	1.5	A1	4	0	7.8	417.2	13.17	3.92	1.98	15.04	1.19	0.16	0.40	33.34	0.41	0.00	10.37	9.29	1	10	34
C1F3E4A1	7.1	30	0.85	A1	4	0	6.9	1188	12.88	5.86	2.42	18.79	0.91	0.23	0.48	52.80	0.36	0.00	10.31	8.14	2	10	38
C3F3E1A4	13.4	30	0.75	A4	70	0	13.0	2885	11.93	2.40	1.55	12.99	0.91	0.04	0.21	22.85	0.13	0.00	10.29	8.90	1	10	46
C2F1E3A1	13.3	10	1.5	A1	4	0	13.1	760.7	11.14	0.74	0.86	7.72	1.08	0.13	0.36	33.17	0.55	0.00	10.22	9.45	1	10	48
C2F1E2A1	7.9	10	1.1	A1	4	0	7.8	417.2	13.23	9.07	3.01	22.78	1.09	0.12	0.35	31.80	0.28	0.00	10.03	7.32	1	10	33

Tabelle 9 Die Purbond Klebstoffe mit einer Untergrenze des 3s-KI für den Mittelwert der Bruchscherspannung $\tau > 10\text{N/mm}^2$. 3s_MW_u ist die untere Grenze des 3s-KI und 1.96_u ist die untere Grenze eines 1.96s-KI für die Einzelwerte (nicht an die Verteilungen angepasst). VW ist die Versagenswahrscheinlichkeit.

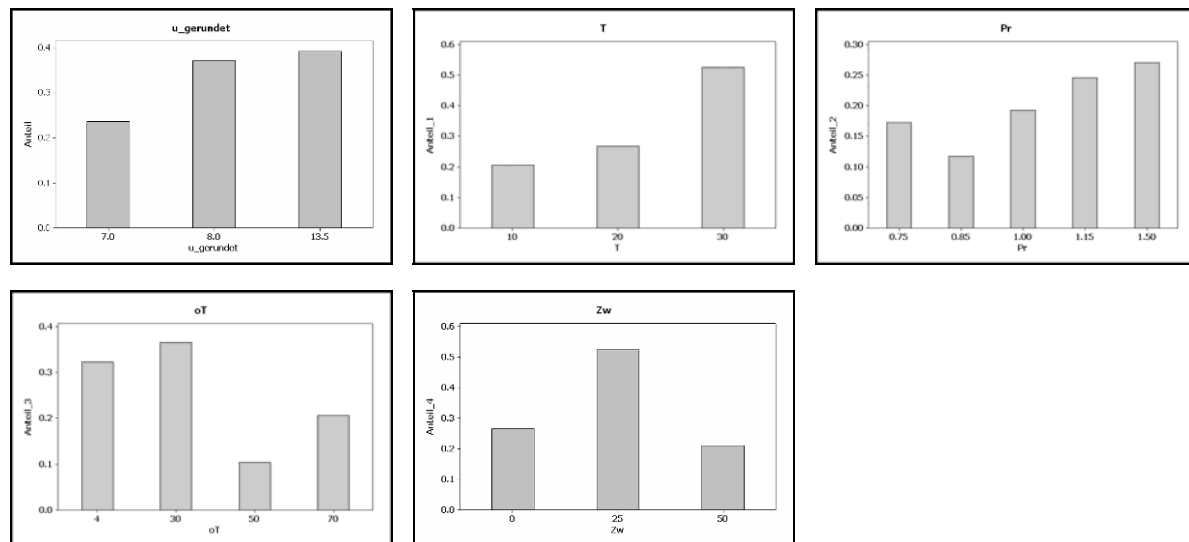


Abbildung 76 Gewichtete Anteile der Faktorstufen der Kombinationen mit dem 3σ-KI oberhalb 10N/mm² Bruchscherspannung, nacheinander u gerundet, T, Pr, oT, Zw.

Die Holzfeuchte u zeigt einen Abfall gegen 7%, steigende Temperatur T hat einen positiven Einfluss, wie eine steigende Presszeit. Das schlecht Abschneiden von Klebstoff A3 rührt vielleicht auch daher, dass er nie mit Zusatzwasser Zw geprüft wurde. Dies gilt auch für A2, aber im tiefen Feuchtebereich $u=7-8\%$, in dem diese 2 Klebstoffe geprüft wurden, hat das schnellere System besser auf die erhöhte Temperatur angesprochen. Das Zusatzwasser scheint ein Optimum zwischen 0 und 50g/m² zu haben. Es fällt das Wegfallen der Holzfeuchtestufen $u>13.5\%$ auf. Die Gruppen mit der trockenen Lagerfolge Lf sind häufiger als bei den Geistlich Klebstoffen.

Die Kovarianzanalyse der Mittelwerte¹²⁹ ergibt signifikant verschiedene Achsenabschnitte für $A3 < A4 < A1 < A2$, was auch den Werten weiter oben entspricht. Ausserdem ist die Presszeit Pr signifikant. Der positive Einfluss der Temperatur verschwindet, vor allem weil die Absenz von genügenden Temperaturen zum Totalversagen ganzer Gruppen führte. Das Bestimmtheitsmass ist unter 50%.

4.3.8.2 Geistlich Klebstoffe

PrID	u	T	Pr	KI	oT	Zw	Lf (u)	p	Mittelwert tau	Varianz	stabw	varKoeff	Mittelwert L-Fmax	Varianz	stabw	varKoeff	Mittelwert Fbr	3s_MW_u	1.96s_u	Reihe N	Rangfolge Mittelwert
nr	[%]	[°C]	[%]	[]	[min]	[g/m²]	[%]	(Pa)	[N/mm²]			[%]	[%]			[%]					
C2F2E2A5D3	8.3	20	1A5	8	50	7.5	1169	16.16	0.54	0.74	4.56	1.23	0.03	0.18	14.83	0.08	0.00	15.33	14.72	1	9
C1F3E5A6D3	7.1	30	1.15A6	15	50	6.9	1188	17.00	2.53	1.59	9.36	1.27	0.04	0.19	15.20	0.62	0.00	15.31	13.88	2	10
C1C1F2E4A5D2	7.1	20	0.85A5	8	25	7.2	584.3	15.49	1.12	1.06	6.83	1.59	0.21	0.45	28.46	0.19	0.00	14.49	13.42	2	12
C2C2F1E2A8	7.9	10	1A8	90	0	7.8	417.2	15.30	0.82	0.91	5.92	1.81	0.68	0.83	45.62	0.04	0.00	14.34	13.53	1	10
C2C2F3E2A5	7.8	30	1A5	8	0	7.9	1612	15.89	1.65	1.28	8.08	1.17	0.09	0.30	25.84	0.10	0.00	14.32	13.38	2	8
C1C1F2E5A6D3	7.1	20	1.15A6	15	50	6.9	584.3	15.66	1.78	1.33	8.52	2.42	0.57	0.75	31.08	0.15	0.00	14.03	13.05	2	8
C2C2F3E5A5D2	7.8	30	1.15A5	8	25	8.0	1612	15.39	2.16	1.47	9.55	2.38	0.43	0.66	27.56	0.05	0.00	13.83	12.51	2	10
C2C2F2E4A6D2	7.8	20	0.85A6	15	25	8.0	818	16.57	5.53	2.35	14.19	2.03	0.40	0.64	31.29	0.41	0.00	13.69	11.96	2	8
C2C2F2E5A5D3	7.8	20	1.15A5	8	50	7.9	818	14.96	1.28	1.13	7.57	2.36	0.73	0.86	36.27	0.09	0.00	13.57	12.74	2	8
C1C1A5	6.6	20	1A5	8	0	6.6	1169	14.58	1.36	1.17	8.00	1.29	0.11	0.32	25.21	0.40	0.00	13.47	12.29	1	12
C2C2F2E4A6D3	7.8	20	0.85A6	15	50	7.9	818	14.01	0.51	0.71	5.09	1.78	0.22	0.47	26.58	0.18	0.00	13.33	12.61	2	12
C2C2F3E4A6	7.8	30	0.85A6	15	0	7.9	1612	15.33	3.64	1.91	12.44	1.68	0.35	0.59	35.06	0.16	0.00	13.30	11.59	2	10
C1C1F2E2A5D3	7.1	20	1A5	8	50	7.2	584.3	14.45	1.48	1.22	8.43	1.52	0.32	0.57	37.48	0.65	0.00	13.16	12.06	2	10
C2C2F3E2A8	7.9	30	1A8	90	0	7.4	1612	15.22	5.19	2.28	14.97	2.19	0.95	0.97	44.44	0.27	0.00	13.06	10.75	1	12
C2C2F3E4A5D2	7.8	30	0.85A5	8	25	8.0	1612	13.75	0.57	0.76	5.50	2.47	0.91	0.95	38.52	0.02	0.00	12.95	12.27	2	10
C2C2F2E2A6D3	7.8	20	1A6	15	50	7.7	818	14.31	2.11	1.45	10.15	1.58	0.31	0.56	35.28	0.43	0.00	12.93	11.46	2	12
C2C2F3E2A6D2	7.8	30	1A6	15	25	7.9	1612	14.34	1.89	1.38	9.59	1.73	0.18	0.43	24.77	0.08	0.00	12.88	11.64	2	10
C1C1F3E5A5D3	7.1	30	1.15A5	8	50	7.1	1188	15.13	4.81	2.19	14.49	1.35	0.25	0.50	37.09	0.34	0.00	12.81	10.83	2	10
C1C1F3E4A6D3	7.1	30	0.85A6	15	50	7.2	1188	15.59	3.60	1.90	12.18	1.69	0.44	0.66	39.19	0.28	0.00	12.74	11.86	2	6
C2C2F2E2A5D2	8.3	20	1A5	8	25	7.6	1169	15.93	3.82	1.95	12.27	1.50	0.18	0.42	27.95	0.03	0.00	12.74	12.10	1	8
C1C1F3E5A6	7.1	30	1.15A6	15	0	7.2	1188	14.47	1.51	1.23	8.49	1.70	0.17	0.42	24.58	0.20	0.00	12.63	12.06	2	6
C1C1F3E2A5D2	7.1	30	1A5	8	25	-	1188	13.89	0.88	0.94	6.77	2.00	0.34	0.59	29.42	0.00	0.00	12.48	12.05	2	6
C2C2F2E3A5	8.3	20	1.5A5	8	0	8.4	1169	13.69	1.97	1.41	10.27	1.30	0.39	0.62	48.03	0.35	0.00	11.97	10.93	1	8
C1C1F2E2A6D2	7.1	20	1A6	15	25	7.1	584.3	14.32	3.87	1.97	13.73	2.19	0.99	0.99	45.39	0.38	0.08	11.84	10.47	2	12
C3C3F2E2A8H1	13.6	20	1A8	90	0	7.9	1519	13.65	3.14	1.77	12.98	0.92	0.05	0.22	24.00	0.64	0.00	11.77	10.18	1	10
C2C2F3E4A5D3	7.8	30	0.85A5	8	50	8.0	1612	12.34	0.37	0.61	4.93	2.28	0.07	0.26	11.59	0.00	0.00	11.59	11.14	2	8
C1C1F3E5A6D2	7.1	30	1.15A6	15	25	7.3	1188	14.33	5.23	2.29	15.96	2.27	0.52	0.72	31.83	0.02	0.00	11.53	9.85	2	8
C3C3F2E3A8	13.5	20	1.5A8	90	0	13.5	1519	12.55	1.82	1.35	10.74	0.89	0.14	0.37	42.10	0.07	0.00	11.27	9.91	1	12
C1C1F2E5A5D2	7.1	20	1.15A5	8	25	7.1	584.3	13.38	3.65	1.91	14.29	1.38	0.47	0.69	49.67	0.01	0.00	11.03	9.63	2	8
C3C3F2E2A5	13.6	20	1A5	8	0	13.1	1519	11.86	1.12	1.06	8.91	1.44	0.29	0.53	37.05	0.34	0.00	10.94	9.78	1	14
C3C3F2E2A5H1	13.6	20	1A5	8	0	8.1	1519	14.38	7.83	2.80	19.46	1.96	0.18	0.42	21.35	0.26	0.00	10.84	8.90	1	12
C2C2F2E2A8D2	8.3	20	1A8	90	25	8.4	1169	13.78	9.04	3.01	21.81	1.05	0.28	0.53	50.23	0.83	0.00	10.38	7.89	1	9

Tabelle 10 Die Geistlich Klebstoffe mit einer Untergrenze des 3σ-KI für den Mittelwert der Bruchscherspannung $\tau > 10\text{N/mm}^2$. 3s_MW_u ist die untere Grenze des 3s-KI und 1.96_u ist die untere Grenze eines 1.96s-KI für die Einzelwerte (nicht an die Verteilungen angepasst). VW ist die Versagenswahrscheinlichkeit.

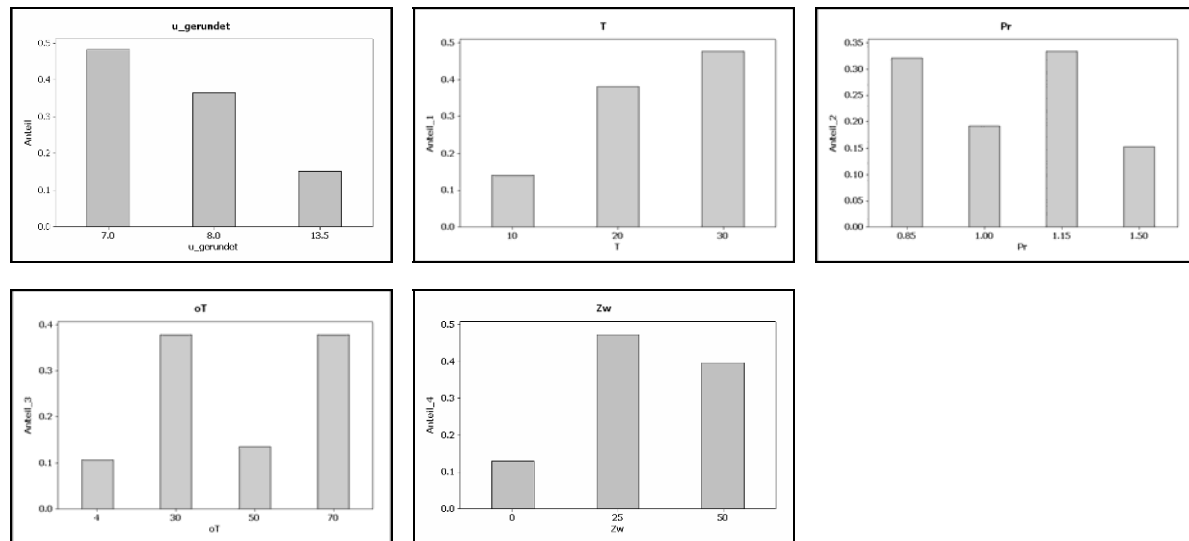


Abbildung 77 Gewichtete Anteile der Faktorstufen der Kombinationen mit dem 3σ -KI oberhalb 10N/mm^2 Bruchscherspannung, nacheinander u gerundet, T, Pr, oT, Zw.

Die Häufigkeit der tieferen Holzfeuchten ist überraschend. Die Serien mit höheren Holzfeuchten u sind z.T. sehr stabil. Die Temperatur zeigt ebenfalls nicht das erwartete Bild, da einzelne Gruppen sehr empfindlich auf Abweichungen von der mittleren Temperaturstufe T reagieren. Die Möglichkeit einer Wechselwirkung ist hier gegeben. Die Presszeit Pr bietet ebenfalls kein einheitliches Bild. Zu beachten ist, dass die Stufe $Pr=0.75$ komplett weggefallen ist. Der Einfluss des Zusatzwassers Zw ist deutlich und scheint ebenfalls ein Optimum zwischen 0 und 50g/m^2 aufzuweisen.

Die statistische Auswertung – wiederum eine Kovarianzanalyse der Mittelwerte¹³⁰ – ergibt als einzige signifikante Stufe Zusatzwasser Zw $0 < 25 = 50\text{g/m}^2$, was sich mit den Aussagen weiter oben deckt. Der Bestimmtheitsgrad ist 50%.

4.4 Vergleiche

4.4.1 Faserbruch

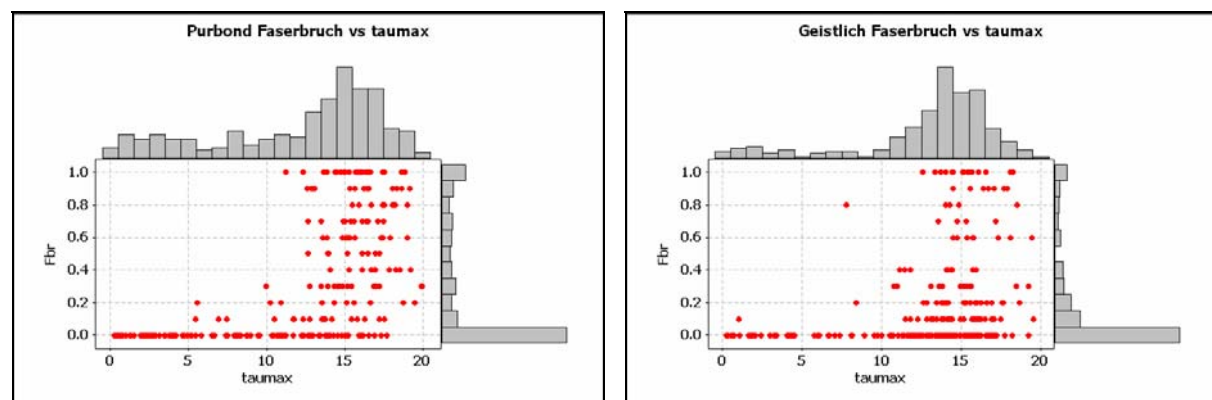


Abbildung 78 Verteilung des Faserbruchanteils Fbr gegen die Bruchscherspannung τ_{\max} , links die Purbond Klebstoffe, rechts die Geistlich Klebstoffe.

Der grosse Anteil von Proben mit 0% Faserbruch ist auffällig. Faserbruch wird oberhalb 5N/mm^2 , 100% Faserbruch oberhalb 10N/mm^2 Bruchscherspannung erreicht. Substantieller Faserbruch ist erst im oberen Festigkeitsbereich feststellbar, geschieht aber nicht zwingend. Die Geistlich Klebstoffe scheinen etwas resistenter gegen schlechte Bedingungen, da ihre Häufigkeit im unteren Festigkeitsbereich kleiner ist und sie im ganzen deutlich weniger Totalversager aufwiesen.

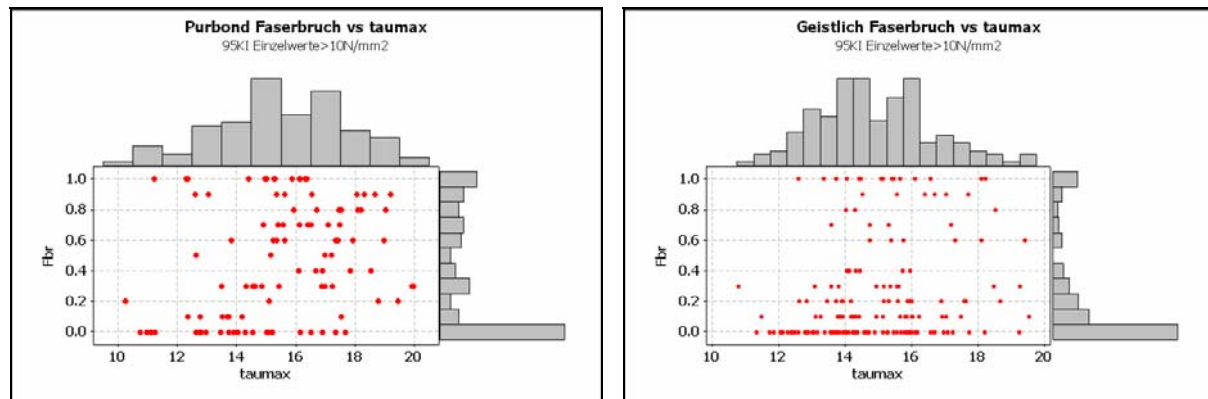


Abbildung 79 Verteilung des Faserbruchanteils F_{br} gegen die Bruchscherspannung τ_{max} für die Gruppen mit der unteren 1.96s-KI-Grenze für die Einzelwerte $>10\text{N/mm}^2$, links die Purbond Klebstoffe, rechts die Geistlich Klebstoffe.

Die Verteilung des Faserbruchanteils hat auch für die Gruppen mit einem 1.96σ -KI oberhalb 10N/mm^2 ¹³¹ ein deutliches Maximum bei 0. Für Geistlich sind die Anteile an den hohen Festigkeiten bei tiefem nicht geringer als bei hohem Faserbruchanteil. Die Purbond Klebstoffe scheinen für die sehr hohen Festigkeiten ab 18N/mm^2 mindestens einen teilweisen Holzbruch zu provozieren, was mit ihrem Eindringverhalten zusammenhängen könnte. Vor allem auffällig ist die gleichartige Verteilungsform der beiden Klebstoffsorten.

4.4.2 Verschiebung bis zum Bruch

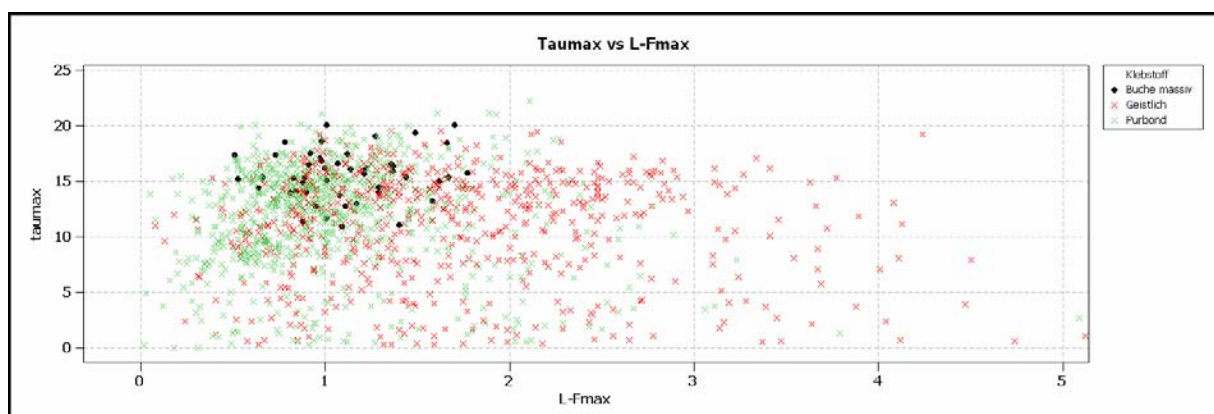


Abbildung 80 Bruchscherspannung τ_{max} gegen die Verschiebung $L-F_{max}$ für die Purbond und Geistlich Klebstoffe und die Massivholzproben.

¹³¹ Die nichtnormalverteilten Gruppen sind nicht angepasst.

Deskriptive Statistik Purbond

Variable	N	N*	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz	KoefVar	Minimum
L-Fmax	634	80	1.0645	0.0221	0.5557	0.3088	52.21	0.0200

Variable	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefte	Kurtosis
L-Fmax	0.6900	0.9600	1.3000	5.0900	1.69	5.88

Deskriptive Statistik Geistlich

Variable	N	N*	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz	KoefVar	Minimum
L-Fmax	644	34	1.7062	0.0367	0.9326	0.8698	54.66	0.0800

Variable	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefte	Kurtosis
L-Fmax	1.0100	1.4950	2.2100	7.2600	1.47	3.91

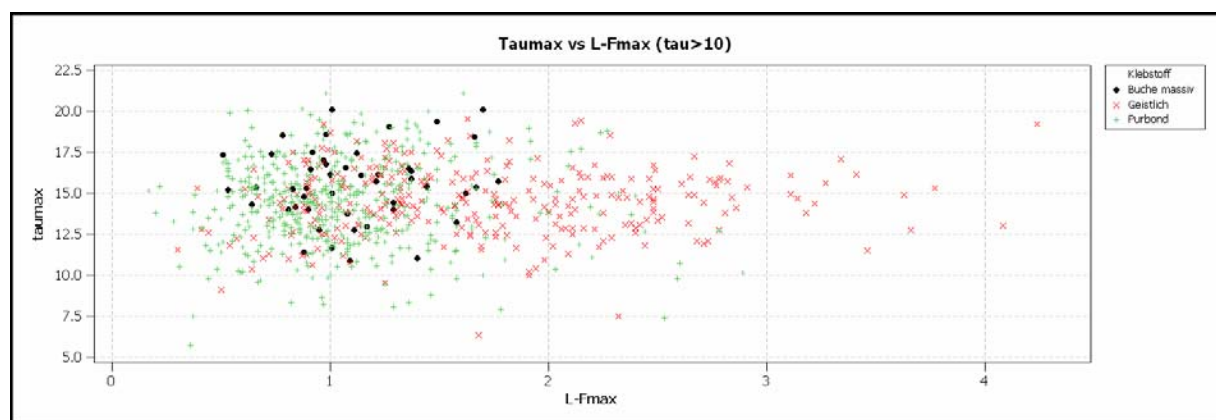


Abbildung 81 Bruchscherspannung τ_{\max} gegen die Verschiebung L-Fmax für die Purbond und Geistlich Klebstoffe und die Massivholzproben für die Gruppen mit der unteren 3 σ -KI-Grenze für den Mittelwert oberhalb 10N/mm².

Deskriptive Statistik Purbond

Variable	N	N*	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz	KoefVar	Minimum
L-Fmax	379	54	1.0424	0.0216	0.4210	0.1773	40.39	0.1700

Variable	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefte	Kurtosis
L-Fmax	0.7500	0.9700	1.2600	2.8900	1.25	2.59

Deskriptive Statistik Geistlich

Variable	N	N*	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz	KoefVar	Minimum
L-Fmax	311	13	1.6785	0.0410	0.7237	0.5238	43.12	0.3000

Variable	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefte	Kurtosis
L-Fmax	1.0900	1.5900	2.1500	4.2400	0.70	0.23

Niveau. Die Ausrutscher der Buche nach unten sind durch die tiefere Holzfeuchte u erklärbar. Auch die tendenziell grössere Varianz könnte so erklärbar sein. Dennoch ist hier noch Erklärungsbedarf erkennbar.

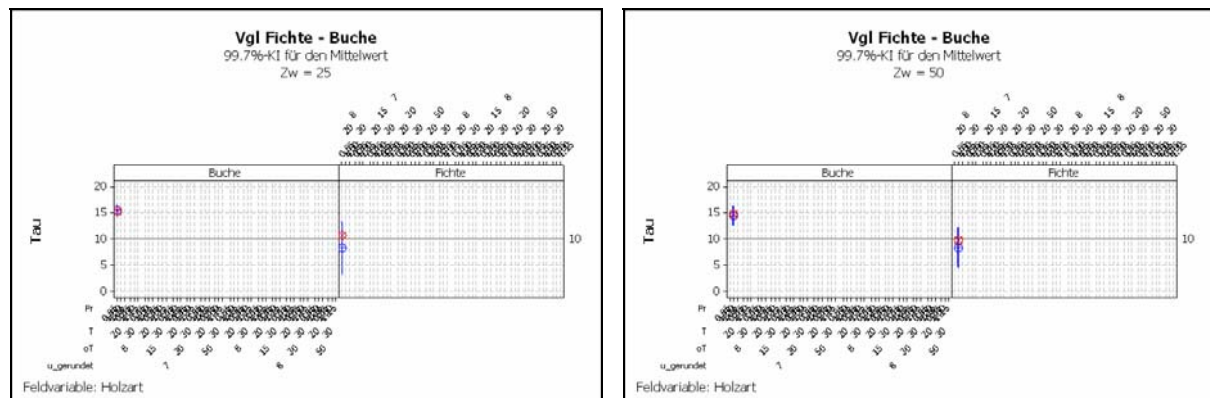


Abbildung 83 Erreichte Bruchspannungen für jeweils links Buche und rechts Fichte mit Zusatzwasser Zw.

Mit Zusatzwasser lässt sich ebenfalls feststellen, dass für die Fichte eine Grenze bei 10N/mm^2 Bruchspannung besteht. Die Tendenz der Varianz ist jedoch genau umgekehrt.

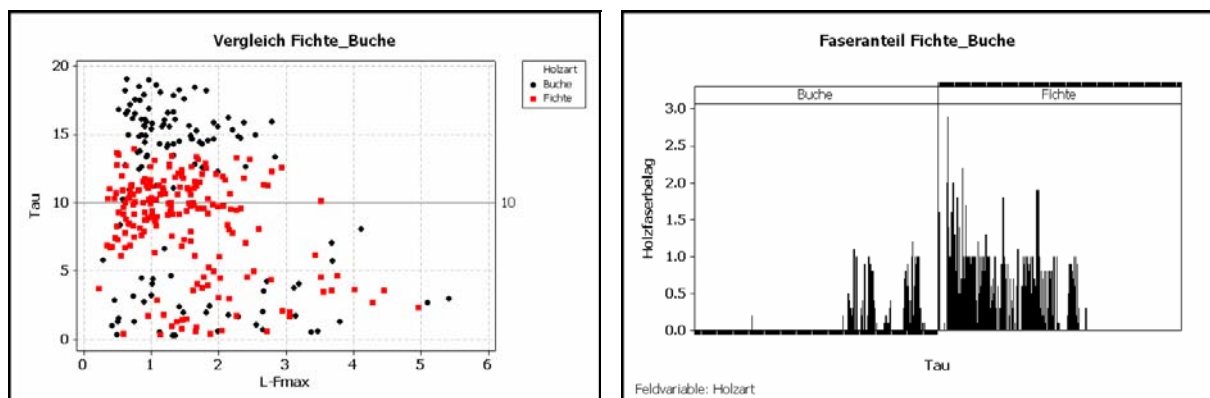


Abbildung 84 Links die Verschiebung L-Fmax gegen die Bruchspannung t_{\max} , rechts der die Bruchspannung τ_{\max} gegen den Holzfaserbelag. Die Kumulierung über 1 ergibt sich aus identischen Werten für die Bruchspannung.

In der Verteilung der Verschiebung gegen die erreichte Bruchspannung zeigt sich ebenfalls das Bild, das sich schon weiter oben angedeutet hat. Die Verschiebungen sind sehr ähnlich, jedoch für Fichte besteht eine Grenze nach oben für die erreichten Festigkeiten. Das Bild für den Faseranteil auf der Bruchfläche entspricht den Erwartungen. Die Fichte zeigt wesentlich mehr Holzbruch und zwar schon bei relativ geringen Festigkeiten. Die Festigkeit wird durch die Fügezeugeigenschaften definiert.

4.5 Verzerrungsmessung

Die Verzerrungsmessung und die Korrelationen wurden für sämtliche Serien auf der Stufe Holzfeuchte $u=13.5\%$ und Presszeit $Pr=1$ durchgeführt. Es wurde vor allem auch darauf geachtet, eine Methode zu erarbeiten, die qualitativ möglichst hochwertige Bilder liefert. Diese können neben der aufgelösten Verzerrungsmessung auch zur Validierung rechnerischer Modelle benutzt werden.

Für den Purbond Klebstoff A4 wurde auf der Stufe Temperatur $T=20^{\circ}\text{C}$ und Lagerfolge $L_f=13.5\%$ eine Probe gewählt, für deren Gruppe eine Fugendicke ermittelt wurde, die in diesem Fall gegen Null ging.

Die Zugrichtung für Purbond A4 in den Vic 2D-Falschfarbenbilder ist horizontal. Das obere Fügeteil ist nach rechts durchgehend, das Untere nach links.

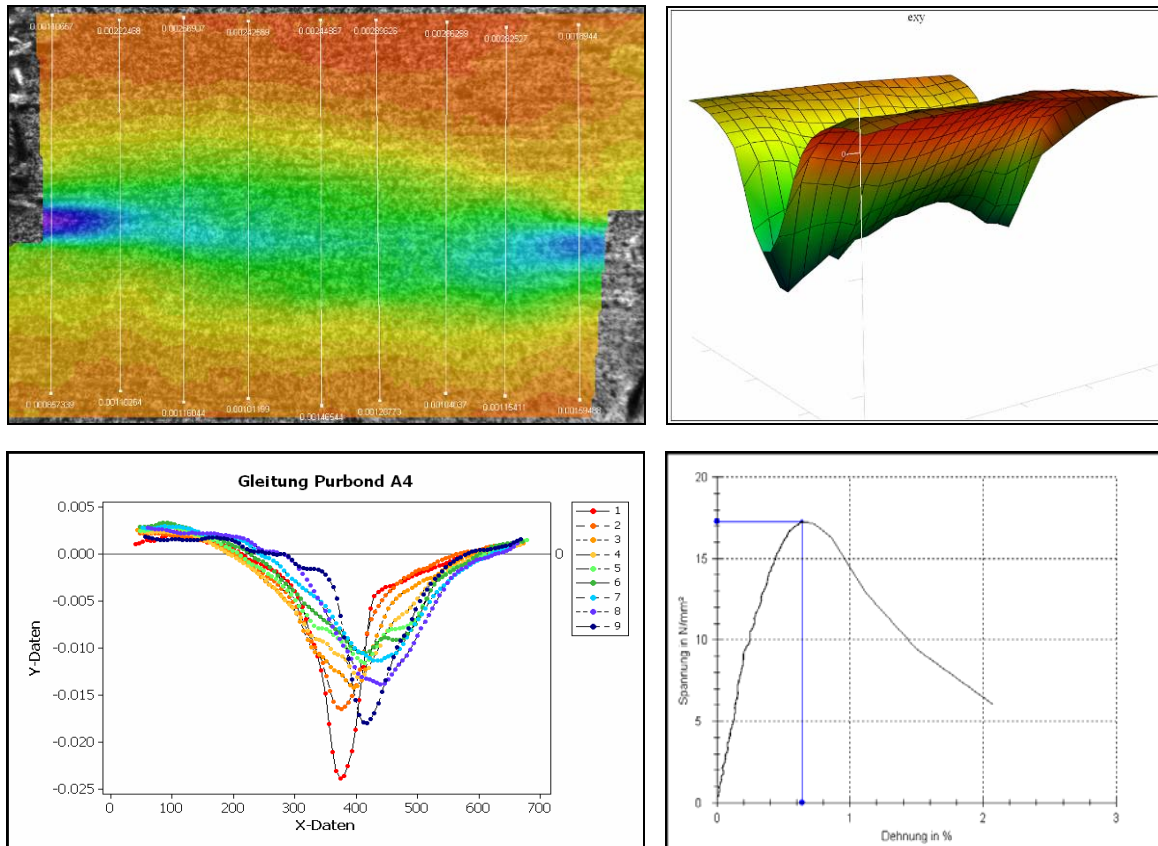


Abbildung 85 Purbond A4. Links oben maximale Gleitung im Bereich etwas mehr als $\pm 3\text{mm}$ ab der Klebfuge. Die Breite des Bildes entspricht 10mm , d.h. dem Bereich der Überdeckung. Rechts oben 3D-Darstellung mit der Gleitung in z . Links unten die Auswertungslinien von links nach rechts 1-9 rechtwinklig zu der Klebfuge (leicht weiss sichtbar). Rechts unten das entsprechende Spannungs-Verschiebungsdiagramm.

Die leicht diagonale Spitze der Gleitung ist eher untypisch, da sie tendenziell eher der Klebfuge folgt. Die Spitzen an den Fugenenden entsprechen in ihrer Form der Erwartung, die sich aus der theoretischen Spannungsverteilung ergibt.

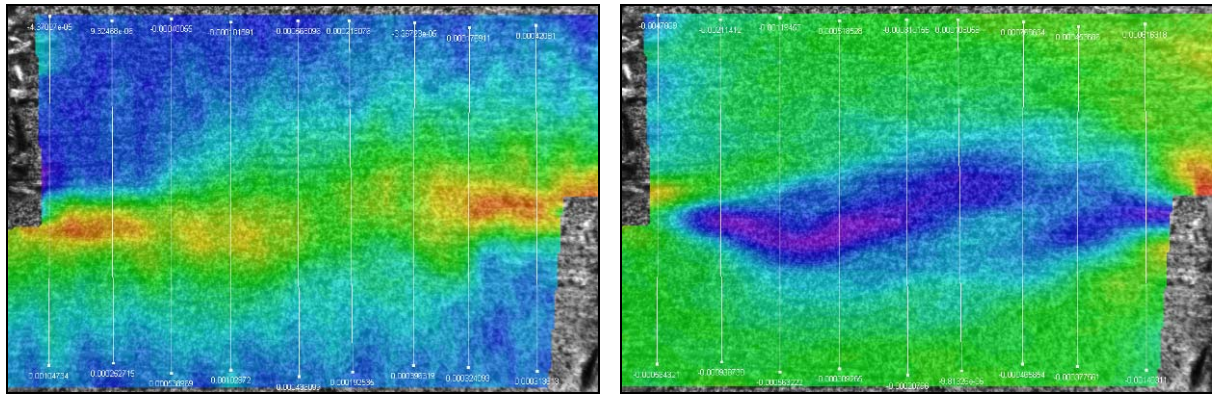


Abbildung 86 Purbond A4. Links die maximale Dehnung e_{xx} – dunkleres Blau $e_{xx}=0$, rechts die maximale Dehnung e_{yy} – mittleres Grün $e_{yy}=0$.

Die Dehnungen in x und in y zeigen eine typische, leicht diagonale Verteilung. Die Dehnung e_{xx} zeigt wiederum Maxima gegen das Fugenende. Die Dehnung e_{yy} zeigt im Verlauf der Prüfung zwei Zentren mit Gleitungsspitzen gegen das Fugenende, die sich jedoch mit zunehmender Spannung in Richtung Fugenmitte verschieben und sich gleichzeitig ausweiten.

Für den Geistlich Klebstoff A5 wurde auf der Stufe Temperatur $T=20^{\circ}\text{C}$ und Lagerfolge $L_f=8\%$ eine Probe ausgewählt. Dieser Versuchsplanpunkt stellte ein im betrachteten Bereich ein Optimum dar.

Die Zugrichtung ist wieder horizontal, jedoch ist diesmal das obere Füge teil nach links durchgehend, das Untere nach rechts. Dadurch kehrt sich das Vorzeichen der Gleitung.

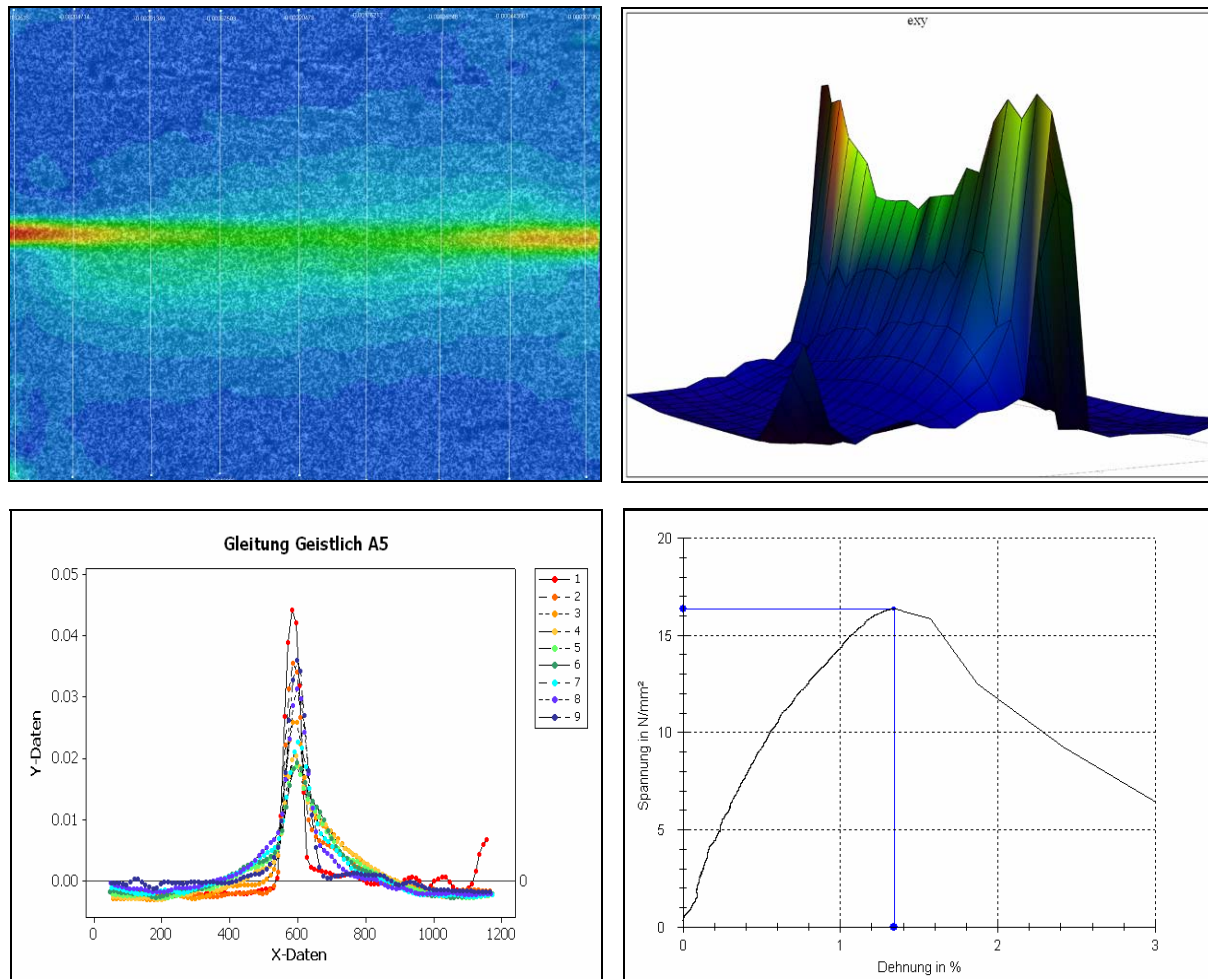


Abbildung 87 Geistlich A5. Links oben maximale Gleitung im Bereich etwas mehr als $\pm 3\text{mm}$ ab der Klebfuge. Die Breite des Bildes entspricht $< 10\text{mm}$, d.h. ca. dem Bereich der Überdeckung. Rechts oben 3D-Darstellung mit der Gleitung in z. Links unten die Auswertungslinien von links nach rechts 1-9 rechtwinklig zu der Klebfuge (leicht weiss sichtbar). Rechts unten das entsprechende Spannungs-Verschiebungsdiagramm.

Die Verteilung der Gleitung stellt sich hier typisch dar. Die Geistlich Klebstoffe zeigen verbreitet den engeren Peak als die Purbond Klebstoffe. Dies könnte eventuell neben ihrem elastischen und plastischen Verhalten auch etwas mit dem Eindringen zu tun haben. Schön zu sehen ist die wie die Verteilung der Klebfuge folgt.

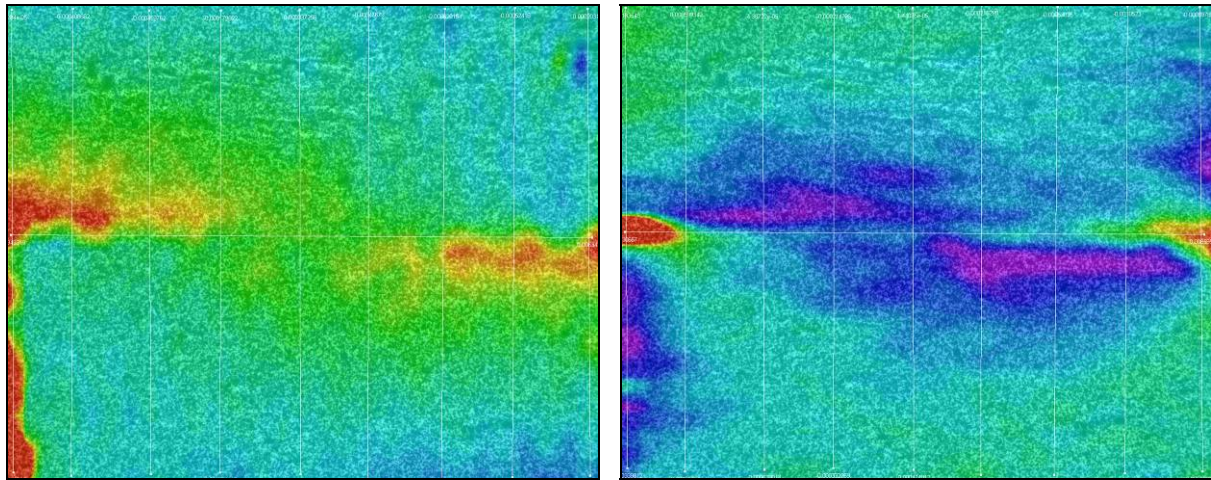


Abbildung 88 Geistlich A5. Links die maximale Dehnung e_{xx} – helles Blau $e_{xx}=0$, der Bereich links unten im Bild ist wahrscheinlich mit etwas Acryl aus der Fuge überdeckt und gibt so deren Längsdehnung weiter. Rechts die maximale Dehnung e_{yy} – mittleres Blau $e_{yy}=0$.

Die Längsdehnung e_{xx} entwickelt sich von Anfang an mit einem Maximum bei den Fugenenden. Die Diagonale Verteilung darf als typisch betrachtet werden. Die Querdehnung e_{yy} entwickelt ebenfalls zwei Zentren erhöhter Dehnung, die sich aber im Lauf der Prüfung zur Mitte der Fuge bewegen. Die extreme Ausbildung einer positiven Dehnung am Fugenende ist stark auf die Fuge beschränkt und im beschränktem Mass im einen Fügeteil sichtbar. Dies könnte eventuell durch die Drehbewegung des Prüfkörpers (vgl. 3.4) und die dadurch entstehende Querkzugbelastung begründet sein.

4.6 Schubmodul¹³²

Das Schubmodul wird exemplarisch an je einer Purbond- und einer Geistlich-Probe, deren Fugendicke bekannt ist, gerechnet. Ausgangspunkt ist die Verschiebungsmessung (vgl. 3.5.1). Zuerst wurde im Zwick testXpert überprüft, ob die Grenzen von 10% und 40% F_{max} eine visuell genügende lineare Anpassung an die Kurve ergaben. Darauf wurden die Messdaten der Probe nach Microsoft Excel exportiert und die entsprechenden Verschiebungen v und Scherspannungen τ extrahiert. Zusammen

mit der Fugendicke d ergibt sich für das Schubmodul $G = \frac{\tau}{\tan(\gamma)} = \left(\frac{\pi d}{v} \right)$ ¹³³ (vgl.

3.5.2). Die Dehnung in der Buche wird überschlagsmässig $e_{xx} = \frac{1}{2} \times \frac{F \times \ddot{u}}{E_{Buche} \times A}$ ¹³⁴ ge-

rechnet, wobei \ddot{u} die Überdeckungslänge und A die Querschnittsfläche der Zugstäbe ist. Die Ergebnisse werden viel zu tief liegen, da die Schubdeformation nicht nur die Klebschicht betrifft, sondern auch wesentliche Teile des Holzes im Bereich der Überlappung. Dadurch ist die Schichtdicke d viel zu klein. Eine Bestimmung der wirksamen Schichtdicke ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da der Übergang fließend ist. (4.5)

¹³² Das Schubmodul ist nicht das Schubmodul des Klebstoffs, sondern eine elastische Grösse, die mit gleich erarbeiteten Grössen verglichen werden kann.

¹³³ Habenicht S.265

¹³⁴ $\frac{1}{2}$ für die linear abfallende Zugspannung entlang der Überdeckung

Für Purbond wurde der Klebstoff A1 (offene Zeit $t_T=4\text{min.}$) auf der Stufe Holzfeuchte $u=8\%$, Temperatur $T=30^\circ\text{C}$, Zusatzwasser $Z_w=50\text{g/m}^2$ und Presszeit $P_r=0.75$ ausgesucht (vgl. Abbildung 37), die sehr schöne Festigkeitswerte – die untere Grenze des 3σ -KI des Mittelwerts beträgt 14.96N/mm^2 – und eine sehr homogene Fuge von $80\mu\text{m}$ aufwies. Das so ermittelte Schubmodul ist 67N/mm^2 ($\Delta\sigma=6.0\text{N/mm}^2$, $F_{40\%}=2066\text{N}$, $\Delta L-F_{40\%}=0.02\text{mm}$).

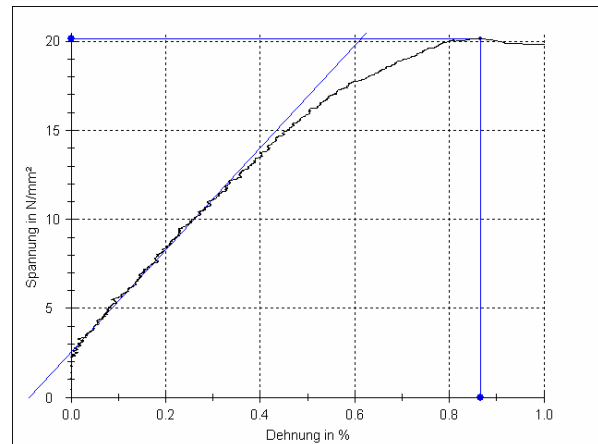


Abbildung 89 Spannungs-Verschiebungsdiagramm mit angelegter Gerade für die Modulberechnung. Die Grenzen wurden bei 20% und 50% festgelegt, da die Anpassung so am besten schien.

Für die Geistlich Klebstoffe wurde der A5 auf der Stufe Zusatzwasser $Z_w=50\text{g/m}^2$ ausgewählt. Die Fugendicke beträgt $50\mu\text{m}$. Die untere Grenze des $3s$ -KI für den Mittelwert der Bruchscherspannung beträgt 15.33N/mm^2 . Das so ermittelte Schubmodul beträgt 25N/mm^2 ($\Delta\sigma=4.7\text{N/mm}^2$, $F_{40\%}=1306\text{N}$, $\Delta L-F_{40\%}=0.018\text{mm}$).

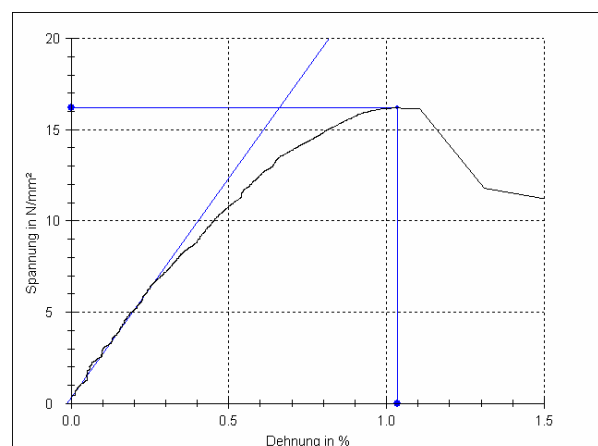


Abbildung 90 Spannungs-Verschiebungsdiagramm mit angelegter Gerade für die Modulberechnung.

5 Beurteilung der Ergebnisse und Ausblick

Die betrachteten Klebstoffe bewegen sich ab der Holzfeuchte $u \leq 8\%$ in einem Grenzgebiet, was z.T. Totalausfälle provoziert und die Varianzen stark streuen lässt. Diese zwei Phänomene vor allem erschweren die statistische Auswertung. Die inhomogenen Varianzen – sofern sie nicht stabilisiert werden können – verunmöglichen die ANOVA oder schwächen zumindest die getroffenen Aussagen. Die Wölbungen in den Antwortflächen erschweren zudem allgemeine lineare Aussagen und erfordern eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Faktorstufen, was in den einzelnen Kapiteln der Auswertung versucht wurde. Auf der anderen Seite heisst das natürlich auch, dass die betrachteten Klebstoffe im normalerweise als adäquat betrachteten Holzfeuchtebereich $u = 8\%$ schon problematisch reagieren.

Die Gruppen mit den höchsten erreichten Festigkeiten sind nicht diejenigen, die unter Normalbedingungen verklebt wurden, sondern Gruppen aus dem tiefen Randbereich der Holzfeuchten, bei denen die anderen Prozessparameter entsprechend eingestellt wurden. Diese Aussage muss insofern präzisiert werden, als dass die Empfindlichkeit des Prozesses mit abnehmender Holzfeuchte zunimmt und die Faktoren genau gesteuert werden müssen für optimale oder in den Grenzbereichen auch nur genügende Ergebnisse.

Die Purbond und Geistlich Klebstoffe haben nicht die gleichen Eigenschaften und konnten nicht direkt miteinander verglichen werden, was ursprünglich die Absicht war. Sie reagierten verschieden auf die Behandlungen und zeigten auch verschiedene Eigenschaften im elastischen und im plastischen Bereich. Die Geistlich Klebstoffe zeigten tendenziell eine grössere Bruchverschiebung und eine grössere Krümmung in den Spannungs-Verschiebungskurven. Diese Beobachtung ist nicht ganz durchgehend, aber kann doch generell getroffen werden. Die Gründe dafür finden sich wahrscheinlich z.T. in der grösseren Fugendicke und auch der Blasenbildung, die bei den Geistlich Klebstoffen stärker feststellbar war als bei den Purbond Klebstoffen.

Der Faktor Temperatur $T = 30^\circ\text{C}$ hat bei den Purbond Klebstoffen im Gegensatz zu den Geistlich Klebstoffen eine erstaunlich positive Wirkung (Wechselwirkung mit der offenen Zeit oT), die in der statistischen Auswertung einigermaßen verschwindet, da die entsprechenden Gruppen bei 20°C zum Teil ganz ausfielen. Der Einfluss tiefer Temperaturen war durchgehend negativ, ausser wenn er z.B. durch verlängerte Presszeiten kompensiert wurde. Unterschreiten der Mindestpresszeit hatte auch fast durchweg negative Auswirkungen, die Verlängerung der Presszeit kann sich auch negativ auswirken und sollte auf spezifische Anwendungen – z.B. niedere Temperaturen – beschränkt bleiben. Der Faktor Zusatzwasser war nur für Geistlich signifikant und zeigt dort sehr gute Wirkung. Dennoch sind drei Purbond-Gruppen mit Zusatzwasser ganz oben zu finden in der Rangfolge. Das gute Reagieren der Geistlich Klebstoffe auf Zusatzwasser zusammen mit den thixotropen Eigenschaften könnte ausgenutzt werden für ein Druckluft-Leimauftragsystem, bei dem das Zusatzwasser über die Pressluft zugeführt werden könnte.

Die schlechten Reaktion der Geistlich Klebstoffe auf die feuchte Lagerfolge stimmt einigermaßen bedenklich, was ihre Leistungsfähigkeit unter erschwerten (klimatischen) Bedingungen angeht und begründet Zweifel, ob die Lagerfolgen aus der *EN*

302.1 bestanden würden. Das gleiche gilt für die Delaminierungsprüfung nach der *EN 391*. Das gute Reagieren auf nachträgliche Trocknung von vielen 1K PUR Klebstoffen ist bekannt und wird beim so genannten Green Glueing ausgenutzt.

Die Versuchsplanung war von Anfang an schwierig, weil von Anfang her reduziert werden musste und dies vor allem bei Totalausfällen Schwierigkeiten beim Auswerten mit sich bringt. Eine andere Möglichkeit, die Versuchsreihe 1 zu planen, wären sicher Screening-Versuche gewesen. Die Auswertung gestaltete sich auch wegen der heterogenen Varianzen schwierig, die jedoch ein Kennzeichen des Systems in seinem Grenzbereich zu sein scheinen. Der Versuchsplan der Versuchsreihe 1 war weder balanciert noch orthogonal, was die Auswertung erleichtert und optimieren würde. Zusätzlich wurde durch die Verwendung von verschiedenen Klebstoffen und das Einführen von Faktoren, die nur auf einzelnen Faktorstufen geprüft wurden, die Möglichkeiten einer statistisch optimierten Versuchsplanung eingeschränkt, da die Reduktionsmöglichkeiten nicht proportional mit dem Versuchsumfang ansteigen. D.h. ein Versuchsplan mit z.B. 270 Knotenpunkten hat ein wesentlich grösseres Reduktionspotential als einer mit 3x90 Knotenpunkten. Es darf auch überlegt werden, ob die Herstellung gleicher Gruppen zu verschiedenen Zeitpunkten erstens einmal die Reproduzierbarkeit belegen würden, zweitens aber auch die Blockbildung und Randomisierung ermöglichen und so die Eliminierung von Trends ermöglichen würden. Die statistischen Möglichkeiten wurden in dieser Untersuchung nicht voll ausgeschöpft und es gäbe sicher Möglichkeiten den Daten mehr Informationen zu entlocken, aber die Versuche in dieser Richtung mussten schlussendlich vor allem aus Zeitgründen abgebrochen werden.

Der Faktor offene Wartezeit wurde im ursprünglichen Versuchsplan zu wenig bedacht und kann anscheinend vor allem bei tendenziell schnelleren Systemen im Zusammenhang mit dem Partialdruck starke Effekte begründen. Der Partialdruck wurde als Faktor erst im Laufe der Arbeit entdeckt und nach Möglichkeit noch nachträglich eingebaut. Es muss jedoch gesagt werden, dass eine Einbettung des Faktors in den Versuchsplan mit den bestehenden Ressourcen nicht möglich gewesen wäre, vor allem, was die Möglichkeit der Lagerung der Proben in verschiedenen Klimaten angeht. Die Räume, in denen geklebt wurde, wurden gleichzeitig als Lagerraum für die Proben verwendet. Dennoch bleibt die erwähnte Vermischung des Faktors bestehen. Der grosse Aufwand stand auch der Wiederholung einzelner Faktorstufenkombinationen entgegen, deren Resultate im Zusammenhang nicht unbedingt plausibel schienen.

Der geringe Holzbruch der 1K PUR Systeme ist auffällig und muss nicht mit schlechten Festigkeiten zusammenhängen. Hier besteht einiger Forschungsbedarf, die Möglichkeit liegt nahe, dass der beobachtete Effekt mit der Möglichkeit der 1K PUR Systeme zusammenhängt, Spannungsspitzen abzubauen.

Die Resultate der Videoextensometermessung liefern zwar vergleichbare Resultate, es ist aber nicht möglich die Ergebnisse für die Berechnung von Materialkennwerten zu verwenden. Zum einen, weil die Verzerrungen über die Probe komplex sind und schlecht beurteilt werden kann und zum anderen weil die entstehende Klebfuge nicht ein klar abgegrenzter, homogener Bereich ist, sondern sich in das Holz hinein erstreckt und z.T. keine klaren Grenzen mehr besitzt. Auch die erreichten Festigkeiten

können, wie schon erwähnt, nicht zur Berechnung von charakteristischen Werten verwendet werden.

Die Messungen mit dem Vic 2D liefern dem Anschein nach sehr gute Resultate. Es wurde eine Methode erarbeitet, qualitativ hochwertige Bilder und Korrelationen zu produzieren, die Auswertung blieb aber vor allem auf die qualitative Betrachtung beschränkt. Hier muss eine Systematik des Auswertens erarbeitet und gewünschte Resultate definiert werden. Gleichzeitig ist das Programm nicht sehr bedienerfreundlich, wenn grössere Datenmengen verarbeitet werden müssen. Ebenfalls fehlen grundlegende CAD-Funktionen. Eine Synchronisation mit der Zwick-Prüfmaschine ist geplant.

Weiterführende Untersuchungen könnten gleiche oder ähnliche Faktoren verwenden und z.B. eher rheologische Effekte betrachten. Ein weiterer sehr interessanter Effekt ist sicher auch die erreichte Anfangsfestigkeit, wobei auch zu überlegen ist, ob die entsprechende Norm hierzu genügt. Die Ausgangslage der Untersuchung geht von zu tiefen Oberflächenfeuchten aus. Eine Untersuchung unter Einbezug des Feuchtegradienten über den Querschnitt wäre ein interessanter Aspekt einer weiterführenden Untersuchung.

Der Stichprobenumfang erwies sich als zu gross, um ihn mit der ganzen Tiefe, die angestrebt wurde, zu bearbeiten und es mussten einige interessante Aspekte auf der Seite gelassen werden.

Abschliessend kann gesagt werden, dass mit den verwendeten Klebstoffen sehr gute Festigkeitswerte auch in ihrem Grenzbereich erreicht werden konnten, dazu aber die Prozessparameter sehr genau gesteuert werden müssen. Einzelne 1K PUR Systeme reagieren verschieden auf Prozessparameter, wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben. Die Aussagen können sich nur auf die untersuchten Klebstoffe beziehen.

6 Statistisches Glossar

2 FWW 2fach Wechselwirkung (gemischter Term im Modell), 3fach Wechselwirkung ist analog 3FWW.

3 σ -KI Drei-Sigma-Konfidenzintervall. Intervall zu einem Schätzwert (hier meistens das Intervall für den Mittelwert $\bar{X} \pm 3 \times \frac{s}{\sqrt{(n-2)}}$), das

bei Normalverteilung mit 99.7%iger Wahrscheinlichkeit den wahren Parameter enthalten soll. Bei Nicht-Normalverteilung wurde das Intervall auf 4 σ ausgedehnt. Vgl. auch Konfidenzintervall und zentraler Anteil.

α -Fehler Falsche Alternativhypothese wird angenommen.

β -Fehler Korrekte Alternativhypothese wird abgelehnt.

μ (Wahrer) Mittelwert

v (FG, DF) siehe Freiheitsgrad

σ (Wahre) Standardabweichung

Alternativhypothese (H_A) Entspricht der Hypothese, dass Daten oder Testwerte verschiedenen Grundgesamtheiten entstammen, bei Annahme kann ein Unterschied zwischen Behandlungen nachgewiesen werden (siehe auch Signifikanzniveau).

Anderson-Darling Test (A-D) Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff Tests für die Anpassung an Verteilungen. Er ist empfindlicher an den Rändern der Verteilung und hat mehr Power als der K-S Test.

balancierter Versuchsplan Identische Gruppengrößen der einzelnen Behandlungen, erleichtert die Auswertung

ANOVA (Analysis of Variance) siehe Varianzanalyse

Blockbildung Anordnung der Versuchsplanpunkte in Blöcken, d.h. die Wiederholungen werden nicht nacheinander durchgeführt, sondern die Versuchsplanpunkte werden in jedem Block einmal auftauchen. Dient dem Erkennen und der Eliminierung von Trendeffekten.

Bonferroni-KI Simultanes Konfidenzintervall für mehrere Gruppen. Die KI für die individuellen Gruppen werden multiplikativ zusammengefasst.

Box-Cox Transformation Transformation der Form $Y=y^\lambda$. Neben einer Überführung in die Normalverteilung kann eine stabilisierende Wirkung auf die Varianz erreicht werden. $\lambda=1/2$ entspricht der Transformation mit der Quadratwurzel.

Cluster Zielgrößen die nahe zusammen liegen. Sie ermöglichen das Zusammenlegen von Prädiktoren.

Dixon Test Ausreissertest für Probenumfänge $3 \leq n \leq 8$ ¹³⁵

($n \leq 29$)¹³⁶. $\hat{Q} = \frac{|y_a - y_b|}{|y_{\max} - y_{\min}|}$ ist der Testwert für den Vergleich mit den Tabellenwerten, wobei y_a der vermutete Ausreisser und y_b der am nächsten liegende Wert ist. Der Test darf nicht wiederholt werden.

Exponentialverteilung Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ ($x \geq 0$). Häufig bei Lebensdaueranalysen (λ bezeichnet dann eine konstante Ausfallrate).

Fehler 1. Art Verwerfen einer korrekten Nullhypothese.

Fehler 2. Art Eine falsche Nullhypothese beibehalten.

¹³⁵ Sachs S.346

¹³⁶ DIN 53804-1 S.11

Freiheitsgrad (FG, DF, v) Stichprobenumfang n minus geschätzte Parameter a $FG=v=n-a$.

F-Wert Testwert in der ANOVA (Fisher Verteilung) für die Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese. Der zugehörige p -Wert beschreibt direkt das Signifikanzniveau $1-p$.

Hebelwirkung Hebelwirkung bedeutet, dass der x -Wert einer Beobachtung weit vom Zentrum der x -Werte aller Beobachtungen liegt. Hebelwirkungen können einen grossen Einfluss auf die angepassten Werte und die Regression haben. Werte grösser als $2p/n$ oder $3p/n$ (p entspricht den Prädiktoren (x in der Regressionsgleichung) zuzüglich der Konstanten, n der Anzahl Beobachtungen), gelten als hoch und sollten untersucht werden. Minitab 15 kennzeichnet Werte $>3p/n$.

Johnson Transformation Ein Transformationsalgorithmus der verschiedene Verteilungsfamilien berücksichtigt. Die p -Werte für die A-D Statistik werden verglichen und die optimale Transformation ausgewählt. Die Johnson Transformation ist im Gegensatz zur Box-Cox Transformation „blind“ innerhalb der Gruppen.

Kolmogoroff-Smirnoff Test Test auf die Anpassung an eine Verteilung. Vergleicht die maximale Abweichung der empirischen Stufenfunktion mit einer theoretischen Verteilung.

Konfidenzintervall (KI) Bereich, in dem Schätzwerte mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegen.

Korrelation Standardisierte Kovarianz, lineare Beziehung zwischen zwei Faktoren.

Kovarianz Mass für die Beziehung zwischen zwei Faktoren.

Kruskal-Wallis Test Test auf Gleichheit von Gruppen verschiedener Faktorstufen. Als nicht parametrischer (Rangfolgen-)Test (Median) ist er eine Alternative zur einfachen Varianzanalyse bei Nicht-Normalverteilung der Daten. Voraussetzung sind mindestens 2 ähnlich verteilte Grundgesamtheiten und homogene Varianzen. Besitzt eine gute Trennschärfe, ist aber empfindlich gegen Ausreisser.

Kurtosis Wölbung einer Verteilung. Werte nahe 0 bedeuten keine Verformung. Vergleiche Abbildung 93.

Lognormalverteilung Positiv (rechts) schiefe, linkssteile Verteilung, $\ln x$ ($X>0$) ist normalverteilt. Sie kommt oft durch eine einseitige Beschränkung des Merkmals zustande kommen.

Modell Mathematische Beschreibung des Verhältnisses der Prädiktoren zu der Zielgrösse. Die Terme sind konstant, linear, gemischt linear und quadratisch. Terme höherer Ordnung sind selten, können aber theoretisch eingeführt werden.

Mood-Median Test Nicht parametrischer Test auf Gleichheit verschiedener unabhängiger Gruppen. Wie Kruskal-Wallis, aber mit schlechterer Trennschärfe, dafür unempfindlich gegen fehlerhafte Daten und Ausreisser.

MSSD Mean of squared differences.

Nicht parametrischer Test Testverfahren, das auf weniger oder keine Parameter zurückgreift. Im Allgemeinen hat es die kleinere Power als parametrische Tests, ist dafür verteilungsunabhängig und robuster.

Normalverteilung Symmetrische, eingipflige und glockenförmige Verteilung. Sie ist durch die Parameter μ und σ vollständig bestimmt (siehe Abbildung unten). Das Maximum ist $f(\mu) = y_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$.

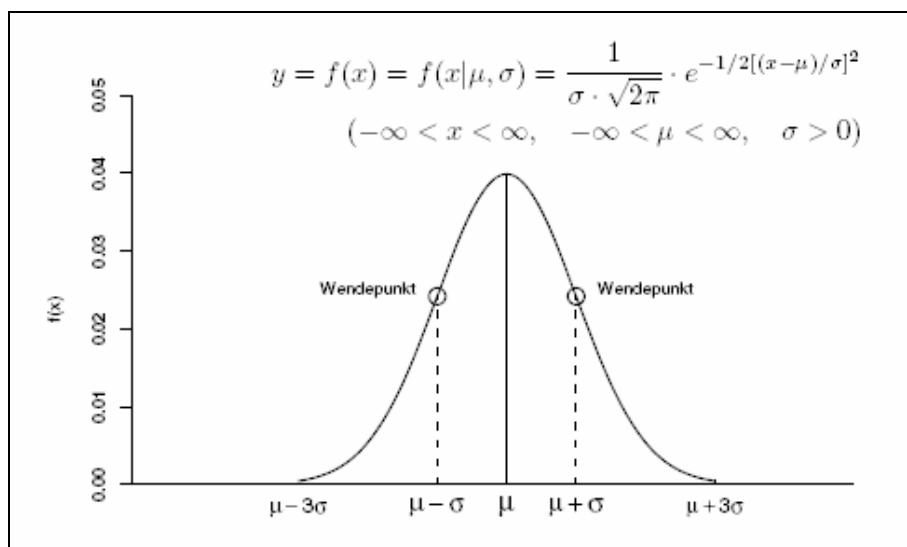


Abbildung 91¹³⁷ Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ der Normalverteilung

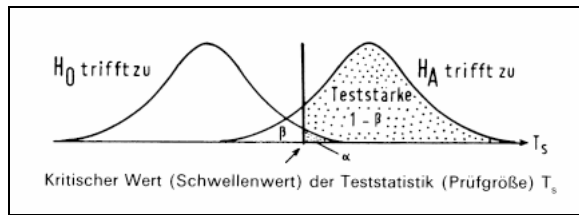
Nullhypothese (H_0) Entspricht der Hypothese, dass Daten oder Testwerte einer gleichen Grundgesamtheit entstammen, bei Annahme kann kein Unterschied zwischen Behandlungen nachgewiesen werden (siehe auch Power).

orthogonaler Versuchsplan In jeder Spalte kommt eine Faktorstufenkombination gleich häufig mit den gleichen Distanzen vor. Bedeutet wahrscheinlichkeitstheoretisch eine ausgleichende Eigenschaft.

Parameter Schätzwert der Grundgesamtheit wie Mittelwert, Standardabweichung, Lage...(wird in der Literatur z.T. auch für Faktor verwendet)

Power Die Wahrscheinlichkeit eines Tests, einen tatsächlich vorhandenen Unterschied auch zu erkennen (Trennschärfe, Teststärke), d.h. die korrekte Alternativhypothese nicht zu verwerfen ($1-\beta$).

¹³⁷ Sachs S.192/3

Abbildung 92¹³⁸ Power oder Teststärke**R² (R-Qd)**

Bestimmtheitsgrad, das Mass dafür, wie gut ein Modell an die tatsächlich gemessenen Werte angepasst ist.

Randomisierung

Zufällige Anordnung von Versuchsplanpunkten um den Einfluss von Trends zu minimieren.

Residuum

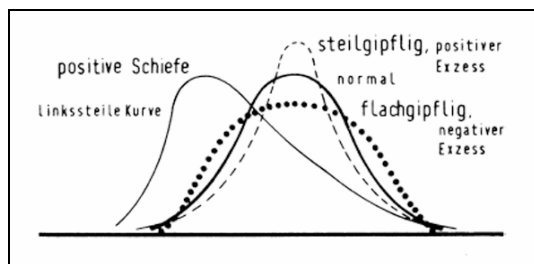
Abstand einer Beobachtung zum Regressionsmodell (angepasster Wert). Die Residuenanalyse kann Aufschluss geben über Trends, nicht im Modell eingebundene Terme oder die Gleichheit von Varianzen.

Schätzwert

Aus der Stichprobe ermittelter Parameter.

Schiefe

Die Schiefe bezeichnet die Symmetrieabweichung der Verteilung bezüglich der y-Achse. Werte nahe 0 bedeuten eine symmetrische Verteilung. Vergleiche Kurtosis.

Abbildung 93¹³⁹ Schiefe und Kurtosis (Wölbung) der Normalverteilung.**SE**

Standard error, Standardfehler.

Signifikanz(-niveau)

Bezeichnet die Wahrscheinlichkeit (Vertrauensniveau), mit der eine Nullhypothese abgelehnt werden kann.

SS (SSQ)

Sum of squares.

Stabw (Stdev)

Standardabweichung.

standardisierte Normalverteilung

Transformiert man normalverteilte Daten mit $\frac{(X - \mu)}{\sigma} = Z$ so erhält man die standardisierte Normalverteilung mit $\mu=0$ und $\sigma=1$.

¹³⁸ Sachs S.315

¹³⁹ Sachs S.155

Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist mit $y = f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} = \varphi(z)$ und die Verteilungsfunktion mit $F(z) = P(Z \leq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{v^2}{2}} dv = \Phi(z)$ gegeben.

Testverteilung (Student (t-Wert), Fisher (F-Wert), Chiquadrat X^2) Verteilung von Prüfgrößen wie Stichprobenmittelwert, -varianz oder z.B. das Verhältnis zweier Varianzen. Prüfverteilungen sind Stichprobenfunktionen normalverteilter, zufälliger Variablen.

Tukey-Test Liefert simultane Konfidenzintervalle für paarweise Differenzen von Stufenmittelwerten.

Transformation Behandlung der Daten mittels einer Funktion. Ziel ist z.B. die Standardisierung, die Anpassung an die Normalverteilung oder die Stabilisierung der Varianzen.

t-Test Test auf Gleichheit verschiedener Stichproben. Die Teststatistik wird mit dem t-Wert aus der Studentverteilung verglichen. Die Studentverteilung wird durch den FG bestimmt, hat an den Rändern die grössere und in der Mitte die kleinere Wahrscheinlichkeitsdichte. Nähert sich mit grossem FG der Normalverteilung an.

Varianzanalyse (ANOVA) Linearer Test auf Gleichheit verschiedener Gruppen. Bedingt Normalverteilung und homogene Varianzen. Vergleicht den Vertrauensbereich des Mittelwerts zwischen den Gruppen mit den Vertrauensbereichen der Mittelwerte innerhalb der Gruppen.

Weibullverteilung Bestimmt wird die Verteilung durch die beiden Parameter α (Skalenparameter) und β (Formparameter). $\beta=1$ entspricht der Exponentialverteilung. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist $f(x) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$ ($x \geq 0$).

zentraler Anteil $k\sigma$ -Bereich $\mu \pm k\sigma$

Bereich	Verteilungstyp	Verteilungsanteil
$\mu \pm 1,96\sigma$	beliebig	mindestens 74,0%
	symmetrisch-eingipflig Normalverteilung	mindestens 88,4% exakt 95,0%
$\mu \pm 3\sigma$	beliebig	mindestens 88,9%
	symmetrisch-eingipflig Normalverteilung	mindestens 95,1% exakt 99,7%

Abbildung 94¹⁴⁰ Wahrscheinlichkeiten für zentrale Anteile

z-Test (siehe auch standardisierte Normalverteilung)
Berechnet einen Testwert des Standardfehlers für den Vergleich mit kritischen Werten.

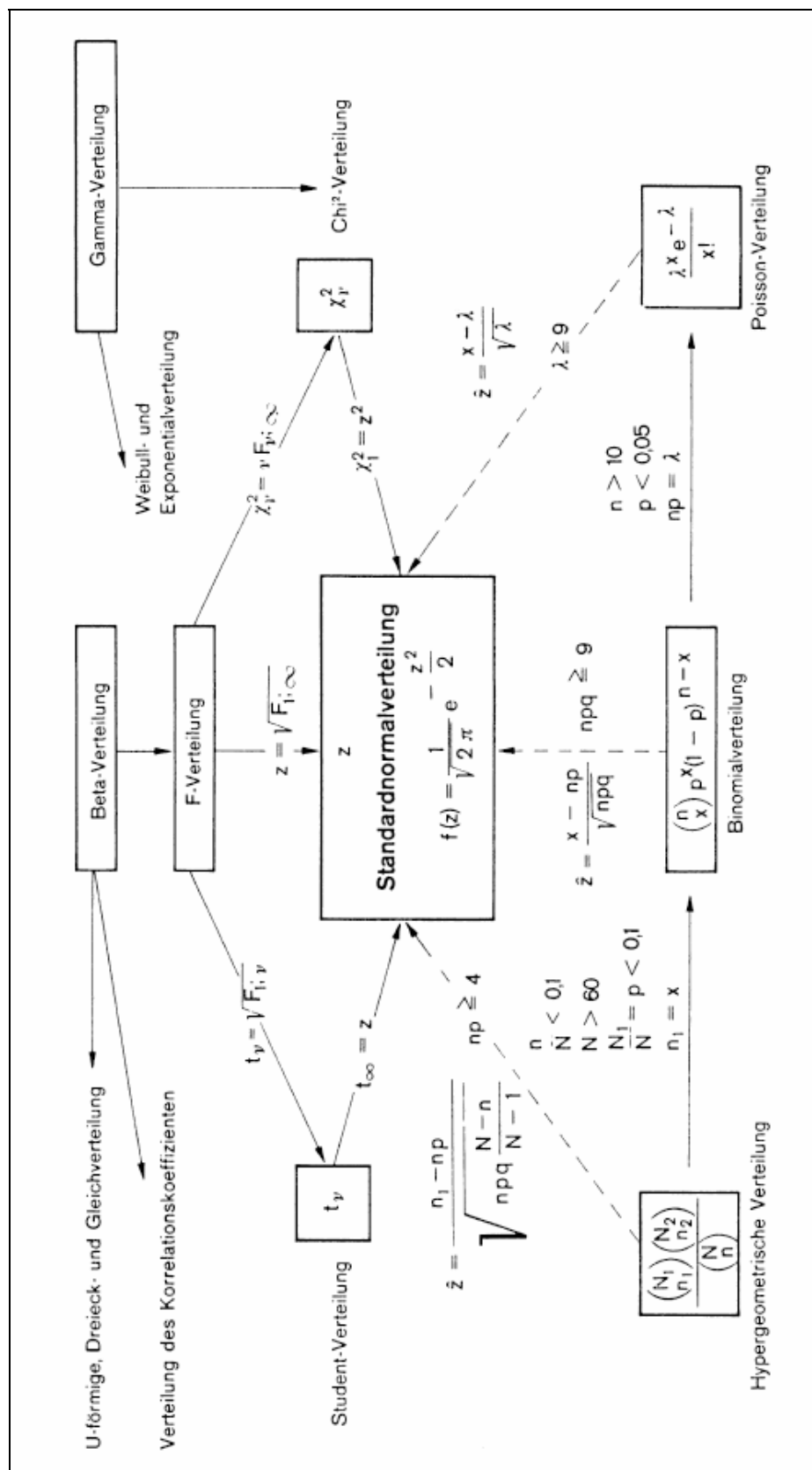


Abbildung 95¹⁴¹ Zusammenhänge zwischen verschiedenen Verteilungen.

¹⁴¹ Sachs S.221

7 Anhang 1

7.1 Quellen

7.1.1 Literaturverzeichnis

Allenspach Untersuchungen zum Versagensverhalten von Klebfugen bei mechanischer Belastung, Karin Allenspach, Diplomarbeit, Gruppe Holzphysik, IfB, ETH Zürich, 2007

Beaud Comparaison de la résistance au cisaillement en traction longitudinal et du degré de délaminage de différents adhésifs polyuréthane réactifs à une composante (PUR-1C) sur des éprouvettes d'épicéa (*Picea Abies* (L.) Karst.) à faible teneur en eau du bois, Frédéric Beaud, DEA Sciences du bois à l'Université Henri Poincaré Nancy I, 2005

Cognard Science et technologie du collage, Jacques Cognard, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2000

COST1/2 COST Action E13, State-of-the-art report, Volume 1/2, Hg. Carl-Johan Johansson, Tony Pizzi, Marc van Leemput, European Commission, Directorate-General for Research, 2002

EMPA Charakterisierung und Optimierung der Holzverklebung mit 1 Komponenten Polyurethan (1K-PUR) Klebstoffen, M.A. Schirle, T. Künniger, A. Fischer, K. Richter, KTI Projekt 4126.1, EMPA Dübendorf, 2002

Fraun Praxisgerechte Untersuchung von Emissionen bei der Verarbeitung und der Verwendung von Polyurethanklebstoffen, Abschlussbericht zum AiF-Projekt 13.336N8.030, Matthias Popp, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Bremen, 2004

gBHolz Das grosse Buch vom Holz, Hg. Martyn Branwell, Schuler Verlagsgesellschaft, Herrsching, 1980

Gfeller Vorlesungsscript Werkstoffkunde, Holz und Holzwerkstoffe, Balz Gfeller, SH-Holz Biel (heute: BFH Architektur Holz und Bau), Biel, 2000

Gfeller/Zürcher Einheimische und fremdländische Nutzhölzer, Hg. Balz Gfeller, Ernst Zürcher, 2. Auflage, Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB (heute: BFH Architektur Holz und Bau), Biel, 2005

Gross2 Technische Mechanik, Band 2: Elastostatik, Gross, Hauger, Schnell, Schröder, 8. erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005

Habenicht Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen, Gerd Habenicht, 5. erweiterte und aktualisierte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2006

Josak Einfluss der Temperatur auf verschiedene Klebstoffarten, Matusz Josak, interner Bericht Gruppe Holzphysik, IfB, ETH Zürich, 2007

Kägi Untersuchung zum Einfluss der Holzfeuchte und ausgewählter technologischer Parameter auf die Verklebungsgüte von Fichtenholz mit einem 1K PUR Klebstoff für tragende Holzbauteile, A. Kägi, P. Niemz, Gruppe Holzphysik, IfB, ETH Zürich, 2005

Klein Versuchsplanung DoE, Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik, Bernd Klein, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2004

Kleppmann Taschenbuch Versuchsplanung, Wilhelm Kleppmann, Praxisreihe Qualitätswissen (Hg. Franz J. Brunner), 2. erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2001

Müller Untersuchung zur Verklebung von Holz unterschiedlicher Jahrringneigung, Christian Müller, Gruppe Holzphysik, IfB, ETH Zürich, 2007

Niemz Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Peter Niemz, DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1993

Niemz/Mannes Untersuchungen zur Verteilung des Klebstoffes im Bereich der Leimfuge mittels Neutronenradiographie und Mikroskopie, P. Niemz, D. Mannes, E. Lehmann, P. Vontobel, S. Haase, Holz als Roh- und Werkstoff, Heft 62, S.424 – 432, Springer Verlag, 2004

PurKriechen Eignung von 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau unter Berücksichtigung von 10-jähriger Erfahrung, Boromir Radovic, Claus Rothkopf, Sonderdruck aus bauen mit holz, 6/2003, http://www.purbond.com/doc/literature/de/10Jahre_deutsch.pdf

Sachs Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R, Lothar Sachs, Jürgen Hedderich, 12. vollständig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006

Schmidheiny Polyurethanchemie, <http://www.prochem.ch/html/forum/purchem.pdf>, 2000

SFH Richtlinien für die Herstellung von Brettschichtholz, C. Sigrist, J.-M. Ducret, Schweizerische Fachgemeinschaft Holzleimbau, Stand 2006

thBois Comportement thermo-hydromécanique du bois, Parviz Navi, Frédéric Heger, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2005

Togni Untersuchungen zum Einfluss eines Wechselklimas auf Holzverklebungen, Sandro Togni, Diplomarbeit, Gruppe Holzphysik, IfB, ETH Zürich, 2007

Weichert Sorptionsverhalten von Fichte, Buche und Pressvollholz, L. Weichert, Holz als Roh- und Werkstoff, Heft 8, S.290 – 300, Springer Verlag, 1963

Wyss Versagensverhalten von Holzverklebungen im makroskopischen und mikroskopischen Bereich bei Scherbelastung, Melanie Wyss, Diplomarbeit, Gruppe Holzphysik, IfB, ETH Zürich, 2006

Zepp Klebstoffe in der Holz- und Möbelindustrie, Günter Zeppenfeld, Dirk Grunwald, 2. erweiterte Auflage, DRW Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 2005

7.1.2 Normen

DIN EN 301:2006 Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Phenoplaste und Aminoplaste – Klassifizierung und Leistungsanforderungen, Europäisches Komitee für Normung, 2006

DIN EN 302-1:2004 Klebstoffe für tragende Holzbauteile – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit, Europäisches Komitee für Normung, 2004

DIN EN 385:2002 Keilzinkenverbindungen im Bauholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung, Europäisches Komitee für Normung, 2002

DIN EN 386:2002 Brettschichtholz - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung, Europäisches Komitee für Normung, 2002

DIN EN 391:2002 Brettschichtholz - Delaminierungsprüfung von Klebstofffugen, Europäisches Komitee für Normung, 2002

DIN EN 392:1996 Brettschichtholz – Scherprüfung der Leimfugen, Europäisches Komitee für Normung, 1996

DIN 53804-1:2002 Statistische Auswertungen - Teil 1: Kontinuierliche Merkmale, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2002

SIA 265 Holzbau, Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich, 2003

SIA 265/1 Holzbau – Ergänzende Festlegungen, Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, Zürich, 2003

7.1.3 Handbücher und technische Anleitungen

Ext Bedienungsanleitung Videoextensometer für Windows, Handbuch 199, Messphysik Laborgeräte, Fürstentfeld, 1994

DIC-basics2 Digital Image Correlation: Theory, Hubert W. Schreier, Ralf Lichtenberger, Limes, undatiert

experimental2d Experimental Considerations For 2-D Digital Image Correlation, Stephen R. McNeill, Hubert W. Schreier, Ralf Lichtenberger, Limes, undatiert

StatGuide StatGuide, Minitab 15 Statistiksoftware für Windows - HTML Help (Stichwortsuche, keine Seitenangabe möglich)

MinitabHelp Minitab 15 Statistiksoftware für Windows - HTML Help (Stichwortsuche, keine Seitenangabe möglich)

7.2 Messmittel/technische Einrichtungen

M/Auflichtmikroskop Leica Typ DM LM/P, Leica IM 1000

M/ESEM Environmental Scanning Electron Microscope, Quanta 600, FEI.

M/Ext Videoextensometer Messphysik ME46, Kamera Mintron MTV-1362CA, Objektiv Tamron 20HA 25mm.

M/Klima Diverse Klimaschränke Weiss und Feutron. Klimakammern Weiss und KlimaSYSems

M/Klimalogger Ecolog TH1, ELPRO; EasyLog-USB

M/Stereo Olympus szx9, Software analSYS Five, Olympus soft imaging solutions.

M/Vic Kamera Vic 2D, Objektiv Nikon AF Nikkor 28-105mm, 1:3.5-4.5. Software Vic Snap, Vic 2D, Limes correlated solutions.

MZwick Zwick Universalprüfmaschine BZ100/TL3S,
Kraftaufnehmer 2.5-100kN, Prüfsoftware testXpert V11.02.

8 Anhang 2

8.1 Statistik: Berichte

Anmerkung: Falls nicht anders erwähnt sind die Berichte in Minitab 15 Statistical Software for Windows erarbeitet. Die Bereiche zwischen einfachen Anführungszeichen (oder einfaches Anführungszeichen am Anfang der Zeile) sind eingefügte Anmerkungen zum besseren Verständnis oder zur Interpretation der Ergebnisse und sind nicht vom jeweiligen Programm (Minitab 15, SAS) generiert. Die SAS Projekte wurden von PD Dr. Mandallaz, D-UWIS, ETH Zürich erarbeitet.

8.1.1 S1

Versuchsplanung Versuchsreihe 2 Purbond - Minitab 15-Projektbericht

'D-optimale Designmatrix erstellen aus vollfaktoriellem Versuchsplan („mehrstufiger faktorieller Versuchsplan“) Minitab optimiert neben der Determinante die Spur (A-Optimalität, Summe der Hauptdiagonale der inversen $X^T X$ Matrix) und die Hebelwirkung (G- und V-Optimalität). Die Determinante wird maximiert, die Spur minimiert, für die Hebelwirkung sind Werte nahe 1 schlecht.'

19.10.2007 21:39:13

Mehrstufiger faktorieller Versuchsplan

Faktoren:	4	Replikationen:	1
Basisdurchläufe:	36	Durchläufe gesamt:	36
Basisblöcke:	1	Blöcke gesamt:	1

Anzahl der Stufen: 2; 3; 3; 2

Versuchsplantabelle

Durchlauf	Blk	A	B	C	D
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2
3	1	1	1	2	1
4	1	1	1	2	2
5	1...				

...3 2

31	1	2	3	1	1
32	1	2	3	1	2
33	1	2	3	2	1
34	1	2	3	2	2
35	1	2	3	3	1
36	1	2	3	3	2

Optimaler Versuchsplan: u; oT; Pr; T

Gemäß D-Optimalität ausgewählter faktorieller Versuchsplan

Anzahl potenzieller Versuchsplanpunkte: 36

Anzahl von Versuchsplanpunkten in optimalem Versuchsplan: 30

Modellterme: A; B; C; D; AB; AC; AD; BC; BD; CD

Anfangsversuchsplan generiert mit der sequenziellen Methode

Anfangsversuchsplan verbessert durch Austauschen von Punkten
Die Anzahl der ausgetauschten Versuchsplanpunkte beträgt 5

Optimaler Versuchsplan

Zeilennummer der ausgewählten Versuchsplanpunkte: 17; 36; 14; 31; 10; 27; 1;
34; 20; 15; 4; 21; 8; 25; 3;
7; 28; 18; 35; 22; 26; 9; 2;
12; 16; 5; 24; 19; 29; 33

Bedingungszahl: 8.43979
D-Optimalität (Determinante von XTX): 1.60052E+24
A-Optimalität (Spur von inv(XTX)): 1.61759
G-Optimalität (durchschn. Hebelwirkung/max. Hebelwirkung): 0.769231
V-Optimalität (durchschnittliche Hebelwirkung): 0.666667
Maximale Hebelwirkung: 0.866667

8.1.2 S2

Versuchsplanung Versuchsreihe 2 Geistlich - Minitab 15-Projektbericht

19.10.2007 21:50:20

Mehrstufiger faktorieller Versuchsplan

Faktoren: 5 Replikationen: 1
Basisdurchläufe: 72 Durchläufe gesamt: 72
Basisblöcke: 1 Blöcke gesamt: 1

Anzahl der Stufen: 2; 2; 3; 3; 2

Versuchsplantabelle

Durchlauf	Blk	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	2	1
4	1	1	1	1	2	2
5	1...					
			...2	1	3	2
61	1	2	2	2	1	1
62	1	2	2	2	1	2
63	1	2	2	2	2	1
64	1	2	2	2	2	2
65	1	2	2	2	3	1
66	1	2	2	2	3	2
67	1	2	2	3	1	1
68	1	2	2	3	1	2
69	1	2	2	3	2	1
70	1	2	2	3	2	2
71	1	2	2	3	3	1
72	1	2	2	3	3	2

Optimaler Versuchsplan: u; oT; Zw; Pr; T

Gemäß D-Optimalität ausgewählter faktorieller Versuchsplan

Anzahl potenzieller Versuchsplanpunkte: 72
Anzahl von Versuchsplanpunkten in optimalem Versuchsplan: 30

Modellterme: A; B; C; D; E; AB; AC; AD; AE; BC; BD; BE; CD; CE; DE

Anfangsversuchsplan generiert mit der sequenziellen Methode
Anfangsversuchsplan verbessert durch Austauschen von Punkten

Die Anzahl der ausgetauschten Versuchsplanpunkte beträgt 5

Optimaler Versuchsplan

Zeilennummer der ausgewählten Versuchsplanpunkte: 17; 36; 54; 71; 6; 70; 14;
66; 23; 51; 9; 28; 38; 55; 1;
46; 20; 63; 12; 33; 41; 68;
4; 25; 43; 58; 39; 62; 29; 49

Bedingungszahl: 20.9481
D-Optimalität (Determinante von XTX): 5.57175E+32
A-Optimalität (Spur von $\text{inv}(XTX)$): 2.57332
G-Optimalität (durchschn. Hebelwirkung/max. Hebelwirkung): 0.918648
V-Optimalität (durchschnittliche Hebelwirkung): 0.9
Maximale Hebelwirkung: 0.979701

8.1.3 S3

ANOVA der Einzelwerte, Versuchsreihe 1 , SAS-Projektbericht

----- kleb=1 (Purbond) -----

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Level s	Values
T	2	20 30
Kl	2	A1 A4
Pr	3	75 100 150
Zw	3	0 25 50

Dependent Variable: tmax tmax

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	10	2321.594774	232.159477	36.00	<.0001
Error	334	2153.874491	6.448726		
Corrected Total	344	4475.469265			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	tmax Mean
0.518738	20.17935	2.539434	12.58432

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Kl	1	0.3563814	0.3563814	0.06	0.8143
u(Kl)	2	1.1661141	0.5830571	0.09	0.9136
T(Kl)	2	96.3397240	48.1698620	7.47	0.0007
Pr	2	50.2771309	25.1385655	3.90	0.0212
Zw	2	30.3135771	15.1567885	2.35	0.0969
Lf	1	522.7442533	522.7442533	81.06	<.0001

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	20.31677553	1.89966427	10.69	<.0001
Kl A1	1.07447120	1.92416118	0.56	0.5769
Kl A4	0.00000000	.	.	.
u(Kl) A1	0.03324237	0.08092620	0.41	0.6815
u(Kl) A4	0.03662774	0.14940906	0.25	0.8065
T(Kl) 20 A1	-1.46729025	0.38327386	-3.83	0.0002
T(Kl) 30 A1	0.00000000	.	.	.
T(Kl) 20 A4	-0.26692007	0.51368176	-0.52	0.6037
T(Kl) 30 A4	0.00000000	.	.	.
Pr 75	-1.06818688	0.43325000	-2.47	0.0142
Pr 100	-0.13424565	0.37558078	-0.36	0.7210
Pr 150	0.00000000	.	.	.
Zw 0	-1.11379931	0.57730973	-1.93	0.0545

Zw	25	0.03227804 B	1.07022803	0.03	0.9760
Zw	50	0.00000000 B	.	.	.
Lf		-0.58108985	0.06454099	-9.00	<.0001

,Die Variable T (nur für A1) ist signifikant (Werte für T=20 kleiner)

Die Variable Pr liefert signifikant kleinere Werte für Pr=75

Lf steigend liefert signifikant kleinere Werte. Die Residuen weichen hochsignifikant von der Normalverteilung ab, was zum Teil wegen der grossen Stichprobe bedingt wird. Die Anpassung ist nicht so gut wie mit den Mittelwerten.'

----- kleb=2 (Geistlich)-----

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Level s	Values
T	2	20 30
Kl	2	A5 A8
Pr	3	75 100 150
Zw	3	0 25 50

Dependent Variable: tmax tmax

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	10	4240.755212	424.075521	57.98	<.0001
Error	279	2040.638825	7.314118		
Corrected Total	289	6281.394038			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	tmax Mean
0.675130	26.84275	2.704463	10.07521

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
Kl	1	0.002562	0.002562	0.00	0.9851
u(Kl)	2	104.722239	52.361120	7.16	0.0009
T(Kl)	2	1235.421954	617.710977	84.45	<.0001
Pr	2	667.621163	333.810581	45.64	<.0001
Zw	2	69.893093	34.946547	4.78	0.0091
Lf	1	183.349445	183.349445	25.07	<.0001

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	20.16277122 B	1.24509668	16.19	<.0001
Kl A5	-4.22806611 B	1.34755049	-3.14	0.0019
Kl A8	0.00000000 B	.	.	.
u(Kl) A5	-0.24621410	0.08943858	-2.75	0.0063
u(Kl) A8	0.10762333	0.12582168	0.86	0.3931
T(Kl) 20 A5	5.50051582 B	0.44141013	12.46	<.0001
T(Kl) 30 A5	0.00000000 B	.	.	.
T(Kl) 20 A8	-2.90537043 B	1.12823353	-2.58	0.0105
T(Kl) 30 A8	0.00000000 B	.	.	.
Pr 75	-5.30682555 B	0.61774042	-8.59	<.0001
Pr 100	-1.15266224 B	0.50648394	-2.28	0.0236
Pr 150	0.00000000 B	.	.	.
Zw 0	-2.25005680 B	0.83319060	-2.70	0.0073
Zw 25	-0.17567379 B	0.90149206	-0.19	0.8456
Zw 50	0.00000000 B	.	.	.
Lf	-0.32155033	0.06422293	-5.01	<.0001

,Mit dem Vorbehalt der Abweichung von der Normalverteilung und der grossen Stichprobengrösse beobachtet man folgendes

U ist signifikant für A5 (steigt u nimm tmax ab)

T=20 liefert höhere Werte für A5 aber tiefere für A8

Steigende Pr liefern grössere tmax-Werte

Zw steigend liefert grössere tmax-Werte

Zw steigend liefert kleinere tmax Werte'

8.1.4 S4

ANOVA der Mittelwerte, Versuchsreihe 1 , SAS-Projektbericht

----- kleb=1 (Purbond) -----

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
T	2	20 30
KI	2	A1 A4
Pr	3	75 100 150
Zw	3	0 25 50

Number of Observations Read 36
Number of Observations Used 36

Dependent Variable: tmax tmax

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	10	240.1942359	24.0194236	6.19	0.0001
Error	25	97.0793821	3.8831753		
Corrected Total	35	337.2736181			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	tmax Mean
0.712164	15.34760	1.970577	12.83964

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
KI	1	0.14952284	0.14952284	0.04	0.8460
u(KI)	2	0.08574523	0.04287262	0.01	0.9890
T(KI)	2	11.83113917	5.91556958	1.52	0.2375
Pr	2	7.21722274	3.60861137	0.93	0.4080
Zw	2	3.34557956	1.67278978	0.43	0.6547
Lf	1	52.26617174	52.26617174	13.46	0.0012

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	20.38724823	5.10041415	4.00	0.0005
KI A1	1.57162855	5.17198721	0.30	0.7637
KI A4	0.00000000	.	.	.
u(KI) A1	-0.02270132	0.20162444	-0.11	0.9113
u(KI) A4	0.02205919	0.39903075	0.06	0.9564
T(KI) 20 A1	-1.47514350	0.86269659	-1.71	0.0997
T(KI) 30 A1	0.00000000	.	.	.
T(KI) 20 A4	-0.44256563	1.26729201	-0.35	0.7298
T(KI) 30 A4	0.00000000	.	.	.
Pr 75	-1.11891824	1.02258833	-1.09	0.2843
Pr 100	0.06986909	0.87797148	0.08	0.9372
Pr 150	0.00000000	.	.	.
Zw 0	-1.18260760	1.33345022	-0.89	0.3836
Zw 25	-0.33998401	2.36920631	-0.14	0.8870
Zw 50	0.00000000	.	.	.
Lf	-0.57186593	0.15587533	-3.67	0.0012

,Die Anpassung ist gut, die Residuen weichen nicht signifikant von der Normalverteilung ab.

Einzig die Variable Lf ist signifikant: steigt Lf, nimm tmax ab'

----- kleb=2 (Geistlich) -----

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
-------	--------	--------

T	2	20	30
KI	2	A5	A8
Pr	3	75	100 150
Zw	3	0	25 50

Dependent Variable: tmax tmax

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	10	418.4151258	41.8415126	9.67	<.0001
Error	17	73.5769339	4.3280549		
Corrected Total	27	491.9920597			

R-Square Coeff Var Root MSE tmax Mean
0.850451 20.53284 2.080398 10.13205

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
KI	1	0.0004207	0.0004207	0.00	0.9922
u(KI)	2	8.8908500	4.4454250	1.03	0.3792
T(KI)	2	132.7709599	66.3854800	15.34	0.0002
Pr	2	49.8836874	24.9418437	5.76	0.0123
Zw	2	11.9868124	5.9934062	1.38	0.2772
Lf	1	19.1550819	19.1550819	4.43	0.0506

„Die Anpassung ist recht gut, die Variablen T Pr Zw und Lf sind signifikant“

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	20.40107366 B	3.15577697	6.46	<.0001
KI A5	-4.55732423 B	3.39291749	-1.34	0.1969
KI A8	0.00000000 B	.	.	.
u(KI) A5	-0.18673416	0.22368787	-0.83	0.4154
u(KI) A8	0.18513398	0.31131585	0.59	0.5599
T(KI) 20 A5	5.58033682 B	1.05922432	5.27	<.0001
T(KI) 30 A5	0.00000000 B	.	.	.
T(KI) 20 A8	-3.46924885 B	2.85234593	-1.22	0.2405
T(KI) 30 A8	0.00000000 B	.	.	.
Pr 75	-4.72606877 B	1.47176656	-3.21	0.0051
Pr 100	-1.34083468 B	1.19616950	-1.12	0.2779
Pr 150	0.00000000 B	.	.	.
Zw 0	-2.76762516 B	1.91395940	-1.45	0.1664
Zw 25	-0.19536531 B	2.08041639	-0.09	0.9263
Zw 50	0.00000000 B	.	.	.
Lf	-0.34148274	0.16232041	-2.10	0.0506

„Die Variable T ist nur für A5 signifikant (20 liefert höhere tmax Werte. Pr=75 liefert signifikant kleinere tmax Werte. Tmax nimmt signifikant ab wenn Lf zunimmt. Die Residuen weichen leicht von der Normalverteilung ab. Dies dürfte aber nur einen geringen Einfluss auf die Signifikanz haben.“

8.1.5 S5

Purbond A4 >= 13.5% - Minitab-Projektbericht

Deskriptive Statistik

N	N*	Mittelwert	StdAbw	Median	Minimum	Maximum	Schiefe	Kurtosis
36	0	10.9881	3.42211	9.71	6.65	17.74	0.845972	-0.742915

Box-Cox-Transformation: Lambda = 1

Test auf Güte der Anpassung

Verteilung	AD	p	LVT p
Normal	2.361	<0.005	
Box-Cox-Transformation	2.361	<0.005	
Lognormal	1.527	<0.005	
Lognormal mit 3 Parametern	0.790	*	0.028

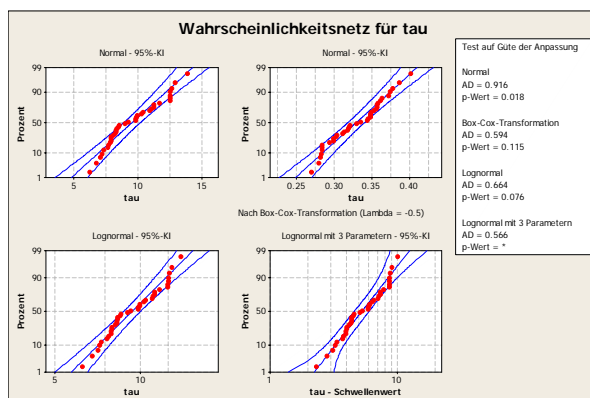
Exponential	8.708	<0.003	
Exponential mit 2 Parametern	1.569	0.017	0.000
Weibull	2.218	<0.010	
Weibull mit 3 Parametern	1.075	0.009	0.000
Kleinsten Extremwert	2.941	<0.010	
Größter Extremwert	1.497	<0.010	
Gamma	1.836	<0.005	
Gamma mit 3 Parametern	0.863	*	0.005
Logistisch	2.177	<0.005	
Loglogistisch	1.452	<0.005	
Loglogistisch mit 3 Parametern	0.710	*	0.015

8.1.6 S6

Geistlich A5 >= 13.5% - Minitab-Projektbericht

Ergebnisse für: a5>13pro

Identifikation der Verteilung für tau



Deskriptive Statistik

N	N*	Mittelwert	StdAbw	Median	Minimum	Maximum	Schiefte	Kurtosis
38	0	9.55158	2.04835	9.095	6.23	13.86	0.416912	-0.987402

Box-Cox-Transformation: Lambda = -0.5

Johnson-Transformationsfunktion:

$$0.278823 + 0.795583 * \ln\left(\frac{X - 5.93386}{14.4126 - X}\right)$$

Test auf Güte der Anpassung

Verteilung	AD	p	LVT p
Normal	0.916	0.018	
Box-Cox-Transformation	0.594	0.115	
Lognormal	0.664	0.076	
Lognormal mit 3 Parametern	0.566	*	0.410
Exponential	10.994	<0.003	
Exponential mit 2 Parametern	2.711	<0.010	0.000
Weibull	1.006	<0.010	
Weibull mit 3 Parametern	0.511	0.207	0.010
Kleinsten Extremwert	1.361	<0.010	
Größter Extremwert	0.606	0.111	
Gamma	0.766	0.047	
Gamma mit 3 Parametern	0.507	*	0.157
Logistisch	0.936	0.008	
Loglogistisch	0.743	0.030	
Loglogistisch mit 3 Parametern	0.589	*	0.267
Johnson-Transformation	0.420	0.311	

Box Cox Transformation durchgeführt (lambda -0.5)

95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen

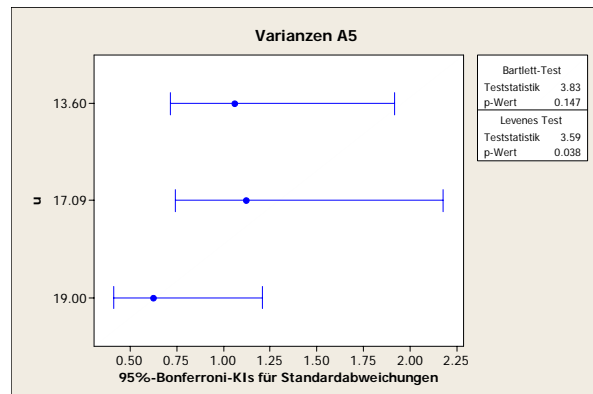
u	N	Untergrenze	StdAbw	Obergrenze
13.60	14	0.716529	1.05638	1.91536
17.09	12	0.739980	1.12148	2.17441
19.00	12	0.411363	0.62344	1.20878

Bartlett-Test (Normalverteilung)

Teststatistik = 3.83; p-Wert = 0.147

Levenes Test (beliebige stetige Verteilung)

Teststatistik = 3.59; p-Wert = 0.038



Einfache ANOVA: boxcox im Vergleich zu u

Quelle	DF	SS	MS	F	p
u	2	3.1215	1.5607	63.26	0.000
Fehler	35	0.8635	0.0247		
Gesamt	37	3.9850			

S = 0.1571 R-Qd = 78.33% R-Qd(kor) = 77.09%

Stufe	N	Mittelwert	StdAbw	Individuelle 95%-KIs für Mittelwert anhand der zusammengefassten StdAbw
13.60	14	3.4399	0.1535	(---*---)
17.09	12	2.9378	0.1935	(---*---)
19.00	12	2.7819	0.1150	(---*---)

Zusammengefasste StdAbw = 0.1571

,boxcox meint den transformierten Wert

Die Regressionsgleichung lautet

boxcox = 5.12 - 0.125 u

Prädiktor	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	5.1248	0.1879	27.28	0.000
u	-0.12502	0.01134	-11.02	0.000

S = 0.159064 R-Qd = 77.1% R-Qd(kor) = 76.5%

Varianzanalyse

Quelle	DF	SS	MS	F	p
Regression	1	3.0741	3.0741	121.50	0.000
Residuenfehler	36	0.9108	0.0253		
Gesamt	37	3.9850			

Ungewöhnliche Beobachtungen

Beob	u	boxcox	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
17	17.1	2.5923	2.9887	0.0269	-0.3964	-2.53R
18	17.1	2.6552	2.9887	0.0269	-0.3335	-2.13R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Regressionsanalyse: tau im Vergleich zu u

Die Regressionsgleichung lautet

$$\text{tau} = 22.4 - 0.782 \text{ u}$$

Prädiktor	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	22.384	1.163	19.24	0.000
u	-0.78210	0.07023	-11.14	0.000

S = 0.985020 R-Qd = 77.5% R-Qd(kor) = 76.9%

Varianzanalyse

Quelle	DF	SS	MS	F	p
Regression	1	120.31	120.31	124.00	0.000
Residuenfehler	36	34.93	0.97		
Gesamt	37	155.24			

Ungewöhnliche Beobachtungen

Beob	u	tau	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
11	13.6	13.860	11.747	0.254	2.113	2.22R
17	17.1	6.720	9.021	0.167	-2.301	-2.37R
18	17.1	7.050	9.021	0.167	-1.971	-2.03R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

8.1.7 S7

Geistlich A8 >= 13.5% - Minitab-Projektbericht

Identifikation der Verteilung für tau

* HINWEIS * p-Wert für Originaldaten > 0.1. Es wurde keine Johnson-Transformation ausgewählt.

Deskriptive Statistik

N	N*	Mittelwert	StdAbw	Median	Minimum	Maximum	Schiefte	Kurtosis
36	0	10.2542	1.20122	10.31	8.27	12.43	0.229396	-0.889462

Box-Cox-Transformation: Lambda = 0

Test auf Güte der Anpassung

Verteilung	AD	p	LVT p
Normal	0.447	0.265	
Box-Cox-Transformation	0.362	0.424	
Lognormal	0.362	0.424	
Lognormal mit 3 Parametern	0.368	*	0.772
Exponential	12.976	<0.003	
Exponential mit 2 Parametern	2.621	<0.010	0.000
Weibull	0.737	0.049	
Weibull mit 3 Parametern	0.354	0.475	0.021
Kleinster Extremwert	0.976	0.013	
Größter Extremwert	0.390	>0.250	
Gamma	0.407	>0.250	

Gamma mit 3 Parametern	0.359	*	0.492
Logistisch	0.462	0.207	
Loglogistisch	0.404	>0.250	
Loglogistisch mit 3 Parametern	0.389	*	0.714

95%-Bonferroni-KIs für Standardabweichungen

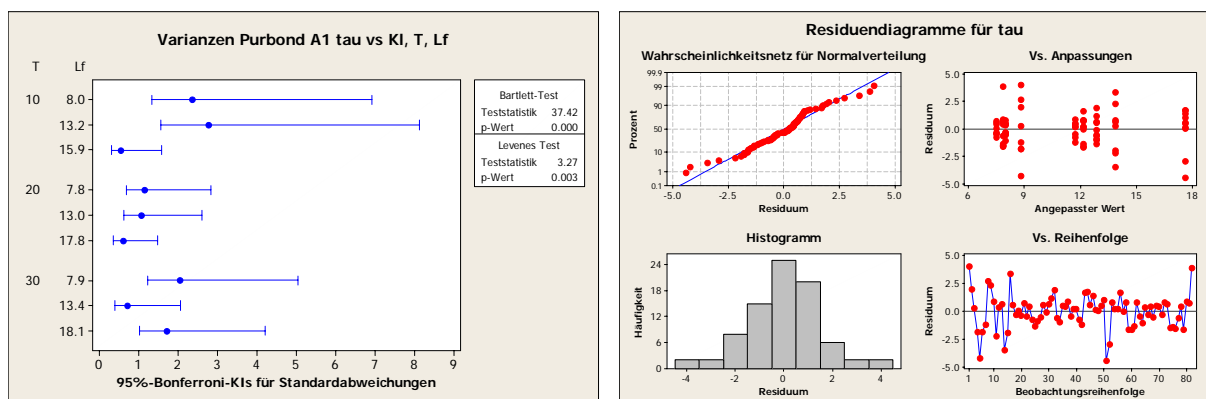
u	oT	N	Untergrenze	StdAbw	Obergrenze
13.60	90	10	0.951559	1.49372	3.17877
17.09	90	14	0.600263	0.88497	1.60457
19.00	90	12	0.609842	0.92425	1.79201

Bartlett-Test (Normalverteilung)
Teststatistik = 3.60; p-Wert = 0.165

Levenes Test (beliebige stetige Verteilung)
Teststatistik = 0.64; p-Wert = 0.535

8.1.8 S8

Purbond A1 tau vs T, Lf - Minitab-Projektbericht



Allgemeines lineares Modell: tau im Vergleich zu T; Lf_std

Faktor	Typ	Stufen	Werte
T	fest	3	10; 20; 30
Lf_std	fest	3	8.0; 13.5; 17.0

Varianzanalyse für tau unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
T	2	76.17	72.49	36.25	14.05	0.000
Lf_std	2	643.30	630.49	315.25	122.16	0.000
T*Lf_std	4	154.48	154.48	38.62	14.97	0.000
Fehler	73	188.38	188.38	2.58		
Gesamt	81	1062.34				

S = 1.60641 R-Qd = 82.27% R-Qd(kor) = 80.32%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	11.1634	0.1785	62.54	0.000
T				
10	-1.0984	0.2602	-4.22	0.000
20	-0.1484	0.2460	-0.60	0.548
Lf_std				
8.0	3.3784	0.2508	13.47	0.000
13.5	-0.0087	0.2556	-0.03	0.973
T*Lf_std				
10 8.0	0.4129	0.3669	1.13	0.264

10	13.5	-1.2138	0.3701	-3.28	0.002
20	8.0	-2.2384	0.3468	-6.45	0.000
20	13.5	1.8727	0.3502	5.35	0.000

Ungewöhnliche Beobachtungen für tau

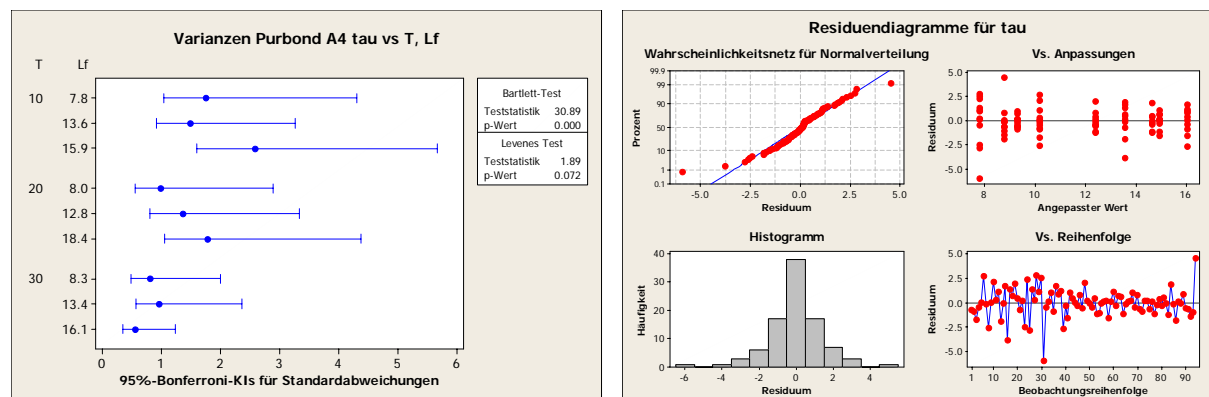
Beob	tau	Anpassung	SE	Anpassung	Residuum	Std.
1	12.8900	8.8425	0.5680	4.0475	2.69	R
5	4.6000	8.8425	0.5680	-4.2425	-2.82	R
14	10.3800	13.8562	0.5680	-3.4762	-2.31	R
16	17.2600	13.8562	0.5680	3.4038	2.27	R
51	13.2000	17.6140	0.5080	-4.4140	-2.90	R
82	11.7600	7.8740	0.5080	3.8860	2.55	R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

8.1.9 S9

Purbond A4 vs T, Lf - Minitab-Projektbericht

Allgemeines lineares Modell: tau im Vergleich zu T; Lf_std



Faktor	Typ	Stufen	Werte
T	fest	3	10; 20; 30
Lf_std	fest	3	8.0; 13.5; 17.0

Varianzanalyse für tau unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
T	2	117.680	111.364	55.682	24.27	0.000
Lf_std	2	558.972	562.463	281.232	122.60	0.000
T*Lf_std	4	91.821	91.821	22.955	10.01	0.000
Fehler	85	194.975	194.975	2.294		
Gesamt	93	963.447				

S = 1.51454 R-Qd = 79.76% R-Qd(kor) = 77.86%

Ungewöhnliche Beobachtungen für tau

Beob	tau	Anpassung	SE	Anpassung	Residuum	Std.
16	9.7800	13.5850	0.4789	-3.8050	-2.65	R
31	1.8800	7.8083	0.4372	-5.9283	-4.09	R
94	13.3300	8.7880	0.4789	4.5420	3.16	R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Schrittweise Regression: tau im Vergleich zu T; Lf_std

Alpha für Aufnahme: 0.15 Alpha für Ausschluss: 0.15

Die Antwort ist tau in Abhängigkeit von 2 Prädiktoren, wobei N = 94

Schritt	1	2
Konstante	19.89	18.19

Lf_std	-0.622	-0.622
t-Wert	-9.63	-10.09
p-Wert	0.000	0.000

T	0.085
t-Wert	3.18
p-Wert	0.002

S	2.28	2.18
R-Qd	50.22	55.21
R-Qd(kor)	49.68	54.22
Mallows-Cp	11.1	3.0

Regressionsanalyse: tau im Vergleich zu T; Lf_std

Die Regressionsgleichung lautet
 $\tau = 18.2 + 0.0853 T - 0.622 Lf_std$

Prädiktor	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	18.1949	0.9939	18.31	0.000
T	0.08534	0.02681	3.18	0.002
Lf_std	-0.62155	0.06158	-10.09	0.000

S = 2.17766 R-Qd = 55.2% R-Qd(kor) = 54.2%

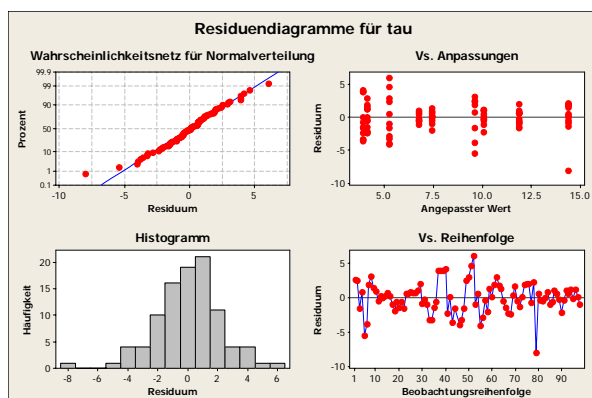
Varianzanalyse

Quelle	DF	SS	MS	F	p
Regression	2	531.91	265.95	56.08	0.000
Residuenfehler	91	431.54	4.74		
Gesamt	93	963.45			

8.1.10 S10

Geistlich A5 tau vs T, Lf - Minitab-Projektbericht

Allgemeines lineares Modell: tau im Vergleich zu T; Lf_Std



Faktor	Typ	Stufen	Werte
T	fest	3	10; 20; 30
Lf_Std	fest	3	8.0; 13.5; 18.0

Varianzanalyse für tau unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
--------	----	--------	--------	--------	---	---

T	2	901.45	763.01	381.50	71.83	0.000
Lf_Std	2	189.78	206.83	103.41	19.47	0.000
T*Lf_Std	4	142.61	142.61	35.65	6.71	0.000
Fehler	88	467.40	467.40	5.31		
Gesamt	96	1701.24				

S = 2.30464 R-Qd = 72.53% R-Qd(kor) = 70.03%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	8.1449	0.2378	34.25	0.000
T				
10	0.8679	0.3471	2.50	0.014
20	2.8499	0.3340	8.53	0.000
Lf_Std				
8.0	1.5966	0.3397	4.70	0.000
13.5	0.4562	0.3266	1.40	0.166
T*Lf_Std				
10 8.0	-1.0169	0.5031	-2.02	0.046
10 13.5	0.5710	0.4792	1.19	0.237
20 8.0	1.7869	0.4686	3.81	0.000
20 13.5	0.4039	0.4515	0.89	0.373

Ungewöhnliche Beobachtungen für tau

Beob	tau	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
5	4.1400	9.5925	0.8148	-5.4525	-2.53 R
51	9.8500	5.2536	0.6949	4.5964	2.09 R
52	11.3000	5.2536	0.6949	6.0464	2.75 R
79	6.3600	14.3783	0.6653	-8.0183	-3.63 R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Bonferroni 95.0% Simultane Konfidenzintervalle

Antwortvariable tau

Alle paarweisen Vergleiche zwischen den Stufen von T

T = 10 subtrahiert von:

T	Untergrenze	Mitte	Obergrenze	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
20	0.524	1.982	3.440	(-----*-----)
30	-6.017	-4.586	-3.155	(---*---)
				-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
				-7.0 -3.5 0.0 3.5

T = 20 subtrahiert von:

T	Untergrenze	Mitte	Obergrenze	-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
30	-7.942	-6.568	-5.193	(---*---)
				-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
				-7.0 -3.5 0.0 3.5

Bonferroni-Simultantests

Antwortvariable tau

Alle paarweisen Vergleiche zwischen den Stufen von T

T = 10 subtrahiert von:

T	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
20	1.982	0.5974	3.318	0.0040
30	-4.586	0.5864	-7.821	0.0000

T = 20 subtrahiert von:

T	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
30	-6.568	0.5631	-11.66	0.0000

Bonferroni 95.0% Simultane Konfidenzintervalle

Antwortvariable tau

Alle paarweisen Vergleiche zwischen den Stufen von Lf_Std

Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze	
13.5	-2.536	-1.140	0.255	(-----*-----)
18.0	-5.111	-3.649	-2.188	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-4.5 -3.0 -1.5 0.0

Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze	
18.0	-3.916	-2.509	-1.102	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----+-----
				-4.5 -3.0 -1.5 0.0

Bonferroni-Simultantests

Antwortvariable tau

Alle paarweisen Vergleiche zwischen den Stufen von Lf_Std

Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
13.5	-1.140	0.5718	-1.994	0.1476
18.0	-3.649	0.5988	-6.094	0.0000

Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
18.0	-2.509	0.5765	-4.352	0.0001

Bonferroni 95.0% Simultane Konfidenzintervalle

Antwortvariable tau

Alle paarweisen Vergleiche zwischen den Stufen von T*Lf_Std

T = 10

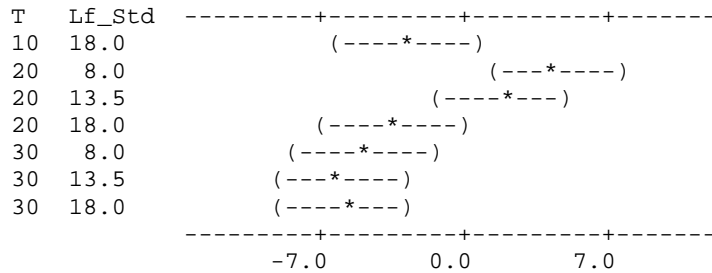
Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze	
10	13.5	-3.162	0.447	4.057	
10	18.0	-5.796	-2.187	1.423	
20	8.0	1.313	4.786	8.259	
20	13.5	-1.110	2.262	5.635	
20	18.0	-6.646	-2.841	0.964	
30	8.0	-7.875	-4.339	-0.803	
30	13.5	-9.157	-5.684	-2.211	
30	18.0	-8.947	-5.473	-2.000	
T	Lf_Std				-----+-----+-----+-----+-----
10	13.5				(-----*-----)
10	18.0				(-----*-----)
20	8.0				(-----*-----)
20	13.5				(-----*-----)
20	18.0				(-----*-----)
30	8.0				(-----*-----)
30	13.5				(-----*-----)
30	18.0				(-----*-----)
					-----+-----+-----+-----+-----
					-7.0 0.0 7.0

T = 10

Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

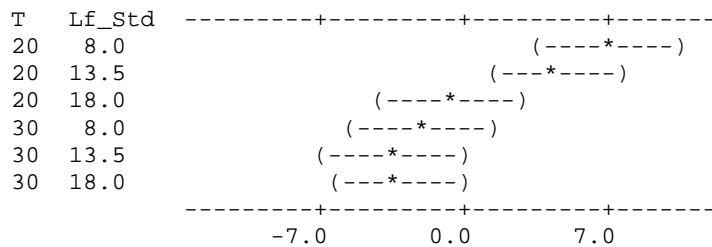
T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
10	18.0	-6.037	-2.634	0.769
20	8.0	1.080	4.338	7.597
20	13.5	-1.336	1.815	4.966
20	18.0	-6.898	-3.289	0.321
30	8.0	-8.111	-4.786	-1.461
30	13.5	-9.390	-6.132	-2.873
30	18.0	-9.179	-5.921	-2.663



T = 10

Lf_Std = 18.0 subtrahiert von:

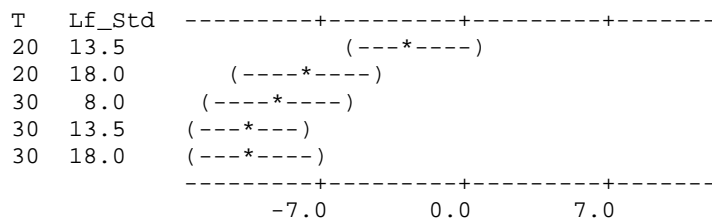
T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
20	8.0	3.714	6.972	10.2306
20	13.5	1.298	4.449	7.5997
20	18.0	-4.264	-0.655	2.9548
30	8.0	-5.477	-2.152	1.1725
30	13.5	-6.756	-3.498	-0.2394
30	18.0	-6.545	-3.287	-0.0286



T = 20

Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
20	13.5	-5.52	-2.52	0.470
20	18.0	-11.10	-7.63	-4.154
30	8.0	-12.30	-9.12	-5.948
30	13.5	-13.58	-10.47	-7.363
30	18.0	-13.37	-10.26	-7.153



T = 20

Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
20	18.0	-8.48	-5.104	-1.731
30	8.0	-9.67	-6.601	-3.535
30	13.5	-10.94	-7.947	-4.953
30	18.0	-10.73	-7.736	-4.742

T	Lf_Std	-----+-----+-----+-----
20	18.0	(----*----)
30	8.0	(----*----)
30	13.5	(----*----)
30	18.0	(----*----)
		-----+-----+-----+-----
		-7.0 0.0 7.0

T = 20

Lf_Std = 18.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
30	8.0	-5.034	-1.498	2.0383
30	13.5	-6.316	-2.843	0.6304
30	18.0	-6.105	-2.632	0.8412

T	Lf_Std	-----+-----+-----+-----
30	8.0	(----*----)
30	13.5	(----*----)
30	18.0	(----*----)
		-----+-----+-----+-----
		-7.0 0.0 7.0

T = 30

Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
30	13.5	-4.522	-1.345	1.831
30	18.0	-4.311	-1.134	2.042

T	Lf_Std	-----+-----+-----+-----
30	13.5	(----*----)
30	18.0	(----*----)
		-----+-----+-----+-----
		-7.0 0.0 7.0

T = 30

Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Untergrenze	Mitte	Obergrenze
30	18.0	-2.896	0.2108	3.317

T	Lf_Std	-----+-----+-----+-----
30	18.0	(----*----)
		-----+-----+-----+-----
		-7.0 0.0 7.0

Bonferroni-Simultantests

Antwortvariable tau

Alle paarweisen Vergleiche zwischen den Stufen von T*Lf_Std

T = 10

Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
10	13.5	0.447	1.093	0.409	1.0000
10	18.0	-2.187	1.093	-2.000	1.0000
20	8.0	4.786	1.052	4.550	0.0006
20	13.5	2.262	1.021	2.215	1.0000

20	18.0	-2.841	1.152	-2.466	0.5622
30	8.0	-4.339	1.071	-4.052	0.0039
30	13.5	-5.684	1.052	-5.404	0.0000
30	18.0	-5.473	1.052	-5.203	0.0000

T = 10

Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
10	18.0	-2.634	1.0307	-2.556	0.4434
20	8.0	4.338	0.9868	4.396	0.0011
20	13.5	1.815	0.9542	1.902	1.0000
20	18.0	-3.289	1.0932	-3.008	0.1233
30	8.0	-4.786	1.0070	-4.753	0.0003
30	13.5	-6.132	0.9868	-6.214	0.0000
30	18.0	-5.921	0.9868	-6.000	0.0000

T = 10

Lf_Std = 18.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
20	8.0	6.972	0.9868	7.066	0.0000
20	13.5	4.449	0.9542	4.662	0.0004
20	18.0	-0.655	1.0932	-0.599	1.0000
30	8.0	-2.152	1.0070	-2.137	1.0000
30	13.5	-3.498	0.9868	-3.544	0.0228
30	18.0	-3.287	0.9868	-3.331	0.0456

T = 20

Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
20	13.5	-2.52	0.9066	-2.78	0.2372
20	18.0	-7.63	1.0519	-7.25	0.0000
30	8.0	-9.12	0.9620	-9.49	0.0000
30	13.5	-10.47	0.9409	-11.13	0.0000
30	18.0	-10.26	0.9409	-10.90	0.0000

T = 20

Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
20	18.0	-5.104	1.0214	-4.997	0.0001
30	8.0	-6.601	0.9286	-7.109	0.0000
30	13.5	-7.947	0.9066	-8.765	0.0000
30	18.0	-7.736	0.9066	-8.532	0.0000

T = 20

Lf_Std = 18.0 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
30	8.0	-1.498	1.071	-1.398	1.0000
30	13.5	-2.843	1.052	-2.703	0.2972
30	18.0	-2.632	1.052	-2.502	0.5109

T = 30

Lf_Std = 8.0 subtrahiert von:

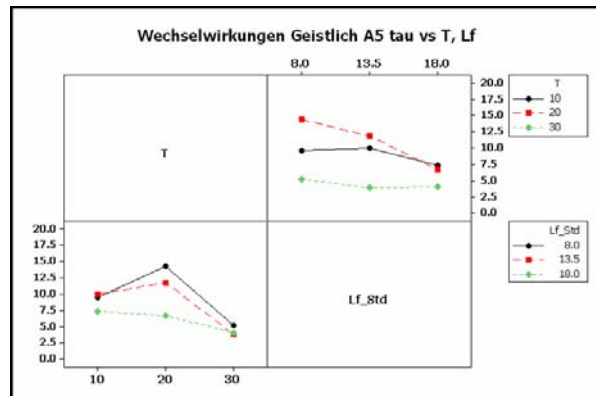
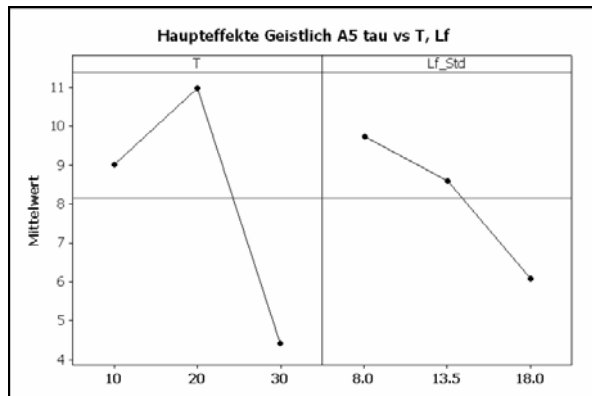
	Differenz von	SE der	Korrigierter
--	---------------	--------	--------------

T	Lf_Std	Mittelwerten	Differenz	t-Wert	p-Wert
30	13.5	-1.345	0.9620	-1.398	1.000
30	18.0	-1.134	0.9620	-1.179	1.000

T = 30

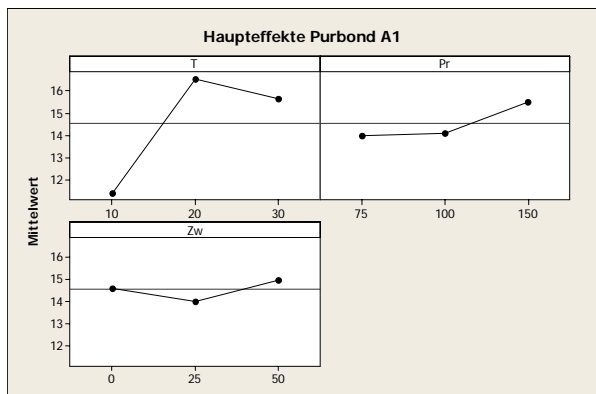
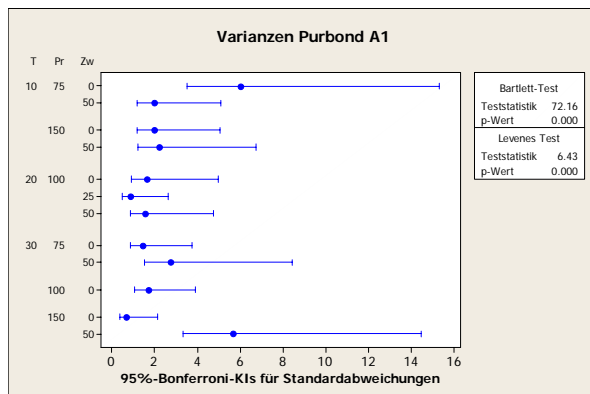
Lf_Std = 13.5 subtrahiert von:

T	Lf_Std	Differenz von Mittelwerten	SE der Differenz	t-Wert	Korrigierter p-Wert
30	18.0	0.2108	0.9409	0.2241	1.000



8.1.11 S11

Purbond A1 tau vs Zw, T, Pr - Minitab-Projektbericht



„Auf der Stufe T=20°C war die Luftfeuchte beim Verkleben zu hoch. (52%).“

Faktor	Typ	Stufen	Werte
T	fest	3	10; 20; 30
Pr	fest	3	75; 100; 150
Zw	fest	3	0; 25; 50

Varianzanalyse für taumax unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
T	2	429.70	336.92	168.46	16.68	0.000
Pr	2	47.68	43.94	21.97	2.17	0.119
Zw	2	6.95	6.95	3.48	0.34	0.710
Fehler	103	1040.55	1040.55	10.10		
Gesamt	109	1524.88				

S = 3.17842 R-Qd = 31.76% R-Qd(kor) = 27.79%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	14.5369	0.4484	32.42	0.000

T				
10	-3.1277	0.6496	-4.82	0.000
20	2.0133	0.8764	2.30	0.024
Pr				
75	-0.5317	0.5216	-1.02	0.310
100	-0.4231	0.7408	-0.57	0.569
Zw				
0	0.0618	0.5682	0.11	0.914
25	-0.5258	0.9175	-0.57	0.568

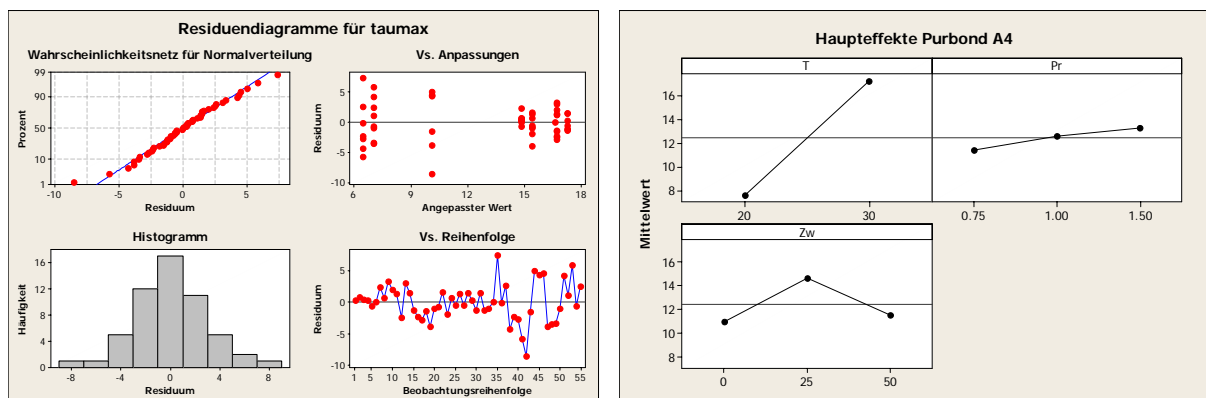
Ungewöhnliche Beobachtungen für taumax

Beob	taumax	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
1	2.7300	10.9392	0.6960	-8.2092	-2.65 R
2	1.6800	10.9392	0.6960	-9.2592	-2.99 R
9	18.2100	10.9392	0.6960	7.2708	2.34 R
66	10.7300	17.0703	0.7239	-6.3403	-2.05 R
68	10.3800	17.0703	0.7239	-6.6903	-2.16 R
69	6.5100	17.0703	0.7239	-10.5603	-3.41 R
73	10.0500	17.0703	0.7239	-7.0203	-2.27 R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

8.1.12 S12

Purbond A4 tau vs Zw, T, Pr - Minitab-Projektbericht



Allgemeines lineares Modell: taumax im Vergleich zu T; Pr; Zw

Faktor	Typ	Stufen	Werte
T	fest	2	20; 30
Pr	fest	3	0.75; 1.00; 1.50
Zw	fest	3	0; 25; 50

Varianzanalyse für taumax unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
T	1	911.12	85.21	85.21	9.16	0.004
Pr	2	27.52	28.65	14.33	1.54	0.224
Zw	2	52.45	52.45	26.22	2.82	0.069
Fehler	49	455.64	455.64	9.30		
Gesamt	54	1446.73				

S = 3.04940 R-Qd = 68.51% R-Qd(kor) = 65.29%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	12.4715	0.7629	16.35	0.000
T				

20	-4.808	1.588	-3.03	0.004
Pr				
0.75	-1.025	1.169	-0.88	0.385
1.00	0.183	2.088	0.09	0.930
Zw				
0	-1.4090	0.6679	-2.11	0.040
25	2.2615	0.9822	2.30	0.026

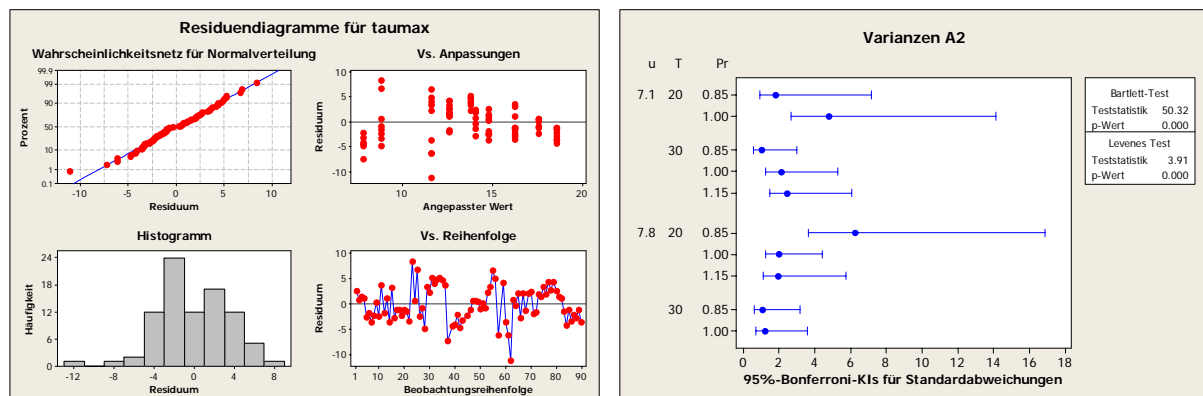
Ungewöhnliche Beobachtungen für taumax

Beob	taumax	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
34	16.6100	16.6100	3.0494	-0.0000	* X
35	13.8200	6.4379	0.9182	7.3821	2.54 R
42	1.6000	10.1083	1.2449	-8.5083	-3.06 R
53	12.8300	6.9943	0.8893	5.8357	2.00 R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.
X kennzeichnet eine Beobachtung, deren X-Wert einen großen Einfluss hat.

8.1.13 S13

Purbond A2 tau vs u, T, Pr - Minitab-Projektbericht



Faktor	Typ	Stufen	Werte
u	fest	2	7.12997; 7.80500
T	fest	2	20; 30
Pr	fest	3	0.85; 1.00; 1.15

Varianzanalyse für taumax unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
u	1	70.00	279.79	279.79	22.27	0.000
T	1	702.34	699.49	699.49	55.67	0.000
Pr	2	67.62	67.62	33.81	2.69	0.074
Fehler	82	1030.31	1030.31	12.56		
Gesamt	86	1870.27				

S = 3.54468 R-Qd = 44.91% R-Qd(kor) = 42.22%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	13.8462	0.3994	34.66	0.000
u				
7.12997	-1.8926	0.4011	-4.72	0.000
T				
20	-2.9880	0.4005	-7.46	0.000
Pr				
0.85	-1.1509	0.5437	-2.12	0.037
1.00	-0.1362	0.5202	-0.26	0.794

Ungewöhnliche Beobachtungen für taumax

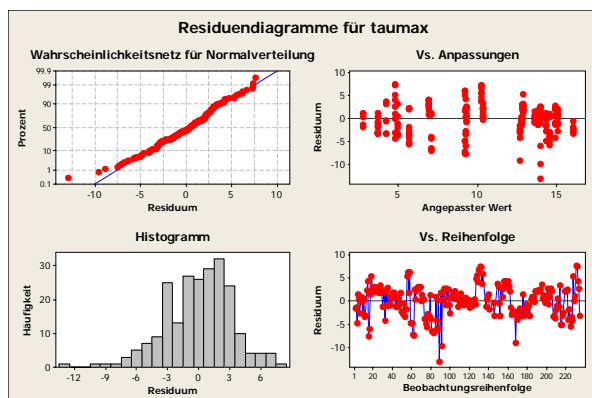
Beob	taumax	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
23	17.2100	8.8294	0.8672	8.3806	2.44 R
37	0.5300	7.8146	0.9393	-7.2846	-2.13 R
62	0.4900	11.5999	0.7841	-11.1099	-3.21 R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

8.1.14 S14

Geistlich A5 tau vs u, T, Pr, Zw - Minitab-Projektbericht

Allgemeines lineares Modell: taumax im Vergleich zu u; T; Pr; Zw



Faktor	Typ	Stufen	Werte
u	fest	7	7.1300; 7.8050; 7.9455; 13.2772; 13.3923; 13.5000; 13.6006
T	fest	3	10; 20; 30
Pr	fest	5	0.75; 0.85; 1.00; 1.15; 1.50
Zw	fest	3	0; 25; 50

Varianzanalyse für taumax unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
u	6	2274.23	784.76	130.79	11.61	0.000
T	2	12.90	68.99	34.50	3.06	0.049
Pr	4	698.41	634.25	158.56	14.08	0.000
Zw	2	536.96	536.96	268.48	23.84	0.000
Fehler	212	2387.88	2387.88	11.26		
Gesamt	226	5910.39				

S = 3.35613 R-Qd = 59.60% R-Qd(kor) = 56.93%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	10.1728	0.5128	19.84	0.000
u				
7.1300	1.0290	0.9209	1.12	0.265
7.8050	0.3428	0.8839	0.39	0.699
7.9455	-5.689	1.144	-4.97	0.000
13.2772	5.051	1.869	2.70	0.007
13.3923	-4.2302	0.8875	-4.77	0.000
13.5000	1.655	1.066	1.55	0.122
T				
10	-0.478	1.369	-0.35	0.727
20	-0.4535	0.7810	-0.58	0.562
Pr				

0.75	-4.7093	0.7904	-5.96	0.000
0.85	0.1558	0.6619	0.24	0.814
1.00	1.9091	0.4684	4.08	0.000
1.15	1.6150	0.6579	2.45	0.015
Zw				
0	-3.1193	0.4688	-6.65	0.000
25	1.9659	0.3973	4.95	0.000

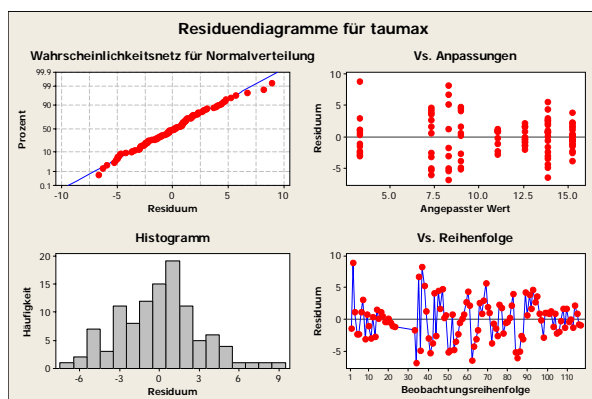
Ungewöhnliche Beobachtungen für taumax

Beob	taumax	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
15	1.6700	9.2439	0.8187	-7.5739	-2.33 R
61	2.0300	9.1695	0.8113	-7.1395	-2.19 R
62	1.7900	9.1695	0.8113	-7.3795	-2.27 R
83	0.2700	7.0985	0.8499	-6.8285	-2.10 R
84	0.6000	7.0985	0.8499	-6.4985	-2.00 R
89	0.9900	13.9371	0.7139	-12.9471	-3.95 R
91	4.2900	13.9371	0.7139	-9.6471	-2.94 R
130	16.9100	10.2367	0.8434	6.6733	2.05 R
131	17.5900	10.2367	0.8434	7.3533	2.26 R
132	17.4800	10.2367	0.8434	7.2433	2.23 R
137	1.5700	2.7960	1.5009	-1.2260	-0.41 X
138	3.2300	2.7960	1.5009	0.4340	0.14 X
139	3.9700	2.7960	1.5009	1.1740	0.39 X
140	4.1800	2.7960	1.5009	1.3840	0.46 X
141	1.0300	2.7960	1.5009	-1.7660	-0.59 X
168	3.7200	12.6564	0.9001	-8.9364	-2.76 R
231	12.4300	4.7840	0.9764	7.6460	2.38 R
232	12.1500	4.7840	0.9764	7.3660	2.29 R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.
X kennzeichnet eine Beobachtung, deren X-Wert einen großen Einfluss hat.

8.1.15 S15

Geistlich A8 tau vs u, T, Pr, Zw - Minitab-Projektbericht



Allgemeines lineares Modell: taumax im Vergleich zu u; Pr; Zw

Faktor	Typ	Stufen	Werte
u	fest	5	6.5866; 7.9455; 8.2761; 13.5000; 13.6006
Pr	fest	3	0.75; 1.00; 1.50
Zw	fest	3	0; 25; 50

Varianzanalyse für taumax unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
u	4	1288.49	1291.12	322.78	31.95	0.000

```

Pr      2    150.72    77.39    38.69    3.83    0.025
Zw      2    192.56    192.56    96.28    9.53    0.000
Fehler  99   1000.09   1000.09    10.10
Gesamt  107   2631.85

```

S = 3.17835 R-Qd = 62.00% R-Qd(kor) = 58.93%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	12.6487	0.9171	13.79	0.000
u				
6.5866	-6.6675	0.8999	-7.41	0.000
7.9455	5.3021	0.7868	6.74	0.000
8.2761	-1.6585	0.7537	-2.20	0.030
13.5000	1.940	1.296	1.50	0.138
Pr				
0.75	-2.697	1.030	-2.62	0.010
1.00	1.0197	0.6654	1.53	0.129
Zw				
0	-3.7132	0.8505	-4.37	0.000
25	1.8571	0.8282	2.24	0.027

Ungewöhnliche Beobachtungen für taumax

Beob	taumax	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
2	12.2200	3.2877	0.8815	8.9323	2.93 R
34	1.5600	8.2967	1.0594	-6.7367	-2.25 R
35	15.0500	8.2967	1.0594	6.7533	2.25 R
37	16.5300	8.2967	1.0594	8.2333	2.75 R
62	7.5200	13.8660	1.0051	-6.3460	-2.10 R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

Allgemeines lineares Modell: taumax im Vergleich zu u_gerundet; Pr; ...

Faktor	Typ	Stufen	Werte
u_gerundet	fest	3	7.0; 8.0; 13.5
Pr	fest	3	0.75; 1.00; 1.50
Zw	fest	3	0; 25; 50
T	fest	3	10; 20; 30

Varianzanalyse für taumax unter Verwendung von korrigierter SS für Tests

Quelle	DF	Seq SS	Kor SS	Kor MS	F	p
u_gerundet	2	973.27	425.75	212.87	21.03	0.000
Pr	2	223.67	172.87	86.44	8.54	0.000
Zw	2	18.93	260.13	130.06	12.85	0.000
T	2	414.08	414.08	207.04	20.46	0.000
Fehler	99	1001.91	1001.91	10.12		
Gesamt	107	2631.85				

S = 3.18125 R-Qd = 61.93% R-Qd(kor) = 58.86%

Term	Koef	SE Koef	t	p
Konstante	15.271	1.370	11.14	0.000
u_gerundet				
7.0	-4.2454	0.7636	-5.56	0.000
8.0	0.5224	0.6346	0.82	0.412
Pr				
0.75	-2.9942	0.7617	-3.93	0.000
1.00	0.9393	0.6390	1.47	0.145
Zw				
0	-3.8740	0.7641	-5.07	0.000
25	1.9375	0.8075	2.40	0.018
T				
10	2.4419	0.7958	3.07	0.003

20 -4.8036 0.7518 -6.39 0.000

Ungewöhnliche Beobachtungen für taumax

Beob	taumax	Anpassung	SE Anpassung	Residuum	Std. Resid.
2	12.2200	3.2877	0.8823	8.9323	2.92 R
34	1.5600	8.0555	0.8987	-6.4955	-2.13 R
35	15.0500	8.0555	0.8987	6.9945	2.29 R
37	16.5300	8.0555	0.8987	8.4745	2.78 R
62	7.5200	13.8660	1.0060	-6.3460	-2.10 R

R kennzeichnet eine Beobachtung mit einem großen standardisierten Residuum.

8.1.16 S16

Projektbericht SAS Purbond - Geistlich

Purbond

Kovarianzanalyse mit dem Datensatz Purbondmittelwerte
KI ot zw werden als Klassenvariablen aufgefasst

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
KI	4	A1 A2 A3 A4
oT	4	4 30 50 70
Zw	3	0 25 50

Number of Observations Read	72
Number of Observations Used	72

The GLM Procedure

Dependent Variable: tau

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	594.393266	66.043696	5.59	<.0001
Error	62	732.934725	11.821528		
Corrected Total	71	1327.327992			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	tau Mean
0.447812	30.36545	3.438245	11.32289

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
KI	3	160.7993735	53.5997912	4.53	0.0061
Zw	2	12.5225052	6.2612526	0.53	0.5915
T	1	33.2627356	33.2627356	2.81	0.0985
Pr	1	74.8727804	74.8727804	6.33	0.0144
Lf__u_	1	0.3010871	0.3010871	0.03	0.8737
p	1	0.7827956	0.7827956	0.07	0.7978

Schätzung der Koeffizienten im Model

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	1.278284563 B	4.09386103	0.31	0.7559
KI A1	1.912951731 B	0.97369744	1.96	0.0539
KI A2	2.857012836 B	1.55809251	1.83	0.0715
KI A3	-2.646021934 B	1.76234458	-1.50	0.1383
KI A4	0.000000000 B	.	.	.
Zw 0	-1.408859605 B	1.37183642	-1.03	0.3084
Zw 25	-0.701540126 B	3.65421890	-0.19	0.8484
Zw 50	0.000000000 B	.	.	.

T	0.264506471	0.15768636	1.68	0.0985
Pr	4.046565594	1.60790879	2.52	0.0144
Lf__u_	-0.048592515	0.30448092	-0.16	0.8737
p	0.000506229	0.00196725	0.26	0.7978

Die Variable KL führt zu signifikant verschiedenen Achsenabschnitten ($A3 < A4 < A1 < A2$).
Einzig die Variable Pr ergibt eine signifikante Regression (tau steigt wenn Pr steigt).

Die Residuen weichen nicht signifikant von der Normalverteilung ab. Die Anpassung, mit einem Bestimmtheitsmass von 0.45, ist zufriedenstellend.

Geistlich

Kovarianzanalyse mit dem Datensatz Geistlichmittel -
kl ot zw werden als Klassenvariablen aufgefasst

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
KL	3	A5 A6 A8
oT	3	8 15 90
Zw	3	0 25 50

Number of Observations Read	62
Number of Observations Used	61

The GLM Procedure

Dependent Variable: tau

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	551.833302	68.979163	6.79	<.0001
Error	52	528.394245	10.161428		
Corrected Total	60	1080.227547			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	tau Mean
0.510849	29.61605	3.187699	10.76342

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
KL	2	50.2511646	25.1255823	2.47	0.0942
Zw	2	222.5638468	111.2819234	10.95	0.0001
T	1	6.1647123	6.1647123	0.61	0.4396
Pr	1	26.1276720	26.1276720	2.57	0.1149
Lf__u_	1	0.0580127	0.0580127	0.01	0.9401
p	1	11.7092472	11.7092472	1.15	0.2880

Schätzungen der Koeffizienten im Modell

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	11.01428138	3.90209051	2.82	0.0067
KL A5	-2.28967358	1.08669782	-2.11	0.0400
KL A6	-1.06833591	1.41920499	-0.75	0.4550
KL A8	0.00000000	.	.	.
Zw 0	-4.68674099	1.21992585	-3.84	0.0003
Zw 25	0.33397361	1.37116453	0.24	0.8085
Zw 50	0.00000000	.	.	.
T	0.10425065	0.13384426	0.78	0.4396
Pr	3.70479168	2.31041930	1.60	0.1149
Lf__u_	0.01429902	0.18924402	0.08	0.9401
p	-0.00160826	0.00149820	-1.07	0.2880

Einzig die Klassenvariable zw ist signifikant ($0 < 25 = 50$).

Die Residuen weichen nicht signifikant von der Normalverteilung ab. Die Anpassung, mit einem Bestimmtheitsmass von 0.51, ist zufriedenstellend.

8.1.17 S17

Fichte_Buche tau und Faserbruchanteil - Minitab-Projektbericht

Ergebnisse für: Fichte_Buche

Deskriptive Statistik: Tau

Ergebnisse für KI = A2

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz
Tau	Buche	30	2	31.9149	14.03	1.03	5.65	31.90
	Fichte	62	0	65.9574	9.891	0.245	1.927	3.713

Variable	Holzart	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefe
Tau	Buche	40.26	0.53	12.41	16.34	17.95	19.03	-1.32
	Fichte	19.48	4.500	8.678	9.985	11.247	13.680	-0.29

Variable	Holzart	Kurtosis
Tau	Buche	0.29
	Fichte	-0.24

Ergebnisse für KI = A3

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz
Tau	Buche	20	8	31.25	6.40	1.28	5.72	32.70
	Fichte	36	0	56.25	8.263	0.619	3.712	13.782

Variable	Holzart	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefe
Tau	Buche	89.35	0.32	1.36	2.79	12.74	14.84	0.45
	Fichte	44.93	0.950	5.215	9.630	11.035	13.970	-0.62

Variable	Holzart	Kurtosis
Tau	Buche	-1.82
	Fichte	-0.77

Ergebnisse für KI = A5

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz
Tau	Buche	45	1	41.2844	12.237	0.808	5.422	29.400
	Fichte	56	7	51.3761	7.027	0.556	4.157	17.283

Variable	Holzart	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefe
Tau	Buche	44.31	0.270	9.720	14.690	15.625	18.230	-1.24
	Fichte	59.16	0.340	3.185	7.590	10.653	13.270	-0.16

Variable	Holzart	Kurtosis
Tau	Buche	0.01
	Fichte	-1.47

Ergebnisse für KI = A6

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw	Varianz
Tau	Buche	28	0	42.4242	9.23	1.20	6.35	40.30

	Fichte	38	0	57.5758	8.792	0.596	3.676	13.513
Variable	Holzart	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Schiefe
Tau	Buche	68.80	0.26	2.07	11.63	14.89	18.48	-0.18
	Fichte	41.81	0.410	7.270	9.655	11.548	13.340	-1.04
Variable	Holzart	Kurtosis						
Tau	Buche	-1.69						
	Fichte	0.22						

Deskriptive Statistik: Holzfaserbelag

Ergebnisse für KI = A2

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw
Holzfaserbelag	Buche	32	0	34.0426	0.4156	0.0723	0.4089
	Fichte	62	0	65.9574	0.7306	0.0326	0.2565
Variable	Holzart	Varianz	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
Holzfaserbelag	Buche	0.1672	98.37	0.0000	0.0000	0.3500	0.8000
	Fichte	0.0658	35.10	0.1000	0.5750	0.7500	1.0000
Variable	Holzart	Maximum	Schiefe	Kurtosis			
Holzfaserbelag	Buche	1.0000	0.22	-1.74			
	Fichte	1.0000	-0.72	-0.32			

Ergebnisse für KI = A3

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw
Holzfaserbelag	Buche	28	0	43.75	0.0643	0.0248	0.1311
	Fichte	36	0	56.25	0.5972	0.0713	0.4279
Variable	Holzart	Varianz	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
Holzfaserbelag	Buche	0.0172	203.98	0.0000	0.0000	0.0000	0.0750
	Fichte	0.1831	71.66	0.0000	0.0250	0.8000	1.0000
Variable	Holzart	Maximum	Schiefe	Kurtosis			
Holzfaserbelag	Buche	0.5000	2.11	3.83			
	Fichte	1.0000	-0.54	-1.59			

Ergebnisse für KI = A5

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw
Holzfaserbelag	Buche	46	0	42.2018	0.2130	0.0474	0.3215
	Fichte	63	0	57.7982	0.3206	0.0470	0.3734
Variable	Holzart	Varianz	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
Holzfaserbelag	Buche	0.1034	150.92	0.0000	0.0000	0.1000	0.2250
	Fichte	0.1394	116.45	0.0000	0.0000	0.1000	0.7000
Variable	Holzart	Maximum	Schiefe	Kurtosis			
Holzfaserbelag	Buche	1.0000	1.72	1.65			
	Fichte	1.0000	0.68	-1.21			

Ergebnisse für KI = A6

Variable	Holzart	N	N*	Prozent	Mittelwert	SE des Mittelwerts	StdAbw
Holzfaserbelag	Buche	28	0	42.4242	0.0857	0.0384	0.2031
	Fichte	38	0	57.5758	0.5342	0.0693	0.4270

Variable	Holzart	Varianz	KoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3
Holzfaserbelag	Buche	0.0413	237.01	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Fichte	0.1823	79.93	0.0000	0.0000	0.6000	1.0000

Variable	Holzart	Maximum	Schiefte	Kurtosis
Holzfaserbelag	Buche	0.9000	2.89	9.26
	Fichte	1.0000	-0.20	-1.76

9 Anhang 3

9.1 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1 Mikrostruktur des Holzes, links Buche (*Fagus sylvatica* L.) als zerstreutporiges Laubholz und rechts Föhre (*Pinus sylvestris* L.) als Vertreterin der Nadelhölzer. Links im Bild jeweils der Tangential-, rechts der Radial- und oben der Querschnitt. 12
- Abbildung 2 oben links Darstellung der Mechanismen der Wassereinlagerung in Holz, unten zwei Zellulosemoleküle mit Wasserstoffbrücken innerhalb und zwischen den Molekülen (kristalliner Bereich) und oben rechts die vereinfachte Darstellung eines amorphen Bereichs zwischen zwei kristallinen Bereichen einer Fibrille. 13
- Abbildung 3 Darstellung der verschiedenen Bindungskräfte in und zwischen Molekülen und Ionen. Homöopolar meint eine kovalente und heteropolar eine Ionenbindung. 15
- Abbildung 4 Grenzflächenspannungen $\gamma_{s/g}$ (fest/gasförmig), $\gamma_{s/lq}$ (fest/flüssig) und die Oberflächenspannung γ_{lq} (flüssig) und der Randwinkel θ (ϑ). γ ist eine Linienspannung [N/m]. 16
- Abbildung 5 Polyaddition eines linearen Polyurethans aus Diisocyanat und Diol. 17
- Abbildung 6 Darstellung der verschiedenen Polyurethan-Klebstoffe. 18
- Abbildung 7 Reaktion eines 1K PUR Klebstoffs unter Einwirkung von Wasser (H_2O) und Abspaltung von Kohlendioxyd (CO_2). 19
- Abbildung 8 Isomere und Homologe des MDI. 20
- Abbildung 9 Eindringtiefe von PVAc (Miracol), UF (Placol) und 1K PUR (Mirapur). 21
- Abbildung 10 Links schematische Darstellung der Prüfkörperherstellung. Das Brett für die Prüfkörper wird mittig getrennt und überschlagen zum Verkleben. Rechts Prinzip der Prüfung mit dem Kräftepaar F (F_{max}) und dem Resultat Bruchscherspannung τ_{max} (F_{max}/A). 25
- Abbildung 11 links Spannungsverteilung mit ideal steifen Fügeteilen, rechts unter Berücksichtigung einer elastischen Dehnung der Fügeteile. 26
- Abbildung 12 Links Normal- und Schubspannungsverteilung in einem Prüfkörper nach DIN EN 302-1:2004 bei 1120N (elastischer e) und 1870N (maximaler m) Belastung. Rechts Drehbewegung im Bereich der Überlappung (Zugrichtung senkrecht). Das Bild wurde unten an der Klebfuge zusammengefügt. Blau ist unbelastet, rot belastet. 28

- Abbildung 13 Links schematische Zugscherprobe in belastetem Zustand. Die Klebstoffuge ist überproportional dargestellt, unten mit der Position der Messmarken. Rechts unten die Ansicht auf der Bildschirmausgabe des Videoextensometers (mit Histogramm). Rechts oben Darstellung der Gleitung (Schubverformung) nach *Habenicht*. 29
- Abbildung 14 Schematische Darstellung des ebenen Verzerrungszustands. 30
- Abbildung 15 Die Videoextensometermessung und die Verzerrungsmessung mit Vic 2D wurde mit Blickrichtung auf die Klebefuge von der jeweils gegenüberliegenden Seite durchgeführt. Es muss wegen der Heterogenität der Materialien eine unterschiedliches Verhalten auf der jeweiligen Seite erwartet werden, die Anordnung musste jedoch so gewählt werden, weil beide Messgeräte normal zur ausgewerteten Fläche stehen müssen. 31
- Abbildung 16 gutes Pixel/Speckle Pattern Verhältnis und daraus resultierende Grauwerte. 32
- Abbildung 17 Darstellung der Dehnung e_{xx} in Zugrichtung, die roten vertikalen Bereiche sind schon im Bereich der Nut des Probenkörpers. Schön zu sehen ist die leicht diagonale Verteilung der Dehnung und die Maxima links und rechts an der Fuge. 33
- Abbildung 18 Darstellung der Differenz verschiedener Auswerteparameter. Es wurden jeweils zwei Auswertezellen in die Region mit der höchsten Dehnung e_{xx} (Zugrichtung) gelegt. 34
- Abbildung 19 Mobile Laborpresse der Firma Purbond. Der maximale spezifische Druck bezieht sich auf die gesamte Pressfläche. 35
- Abbildung 20 Links die improvisierte Presse mit Kraftmessdose und Ausgabe des Pressdrucks auf dem PC-Bildschirm (Catman) in der Klimakammer. Rechts auf der Aussenseite der Klimakammer die Gleichstromspeisung für die Kraftmessdose, der Spider 8 Messverstärker und das PC-Laufwerk. 36
- Abbildung 21 Typischer Druckverlauf während dem Pressen. Bei längeren Presszeiten konnte mit einer weiteren Stufe nach unten gerechnet werden. 36
- Abbildung 22 Sorptionsisothermen von unbehandeltem Buchenholz bei 25, 50, 75 und 100°C 40
- Abbildung 23 Oben Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka Fichte und unten daraus abgeleitete Differenzen für Ausgleichsklimaten auf verschiedenen Temperaturstufen für Buche (Desorption). 42
- Abbildung 24 Versuchspläne auf der Faktorstufe $u=8\%$. Links A1 und A4 (Purbond), rechts A5 und A8 (Geistlich). 42
- Abbildung 25 Versuchspläne auf der Faktorstufe $u=13.5\%$. Links A1, A4 (Purbond) und A5 (Geistlich), rechts A8 (Geistlich). 43
- Abbildung 26 links Box Behnen Versuchsplan für drei Faktoren (ohne zentralen Punkt), rechts die Anzahl von Durchläufen, generiert von Minitab 15. 45
- Abbildung 27 Erreichte Holzfeuchte (prozentuale Häufigkeit) u beim Fügen der Versuchsreihe 1. 49
- Abbildung 28 Holzfeuchten (absolute Häufigkeit) u beim Fügen und L_f beim Prüfen. $u=0$ in der Legende bedeutet die entsprechende Reihe ist L_f , die Farben sind für u die gleichen wie oben. 50
- Abbildung 29 Holzfeuchte (prozentuale Häufigkeit) u beim Fügen und L_f beim Prüfen für die Versuchsreihe 2. 50
- Abbildung 30 Die Holzfeuchte beim Kleben u und die Temperatur T scheinen sich beide in Richtung einer Verbreiterung der Fuge auszuwirken. Das schnellere System

reagiert auf Zusatzwasser Zw, das Langsame scheint indifferent. Die Presszeit Pr ist 1. 51

Abbildung 31 Einzelmessungen der Fugendicke gegen Bruchscherkraft tau und Bruchverschiebung L-Fmax. 52

Abbildung 32 (x10) A5 mit Zusatzwasser $Zw=50g/m^2$ bei $20^\circ C$. Die Klebflächenlage ist tangential/radial. Die Fugendicke ist $50\mu m$. Die Fuge scheint nicht homogen, es kann nicht entschieden werden, ob unter der Klebstoffoberfläche Blasen sind. 52

Abbildung 33 (x10) A8 bei $u=8\%$ und $30^\circ C$, Klebfläche radial. Die Fugendicke ist $150\mu m$. Deutliche Blasenbildung in der Fugenmitte. Rechts unten Eindringen bis ca. $200\mu m$. 53

Abbildung 34 (x10) A5 bei $20^\circ C$ ohne Zusatzwasser, $Pr=0.75$, Klebfläche radial. Die Fugendicke ist $400\mu m$. Starke Blasenbildung über die ganze Fugenbreite. 53

Abbildung 35 Haupteffekte für Purbond und Konfidenzintervalle der Standardabweichungen. 53

Abbildung 36 Einzelmessungen der Fugendicke gegen Bruchscherkraft tau und Bruchverschiebung L-Fmax. 54

Abbildung 37 (x10) Purbond A1 bei $30^\circ C$ und $50g/m^2$ Zusatzwasser, $Pr=0.75$, tangentielle Klebfläche. Die Fugendicke ist $80\mu m$. Ausgeprägt homogene Struktur der Klebstoffschicht ohne Blasenbildung, wenig Eindringen. 54

Abbildung 38 (x10) Die gleichen Faktorstufen wie oben, die Klebfläche wieder beinahe tangential, aber die Presszeit Pr ist 1.5. Der Klebstoff füllt die Hohlräume in und neben der Fuge. Eine eigentliche Fugendicke ist nicht mehr auszumachen, da immer wieder Zellmaterial der Fügeteile scheinbar nahtlos ineinander übergeht. Es wird keine Blasenbildung im Klebstoff beobachtet. 55

Abbildung 39 (x10) A4 bei $T=10^\circ C$, beinahe radiale Klebfläche. Die Fugendicke ist $240\mu m$. Die beiden Fügeteile sind kaum verbunden, eine eigentliche Blasenbildung kann nicht beobachtet werden. Ein tiefes, unvollständiges Eindringen ist zu beobachten. 55

Abbildung 40 (x200) Klebstoff A1, $u=7.1\%$, $Pr=1.15$. Die Blasenbildung ist oben geringer, d.h. sie sind kleiner und werden kaum beobachtet. Gleichzeitig nimmt die Fugendicke nach unten zu, oben wird mehr Eindringen beobachtet ($>200\mu m$, einseitig). Die Loslösung des Klebstoffs unten an den Zellwänden der Gefässe ist wahrscheinlich durch das Mikrotom verursacht worden, trotzdem könnte dies auch ein Hinweis auf eine verminderte Adhäsion sein. 56

Abbildung 41 (x200) Klebstoff A6, $u=7.1\%$, $Pr=0.85$. Der Klebstoff erscheint bei beiden Proben gekörnt. Wiederum sind unten grosse und zahlreiche Hohlräume zu sehen. Die Fuge ist unten deutlich dicker. Bei starker Blasenbildung nimmt die reale Bruchspannung mit abnehmender Übertragungsfläche für die Scherkraft zu. 57

Abbildung 42 (x8) Bruchbilder der Probe von Abbildung 41, links der gute Wert mit Faserbruch, der Klebstoff ist kaum sichtbar, dennoch ist Blasenbildung deutlich, rechts sind die Blasen deutlich grösser, die glänzenden Stellen haben keinen Bruch erlitten. 57

Abbildung 43 (x200) Klebstoff A6, $u=7.1\%$, $T=30^\circ C$, drei Aufnahmen aus einem Bereich $<10mm$. Von links mit fast keiner Verbindung bis rechts alternierend Blasen mit guter Verbindung. Die Verbindung an der Bruchfläche war eher besser als der dargestellte Bereich. Der fehlende Spannungsanstieg zwischen 1 und 2% Dehnung fällt auf und könnte ein Ausdruck der heterogenen Struktur der Klebfuge sein. 58

Abbildung 44 (x200) Klebstoff A6, $u=7.1\%$, $T=30^\circ C$. Es besteht im betrachteten Bereich zwischen den Fügeteilen nur eine Verbindung über verfilzte Klebstofffäden. 58

- Abbildung 45 (x400) Links werden in der offenen Fuge die sonst schlecht sichtbaren Polyamidfäden gut sichtbar. Rechts (nicht gesputtert) sind die angeschnittenen PA-Fäden gut erkennbar. Der Füllstoff wird als helle Flecken sichtbar. 59
- Abbildung 46 EDX-Mapping mit den Elementen C, O, Na, Al, Si, S, Cl, K und Ca. Das K steht für die K-Schale des Atoms, von dem der Peak stammt. 60
- Abbildung 47 (Anm.: Die Verbindungslinie ist der Mittelwert, die Symbole in der Interquartilbox der Median) Die Bruchflächen zeigten die erwarteten Bruchbilder. Das Maximum bei $u=7.8\%$ entspricht den Literaturangaben. Die Verschiebung liegt bei allen Behandlungen etwa im gleichen Bereich. 61
- Abbildung 48 Die Purbond Klebstoffe über den Feuchtebereich $6.5\% < u < 19\%$. Die rot eingefassten Boxen wurden unter zu hoher Luftfeuchte verklebt. A4 hat auf der Stufe $u=6.6\%$ vollständig versagt und taucht somit nicht auf. Auf den Stufen $u=7.1\%$ und $u=7.8\%$ (Versuchsreihe 2) wurde A4 nicht geprüft. 62
- Abbildung 49 Die Geistlich Klebstoffe über den Feuchtebereich $6.5\% < u < 19\%$. Die rot eingefassten Boxen wurden unter zu hoher Luftfeuchte verklebt. Schwarz ist $Pr=1.15$, grau ist $Pr=0.85$, diese beiden Serien wurden genommen, da der D-optimale Versuchsplan $Pr=1$ nicht enthielt (Stufen $u=7.13\%$ und $u=7.80\%$, Versuchsreihe 2, A8 wurde nicht geprüft). 62
- Abbildung 50 Links 3σ -Konfidenzintervalle für den Mittelwert, rechts die Konfidenzintervalle für die Standardabweichungen. Rot wiederum das zu feuchte Umgebungsklima beim Fügen. Die Bruchscherspannungen auf $u=7.8\%$ und $u=17.1\%$ fallen deutlich nach unten ab und haben die grössten Varianzen. 63
- Abbildung 51 Regressionsgerade für A5 und Residuendiagramme. Die Residuen gegen die Beobachtungsreihenfolge könnten auf einen Trend hinweisen. Die Anpassung an die Normalverteilung ist für die Daten vor der Transformation. 65
- Abbildung 52 Purbond A1, Einfluss des Partialdrucks p [Pa] auf den Stufen $6.5\% \leq u \leq 7.2\%$ links und $7.8\% \leq u \leq 8.3\%$ rechts. Die Gleichheit der Varianzen wird rechts abgelehnt. 66
- Abbildung 53 Geistlich A5, Einfluss des Partialdrucks p [Pa] auf den Stufen $6.5\% \leq u \leq 7.2\%$ links und $7.8\% \leq u \leq 8.3\%$ rechts. Links ist $Pr=1.15$ für $p=584$ und rechts ist $Pr=0.85$ für $p=818$. 67
- Abbildung 54 Scherfestigkeit τ von Purbond A1 gegen Lagerfolge (nach links vorne) und Temperatur (nach links hinten). Links Einzelwertdiagramm, rechts die Wirkungsfläche aus neun Mittelwerten. 69
- Abbildung 55 Purbond A1, 3σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von τ und L_{Fmax} gegen Temperatur T und Lagerfolge L_f . Die Skala für τ geht bis 22.5 N/mm^2 . 69
- Abbildung 56 Scherfestigkeit τ von Purbond A4 gegen Lagerfolge (nach links vorne) und Temperatur (nach links hinten). Links Einzelwertdiagramm, rechts die Wirkungsfläche aus neun Mittelwerten. 70
- Abbildung 57 Purbond A4, 3σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von τ und L_{Fmax} gegen Temperatur T und Lagerfolge L_f . 70
- Abbildung 58 Haupteffekte und Wechselwirkungen für Purbond A1 und A4. Die Lagerfolge $L_f(\text{std})$ wirkt stärker als die Temperatur. Die Wechselwirkungen sind ausser bei $T=20^\circ\text{C}$ und $L_f=13.5\%$ schwach. Das Maximum wird gut sichtbar in den Wechselwirkungen (rote Linie). 71
- Abbildung 59 Scherfestigkeit τ von Geistlich A5 gegen Lagerfolge (zunehmend nach rechts vorne) und Temperatur (zunehmend nach links). Links Einzelwertdiagramm, rechts die Wirkungsfläche aus neun Mittelwerten. 72

- Abbildung 60 Geistlich A5, 3σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von tau und L-Fmax gegen Temperatur T und Lagerfolge Lf. Nur zwei Gruppen liegen über dem Referenzwert von 10N/mm^2 . 72
- Abbildung 61 Geistlich A8, 3σ -Konfidenzintervalle für die Mittelwerte von tau und L-Fmax gegen Lagerfolge Lf. Nur eine Gruppe liegt über dem Referenzwert von 10N/mm^2 . 73
- Abbildung 62 Die Einzelwerte der Bruchscherspannung für Purbond A1 links und A4 rechts gegen Temperatur T (nach links) und Zusatzwasser Zw (nach vorne). Die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen vor der Prüfung ist für A4 0.3 für $T=10^\circ\text{C}$, 0.125 für $T=20^\circ\text{C}$ und 0.25 mit 25g/m^2 Zusatzwasser Zw. 74
- Abbildung 63 Purbond A1 gegen Presszeit Pr in % (nach links) und Zusatzwasser (nach vorne rechts) links bei $T=10^\circ\text{C}$ und rechts bei 30°C . 75
- Abbildung 64 Purbond A4 gegen Presszeit Pr in % (nach links) und Zusatzwasser (nach vorne rechts) links bei $T=10^\circ\text{C}$ und rechts bei 30°C . 75
- Abbildung 65 Purbond A1 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.2% mit einer Standardabweichung von 0.56. 76
- Abbildung 66 Purbond A2 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.1% mit einer Standardabweichung von 0.54. Auf der Stufe $T=20^\circ\text{C}$, $Pr=0.85$ und $u=7\%$ besteht eine Versagenswahrscheinlichkeit vor der Prüfung von 0.25, auf der Stufe $u=8\%$ 0.1. 77
- Abbildung 67 Purbond A3 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.0% mit einer Standardabweichung von 0.8. Die Versagenswahrscheinlichkeit auf der Stufe $u=7\%$ ist 77
- Abbildung 68 Purbond A4 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, T und Pr. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 0.9% mit einer Standardabweichung von 0.41. 78
- Abbildung 69 Purbond A4 Wahrscheinlichkeit für Totalversagen vor der Prüfung. 78
- Abbildung 70 Bruchverschiebungen der Purbond Klebstoffe. Links die Verteilung für alle in diesem Abschnitt behandelten Gruppen, rechts die Verteilung der Gruppen, deren untere Grenze des 3σ -KI für den Mittelwert über 10N/mm^2 liegt. 79
- Abbildung 71 Geistlich A5 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, Zw, Pr und T. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.8% mit einer Standardabweichung von 0.97. 80
- Abbildung 72 Geistlich A6 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, Zw, Pr und T. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 2.0% mit einer Standardabweichung von 0.74. 80
- Abbildung 73 Geistlich A8 3σ -KI für den Mittelwert von tau gegen u, Zw, Pr und T. Der Mittelwert für die Bruchverschiebung ist 1.29% mit einer Standardabweichung von 0.97. 81
- Abbildung 74 Versagenswahrscheinlichkeit für Geistlich A8. 81
- Abbildung 75 Bruchverschiebungen der Geistlich Klebstoffe. Links die Verteilung für alle in diesem Abschnitt behandelten Gruppen, rechts die Verteilung der Gruppen, deren untere Grenze des 3σ -KI für den Mittelwert über 10N/mm^2 liegt. 82
- Abbildung 76 Gewichtete Anteile der Faktorstufen der Kombinationen mit dem 3σ -KI oberhalb 10N/mm^2 Bruchscherspannung, nacheinander u gerundet, T, Pr, oT, Zw. 84
- Abbildung 77 Gewichtete Anteile der Faktorstufen der Kombinationen mit dem 3σ -KI oberhalb 10N/mm^2 Bruchscherspannung, nacheinander u gerundet, T, Pr, oT, Zw. 86

Abbildung 78 Verteilung des Faserbruchanteils F_{br} gegen die Bruchscherspannung τ_{max} , links die Purbond Klebstoffe, rechts die Geistlich Klebstoffe.	86
Abbildung 79 Verteilung des Faserbruchanteils F_{br} gegen die Bruchscherspannung τ_{max} für die Gruppen mit der unteren 1.96s-KI-Grenze für die Einzelwerte $>10\text{N/mm}^2$, links die Purbond Klebstoffe, rechts die Geistlich Klebstoffe.	87
Abbildung 80 Bruchscherspannung τ_{max} gegen die Verschiebung $L-F_{max}$ für die Purbond und Geistlich Klebstoffe und die Massivholzproben.	87
Abbildung 81 Bruchscherspannung τ_{max} gegen die Verschiebung $L-F_{max}$ für die Purbond und Geistlich Klebstoffe und die Massivholzproben für die Gruppen mit der unteren 3 σ -KI-Grenze für den Mittelwert oberhalb 10N/mm^2 .	88
Abbildung 82 Links die Bruchscherspannungen für Buche, rechts für Fichte.	89
Abbildung 83 Erreichte Bruchscherspannungen für jeweils links Buche und rechts Fichte mit Zusatzwasser Zw.	90
Abbildung 84 Links die Verschiebung $L-F_{max}$ gegen die Bruchscherspannung t_{max} , rechts der die Bruchscherspannung τ_{max} gegen den Holzfaserbelag. Die Kumulierung über 1 ergibt sich aus identischen Werten für die Bruchscherspannung.	90
Abbildung 85 Purbond A4. Links oben maximale Gleitung im Bereich etwas mehr als $\pm 3\text{mm}$ ab der Klebfuge. Die Breite des Bildes entspricht 10mm , d.h. dem Bereich der Überdeckung. Rechts oben 3D-Darstellung mit der Gleitung in z. Links unten die Auswertungslinien von links nach rechts 1-9 rechtwinklig zu der Klebfuge (leicht weiss sichtbar). Rechts unten das entsprechende Spannungs-Verschiebungsdiagramm.	91
Abbildung 86 Purbond A4. Links die maximale Dehnung e_{xx} – dunkleres Blau $e_{xx}=0$, rechts die maximale Dehnung e_{yy} – mittleres Grün $e_{yy}=0$.	92
Abbildung 87 Geistlich A5. Links oben maximale Gleitung im Bereich etwas mehr als $\pm 3\text{mm}$ ab der Klebfuge. Die Breite des Bildes entspricht $<10\text{mm}$, d.h. ca. dem Bereich der Überdeckung. Rechts oben 3D-Darstellung mit der Gleitung in z. Links unten die Auswertungslinien von links nach rechts 1-9 rechtwinklig zu der Klebfuge (leicht weiss sichtbar). Rechts unten das entsprechende Spannungs-Verschiebungsdiagramm.	93
Abbildung 88 Geistlich A5. Links die maximale Dehnung e_{xx} – helles Blau $e_{xx}=0$, der Bereich links unten im Bild ist wahrscheinlich mit etwas Acryl aus der Fuge überdeckt und gibt so deren Längsdehnung weiter. Rechts die maximale Dehnung e_{yy} – mittleres Blau $e_{yy}=0$.	94
Abbildung 89 Spannungs-Verschiebungsdiagramm mit angelegter Gerade für die Modulberechnung. Die Grenzen wurden bei 20% und 50% festgelegt, da die Anpassung so am besten schien.	95
Abbildung 90 Spannungs-Verschiebungsdiagramm mit angelegter Gerade für die Modulberechnung.	95
Abbildung 91 Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$ der Normalverteilung	101
Abbildung 92 Power oder Teststärke	102
Abbildung 93 Schiefe und Kurtosis (Wölbung) der Normalverteilung.	102
Abbildung 94 Wahrscheinlichkeiten für zentrale Anteile	103
Abbildung 95 Zusammenhänge zwischen verschiedenen Verteilungen.	105

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Ausgewählte physikalische, mechanische und chemische Eigenschaften von Buchen- und Fichtenholz. *	24
Tabelle 2 Versuchsmatrix Versuchsreihe 1.1	38

Tabelle 3 Klimaten in den Klimaräumen am IfB, ETH Zürich. Der Raum 1 wurde nur zur Vorklimatisierung verwendet, da der Unterschied zum Sollklima zu gross war. Auffallend sind die relativ grossen Schwankungen im Raum 3. Der anfängliche Anstieg der relativen Feuchte im hohen Feuchtebereich wurde regelmässig beobachtet und ist dem Messgerät inhärent. Die ersten 600 Werte (50h) wurden aus der Parameterberechnung entfernt. 39

Tabelle 4 Grundeinstellungen der Faktoren. Diese Faktorstufen wurden, sofern nicht anders erwähnt, als Grundwerte eingehalten. Die fehlenden Werte (-) erschliessen sich aus dem Text oben. Die offene Zeit beim Kleben ist 2.5min für ein Brett, 4min für 2 Bretter. 41

Tabelle 5 links vollständiger 2^3 Plan, rechts 2^{4-1} mit der Spalte ABC als Faktor D. 44

Tabelle 6 Versuchsumfänge bei verschiedenen Modellen. 46

Tabelle 7 Links die vollfaktorielle Designmatrix X , rechts oben die transponierte Matrix X^T , unten in der Mitte die multiplizierte Matrix $X^T X$ und die resultierende Determinante unten rechts. 47

Tabelle 8 links die unvollständige Designmatrix, in der Mitte die Behandlung 1 in die Matrix eingesetzt und rechts die resultierende Determinante. 47

Tabelle 9 Die Purbond Klebstoffe mit einer Untergrenze des 3σ -KI für den Mittelwert der Bruchscherspannung $\tau > 10\text{N/mm}^2$. $3s_MW_u$ ist die untere Grenze des $3s$ -KI und 1.96_u ist die untere Grenze eines $1.96s$ -KI für die Einzelwerte (nicht an die Verteilungen angepasst). VW ist die Versagenswahrscheinlichkeit. 83

Tabelle 10 Die Geistlich Klebstoffe mit einer Untergrenze des 3σ -KI für den Mittelwert der Bruchscherspannung $\tau > 10\text{N/mm}^2$. $3s_MW_u$ ist die untere Grenze des $3s$ -KI und 1.96_u ist die untere Grenze eines $1.96s$ -KI für die Einzelwerte (nicht an die Verteilungen angepasst). VW ist die Versagenswahrscheinlichkeit. 85