Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Abteilung Bachelor Holz
Solothurnstrasse 102
CH 2504 Biel/Bienne

PROJEKTARBEIT

im 5. Semester des Studiengangs
Bachelor of Science in Holztechnik
Vertiefungsrichtung PPM

mit dem Thema

Buche versus Robinie

Vergleich der maximalen Belastungen und qualitative Beurteilung von Buchen- und Robiniendübeln in Fenstereckverbindungen

eingereicht von

Camilla Mantovani
Nicolas Seidlitz

Betreuende Dozierende

Martin Wiederkehr
Urs Uehlinger

Projektarbeit-Nr. H / 0802 / 986 / 17 / 0

Sperrfrist: keine

Verfassende

Camilla Mantovani
Heilmannstrasse 12
CH-2500 Biel/Bienne

Nicolas Seidlitz
Weissensteinstrasse 9
CH-4500 Solothurn

Erstprüfender Dozent

Martin Wiederkehr, Dozent für Informatik, Bauphysik, Statik, Arbeitstechnik und Konstruktion

Zweitprüfender Dozent

Urs Uehlinger, Kompetenzbereichsleiter Fenster- und Fassadentechnik

Industriepartner

Eicher Holzwaren AG
Herren Beat Werfeli und Lukas Pirkheim
Schwand 68
CH-3616 Schwarzenegg

Wenger Fenster AG
Herren Michael Allenbach und Bernhard Bieri
Chrümigstrasse 32
CH-3752 Wimmis

Adresse der Hochschule

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Abteilung Bachelor Holz
Solothurnstrasse 102
CH-2504 Biel/Bienne

© 2017
CH-2500 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 Abteilung Bachelor Holz einzuholen. Bei gesperrten Arbeiten ist jegliche Art der Weiterverwendung verboten.

Abstract

Seit geraumer Zeit werden im fensterproduzierenden Gewerbe Robiniendübel in Fenstereckverbindungen verarbeitet, wodurch der konventionelle Buchendübel zunehmend an Marktwert verliert. Gründe, seien diese material- oder verarbeitungstechnischer Natur, liegen bislang noch nicht vor, obschon die Fragestellung bei den Akteuren der Fensterindustrie aktuell ist.

Vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit Eicher Holzwaren AG. Die traditionsreiche Firma aus dem Berner Oberland ist unter anderem Lieferantin von Buchendübeln aus einheimischen Beständen an Vertreter der Fensterbranche. Ziel ist es, einerseits die maximale Belastbarkeit von Fensterecken zu prüfen, deren Verbindung aus Buchen- und Robiniendübel bestehen. Da klimatische Schwankungen die Regel sind, gilt es insbesondere auch, die Fensterecken einer Wechselklimatisierung zu unterziehen. Andererseits ist von Interesse, die Ergebnisse miteinander zu vergleichen und Unterschiede auf die holzspezifischen Eigenschaften zurückzuführen. Eine Empfehlung für den Einsatz von Buchendübeln in Fenstereckverbindungen ist wünschenswert.

Zur Zielerreichung werden zwei verschiedene Prüfungen herangezogen. Die maximale Belastbarkeit wird über die Zug- und Scherprüfung der ift Richtlinie Rosenheim beurteilt. Aus den Parametern Konditionierungssart (Norm- und Zyklusklimatisierung), Dübelholzart (Buche und Robinie) und Belastungsart (Zug- und Scherbelastung) ergeben sich sechs Serien. Die Ergebnisse werden in fünf Vergleichen mithilfe von statistischen Methoden im Programm NCSS 9 ausgewertet und mithilfe namhafter Referenzen aus der Literatur der Holzwissenschaften interpretiert.

Weiter zeigt ein eigens konzipierter Versuchsaufbau zur Prüfung der Frühzugfestigkeit, wie sich die beiden Dübelarten nach einer Abbindzeit von 15 Minuten unter Zugbelastung verhalten.

Die Resultate der Zug- und Scherprüfung ergeben, dass die Fensterecken mit Robiniendübel in keinem der fünf Vergleiche signifikant besser abschneiden als diejenigen mit Buchendübel. Letztere schneiden bei Zyklusklimatisierung gar deutlich besser ab als Robiniendübel. Dieser Sachverhalt ist auf die Verfestigung des Klebstoffs bei Feuchteentzug zurückzuführen, die bei Robiniendübeln wegen ihrer Holzinhaltsstoffe gehindert wird. Die Ergebnisse aus der Prüfung der Frühzugfestigkeit lassen aufgrund von zu grosser Streuung und zu kleiner Stichprobe keine abschliessende Beurteilung zu.

Obwohl die Buchen- den Robiniendübeln in allen Fällen mindestens gleichgestellt und bei Zyklusklimatisierung sogar überlegen sind, gilt es in weiterführenden Untersuchungen, die Stichprobengrösse der Fensterecken zu erhöhen, das Bruchbild genauer zu untersuchen, die Dimension der Dübel exakt zu vermessen sowie die Holzinhaltsstoffe der Prüfkörper präzise zu ermitteln.

Vorwort

Buchen- oder Robiniendübel? Diese Frage beschäftigt die Fensterbranche seit Jahren, ohne dass je Untersuchungen durchgeführt und faktenbasierende Antworten präsentiert wurden. Seitdem der Maschinenhersteller Weinig Garantie auf seine Komplettbearbeitungsanlagen erlässt, wenn Robiniendübel in Fenstereckverbindungen verarbeitet werden, verwenden viele Fensterhersteller ausschliesslich ebendiese. Verständlich, dass Eicher Holzwaren AG, Hersteller von Holzprodukten aus lokalen Waldbeständen, diesem Sachverhalt kritisch gegenübersteht. Entsprechend breit gefächert waren auch die Fragestellungen des Industriepartners bei Anfrage einer Untersuchung an der Berner Fachhochschule, Abteilung Holz. Mit der Eingrenzung dieser Thematik wurde uns eine grosse Aufgabe zuteil. Welche der beiden Holzarten in dieser Verwendung die bessere Wahl ist, hängt letztlich von zig Parametern ab – beginnend bei den Wachstumsbedingungen und der Holzqualität über die Produktion, den Transport und die Montage der Dübel und Fensterkanteln bis zu den Einbauverhältnissen. All jenen, die uns geholfen haben, diese Aufgabe aus einem sinnvollen ersten Blickwinkel zu betrachten, möchten wir herzlich danken. Dies gilt insbesondere für die Herren Uehlinger und Wiederkehr, die sich um alle unsere Anliegen kümmerten. Weiter bedanken wir uns bei Herrn Flavien Sauser und Frau Andrea Uehlinger, die uns bei technischen Fragen zur Versuchsdurchführung unterstützten. Auch den Herren Martin Otti und Bruno Salzmann, die uns im Technologiepark mit Rat und Tat zur Seite standen, gebührt ein grosser Dank. Nicht zuletzt danken wir der Wenger Fenster AG rund um die Herren Michael Allenbach und Bernhard Bieri, die uns die Versuchsmaterialien innerhalb von kürzester Zeit zur Verfügung stellten. Allen voran sei den Herren Beat Werfeli und Lukas Pirkheim der Eicher Holzwaren AG gedankt. Sie spornten uns mit ihrem persönlichen Engagement für die nachhaltige Nutzung unserer Wälder an, der Thematik mit bestem Wissen und Gewissen auf den Grund zu gehen.

Begriffserklärung

Definitionen zu Begriffen, die in dieser Arbeit unterstrichen sind, befinden sich in *Kapitel 8.1 Glossar.*

Zur Vereinfachung der Lektüre und Abgrenzung werden vorab einige Begriffe definiert, deren Bedeutung auf Zweideutigkeit stösst oder in der Verwendung zu lang sind. In nachfolgender Arbeit trifft bei Verwendung der Abkürzungen zu jeder Zeit die volle Bezeichnung zu.

Abkürzung	Bezeichnung
Festigkeit	Aufgrund der Zweideutigkeit erfährt der Begriff eine Abgrenzung. Per Definition beschreibt eine Festigkeit immer eine flächenbezogene Kraft. Jedoch bezeichnet sie auch den Widerstand eines Prüfkörpers gegenüber einer Belastung. Letztere Bezeichnung wird verwendet.
Bu	Riffeldübel aus einheimischem Buchenholz hergestellt durch Eicher Holzwaren AG Abmessung: 8x60mm
Ro	Riffeldübel aus Robinienholz hergestellt im Ausland Abmessung: 8x60mm
Norm	Normklima Temperatur von 20°C und relative Luftfeuchtigkeit von 65%
40/90	Temperatur von 40°C und relative Luftfeuchtigkeit von 90%
40/30	Temperatur von 40°C und relative Luftfeuchtigkeit von 30%
Zyklus	Zyklusklimatisierung bestehend aus vier Klimaphasen: 1. Norm bis zur Ausgleichsfeuchtigkeit von 13±2% 2. 40/90 bis zur Ausgleichsfeuchtigkeit von ca. 20% 3. 40/30 bis zur Ausgleichsfeuchtigkeit von ca. 6% 4. Norm bis zur Ausgleichsfeuchtigkeit von 13±2%

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage 3
1.1 Abgrenzung 3
1.2 Zielsetzung 4
1.3 Hauptaufgabe 4
1.4 Nebenaufgabe 4
2 Vorbereitende Arbeiten 5
2.1 Einleitung 5
2.2 Literaturstudium 5
2.3 Vorbereitungen an den Prüfkörpern 6
2.3.1 Nummerierung der Prüfkörper und Serienbildung 6
2.3.2 Konditionierung der Prüfkörper 6
2.3.3 Übersicht der Serien 7
2.4 Holzfeuchtigkeit 7
2.4.1 Material und Methoden 7
2.4.2 Resultate 9
2.4.3 Diskussion 10
3 Zug- und Scherfestigkeit von Buchen- und Robiniendübeln 12
3.1 Einleitung 12
3.2 Material und Methoden 12
3.2.2 Vorbereitung der Prüfkörper 13
3.2.3 Maschinelle Vorbereitungen 13
3.2.4 Prüfeinrichtung 13
3.2.5 Versuchsaufbau 13
3.2.6 Methodik 14
3.2.7 Statistische Methoden 14
3.3 Resultate 15
3.3.1 Zugfestigkeit Bu/Ro Normklima 16
3.3.2 Scherfestigkeit Bu/Ro Normklima 17
3.3.3 Zugfestigkeit Bu/Ro Zyklusklima 18
3.3.4 Zugfestigkeit Bu/Bu Norm- und Zyklusklima 19
3.3.5 Zugfestigkeit Ro/Ro Norm- und Zyklusklima 20
3.4 Diskussion 21
3.4.1 Zugfestigkeit Bu/Ro Normklima 23
3.4.2 Scherfestigkeit Bu/Ro Normklima 24
3.4.3 Zugfestigkeit Bu/Ro Zyklusklima 25
3.4.4 Zugfestigkeit Bu Zyklus- und Normklima 26
3.4.5 Zugfestigkeit Ro Zyklus- und Normklima 26
3.5 Fazit 26
4 Frühzugfestigkeit von Buchen- und Robiniendübeln 27
4.1 Einleitung 27
4.2 Material und Methoden 27

4.2.1 Materialisierung der Prüfkörper 27
4.2.2 Nummerierung der Prüfkörper 27
4.2.3 Vorbereitung der Prüfkörper 28
4.2.4 Konditionierung der Prüfkörper 28
4.2.5 Maschinelle Vorbereitungen 28
4.2.6 Prüfeinrichtung 28
4.2.7 Versuchsaufbau 29
4.2.8 Methode 29
4.3 Resultate 30
4.4 Diskussion 30
5 Reflexion 31
6 Ausblick 32
7 Empfehlung 33
8 Verzeichnisse 34
8.1 Glossar 34
8.2 Literaturverzeichnis 37
8.3 Mündliche Quellen 38
8.4 Bildnachweis 38
8.5 Tabellenverzeichnis 41
8.6 Formelverzeichnis 41
Eidesstattliche Erklärung 42
Bewertungsraster und schriftliche Beurteilung der Projektarbeit 43
9 Anhang 45
9.1 Diagramm Ausgleichsfeuchtigkeit 45
9.2 Protokoll 46
9.3 Datalogger 67
9.4 NCSS 9-Dokumente 72
9.5 Prüfberichte 95
9.6 Korrespondenz 105
9.7 Laufblatt Wenger intern 108

1 Ausgangslage

Als klassische Holzverbindung hat sich die Schlitz-Zapfenverbindung über lange Zeit zu einer äusserst bewährten Lösung bei Fensterecken entwickelt. Ihr zentraler Vorteil liegt in der grossen Oberfläche, welche eine dauerhaft funktionierende Klebverbindung ermöglicht. Mit zunehmender Rationalisierung der Produktion wurde diese aufwändige Eckverbindung zu kostspielig. Infolgedessen griff die Industrie auf die ebenfalls bewährte Dübelverbindung zurück, welche ohne metallische Verbindungsmittel auskommt. Durch verbesserte Klebstoffsysteme kann die sich nachteilig auswirkende Fläche kompensiert werden. Auch die hirnholzseitige Verklebung bedeutet keine nicht zu überwindende Herausforderung mehr.

Als nun der Maschinenhersteller Weinig AG für seine Anlagen Robiniendübel empfiehlt, respektive für Buchendübel keine Garantie gewährt, sieht sich Eicher Holzwaren AG ungerechtfertigt aus dem Markt gedrängt[1]. Eicher Holzwaren AG produziert unter anderem Qualitätsdübel aus Buchenholz. Die Tatsache, dass Buchenholz ungeeignet für den Einsatz im Aussenbereich ist, bleibt unbestritten, allerdings ist der Dübel bei sachgemässer Ausführung der Eckverbindung zu keinem Zeitpunkt dem Aussenklima ausgesetzt.

Wenger Fenster AG verbaut wider die Empfehlung von Weinig AG Buchendübel und hatte bis dato keine negativen Rückmeldungen. Allerdings ist auch Wenger Fenster AG daran interessiert, dass ihre Fenster aufgrund der Buchendübel keinen Qualitätsverlust erleiden.

1.1 Abgrenzung

In der folgenden Projektarbeit werden nun Fensterecken mit Buchen- sowie Robiniendübel geprüft und verglichen. Die Situation von Eicher Holzwaren AG hat sowohl eine markt- als auch materialtechnische Komponente. Ohne fundierte Kenntnisse der beiden Holzarten bezüglich ihrer Funktion in Fenstereckverbindungen ist keine Aussage über die Berechtigung der Verbannung des Buchendübels aus der Fensterecke möglich. Im Sinne der Wissenschaft steht der materialtechnische Aspekt somit im Vordergrund.

Jeweils zwei Ecken des klassischen Fensterrahmens werden auf Zug und auf Scherung beansprucht. Folglich liegt auf diesen beiden Belastungsfällen der Fokus. Während der Produktion ist das Klima vorherseh- und kalkulierbar. Nicht so während der Bauphase. Während den Lager-, Transport- und Montagevorgängen treten klimatische Schwankungen auf, die wiederum im Extremfall die Ausgleichsfeuchte des Holzes um bis zu 10% variieren lassen können. Daher Prüfungen nach Norm- und Zyklusklimatisierung geplant. Die aus produktionstechnischer Sicht interessante Frühzugfestigkeit erfolgt zusätzlich.

[1] vgl. Beat Werfeli und Lukas Pirkheim, 2016.

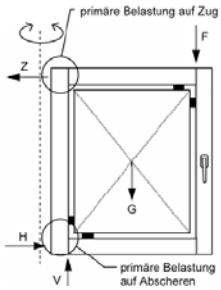
1.2 Zielsetzung

Basierend auf der Ausgangslage ergeben sich die Haupt- und Nebenaufgabe sowie die Untersuchungsziele dieser Arbeit. Die Kapitel werden im Weiteren übersichtlichkeitshalber nach ihren Untersuchungszielen benannt und sind in sich abgeschlossen.

Ziel ist es, nach Abschluss der Arbeit auf ausdrücklichen Wunsch eine Empfehlung für Eicher Holzwaren AG auszuhändigen.

1.3 Hauptaufgabe

Am Fenster sind die zentralen Belastungsgrössen Zug- resp. Scherkraft, welche auf die Fensterecke wirken.



Legende
F = Beanspruchung aus der Bedienung
G = Gewicht der Glasscheibe
H = Querkraft in der unteren Flügelecke
V = Abscherkraft in der unteren Flügelecke
Z = Zugkraft in der oberen Flügelecke

Abbildung 1 Belastungssituation am Fenster[2] (Bild: ift Richtlinie, 2008)

Die Untersuchung dieser beiden Belastungen führen zur Hauptfragestellung:

„Eignet sich Buche als Holzart für den Einsatz in gedübelten Fenstereckverbindungen?“

Folgende Untersuchungen dienen zur Beantwortung der Hauptfragestellung:

1. Prüfung der Fenstereckverbindungen auf Zugbeanspruchung und Vergleich der Resultate beider Holzarten.
2. Prüfung der Fenstereckverbindungen auf Scherbeanspruchung und Vergleich der Resultate beider Holzarten.

Um dem ausgesprochenen Wechselklima während der Bauphase und im Gebäude Rechnung zu tragen, wird ein Teil der Prüfkörper einem simulierten Wechselklima ausgesetzt und unter denselben Belastungen geprüft.

1.4 Nebenaufgabe

Aus produktionstechnischer Überlegung wird eine Nebenaufgabe als These formuliert:

„Buche hat die besseren Frühzugfestigkeitseigenschaften als Robinie.“

Diese These geht aus den von Wenger Fenster AG im Selbstversuch durchgeführten Prüfungen hervor.[3]

Hieraus lässt sich ein weiteres Untersuchungsziel formulieren:

1. Prüfung der Fenstereckverbindungen auf Zugbeanspruchung und Vergleich der Resultate beider Holzarten.

[2] ift Rosenheim, 2008. Seite 8
[3] Beat Werfeli und Lukas Pirkheim, 2016.

2 Vorbereitende Arbeiten

Es folgen einige Ausführungen zu den Voraussetzungen und Rahmenbedingungen, welche sowohl dem methodischen Aufbau der Arbeit als auch den konkreten Versuchen zuträglich sind.

2.1 Einleitung

Um aufschlussreiche, aussagekräftige und plausible Angaben zum Festigkeitsvergleich von Robiniendübel im Gegensatz zu Buchendübel zu geben, bedarf es einiger vorbereitender Arbeiten. Am Anfang steht ein Literaturstudium, worin der Stand des Wissens zusammengetragen wird. Weiter ist die grobe Abklärung des Versuchsaufbaus und -ablaufs notwendig.

Nach der theoretischen Versuchsvorbereitung erfolgt die Klimatisierung der Prüfkörper. Mit ihr geht die Protokollierung der Holzfeuchtigkeit einher.

2.2 Literaturstudium

In der Schweiz existiert keine Norm, nach welcher Fenstereckverbindungen getestet werden können. Allerdings wurden an der Berner Fachhochschule bereits verschiedene Arbeiten mit ähnlicher Fragestellung durchgeführt. Sie liefern einige Angaben zum Aufbau der Versuche, aber auch der Arbeit. Analog zu diesen richtet sich auch die vorliegende Projektarbeit nach der Richtlinie FE-08/1 des ift Rosenheims[4]. Die Richtlinie umfasst neben der Fenstereckverbindungsprüfung weitere Teilprüfungen am Fenster, welche hier nicht behandelt werden. Sie liefert Informationen bezüglich der Wahl des Fenstertyps sowie dessen Holzart. Für eine fundierte Diskussion ist zudem das intensive Studieren der holzanatomischen Merkmale der Dübelholzarten unerlässlich. Gleiches gilt für die Verklebungsart und den Klebstoff. Die in Tabelle 1 aufgeführten Bücher enthalten die notwendigen Informationen.

Tabelle 1 Verwendete Literatur

Autor	Title	Verlag, Auflage, Jahr
Rudi Wagenführ	HOLZatlas	Carl Hanser Verlag, 5. Auflage, 2000
Peter Niemz	Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe	DWR-Verlag, 1. Auflage, 1993
Jürgen Sell	Eigenschaften und Kenngrössen von Holzarten	Baufachverlag, 3. Auflage, 1989

[4] ift Rosenheim, 2008.

2.3 Vorbereitungen an den Prüfkörpern

Nach Wareneingang müssen die Prüfkörper für die Versuche aufbereitet werden.

2.3.1 Nummerierung der Prüfkörper und Serienbildung

Je nach Holzart der Dübel, Geometrie der Fensterecke und Konditionierung gliedern sich die Prüfkörper in verschiedene Serien. Es entstehen insgesamt sechs Serien mit einer Stichprobengrösse von je 12 Fensterecken. In der Tabelle 3 im Kapitel *2.3.3* ist die *Übersicht der Serien* aufgeführt.

2.3.2 Konditionierung der Prüfkörper

Die Serien erfahren unterschiedliche Klimatisierung.

Normklima: Die Serien 1-4 werden bis zur Prüfung bei 20°C, 65% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Dies entspricht der Vorgabe der ift Richtlinie.

Zyklusklimatisierung: Die Serien 5 und 6 werden den in Tabelle 2 visualisierten Zyklen unterzogen:

Tabelle 2 Klimatisierung der Serien 5 und 6 vor der Zug- und Scherprüfung

Phasen der Zyklusklimatisierung

Zyklus [Nr.]	Dauer [d]	Klima [°C/%]	Holzfeuchtigkeit u [%]	Bemerkung	Ziel
1	24.11. bis 8.11	20/65	13±2%	Anfangsdatum der Phase entspricht dem Wareneingang der Prüflinge	Einstellen der Ausgleichsfeuchte
2	8.11. bis 14.11.	40/90	ca. 20%		maximale Auffeuchtung
3	14.11. bis 22.11	40/30	ca. 6%		drastische Trocknung
4	22.11. bis 30.11.	20/65	13±2%		Einstellen der Ausgleichsfeuchte

Diese Konditionierung entspricht eigenen Überlegungen nach Lektüre von internen Prüfberichten.[5]

[5] Marc Donzé, 2012.

2.3.3 Übersicht der Serien

Untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die zu untersuchenden Prüfkörper und ihre Eigenschaften. Da die Belastungssituation bei der Scherprüfung nicht direkt den Dübel, sondern vielmehr die Kantel beansprucht, wird bei der Zyklusklimatisierung lediglich auf die Zugprüfung zurückgegriffen.

Tabelle 3 Eigenschaften der zu prüfenden Serien

Übersicht der Serien

Serie [Nr.]	Anzahl Prüflinge [Stk]	Anzahl Testexemplare [Stk]	Dübel	Klima	Belastung
1	12	1	Bu	Norm	Zug
2	12	1	Ro	Norm	Scherung
3	12	1	Bu	Norm	Scherung
4	12	1	Ro	Norm	Zug
5	12	2	Bu	Zyklus	Zug
6	12	2	Ro	Zyklus	Zug

2.4 Holzfeuchtigkeit

Die Holzfeuchtigkeit nimmt direkten Einfluss auf alle mechanischen Fähigkeiten des Holzes. Durch die Konditionierung der Prüfkörper in einem standardisierten Klima lassen sich die Resultate miteinander vergleichen. Die ift Richtlinie schreibt für die Prüfkörper bei Lagerung im Normklima eine Holzfeuchtigkeit von 13±2% vor. Bei Zyklusklimatisierung muss diese weniger als 18% betragen. Eine kontinuierliche Überprüfung der Holzfeuchtigkeit während der Klimatisierung ist unerlässlich.

2.4.1 Material und Methoden

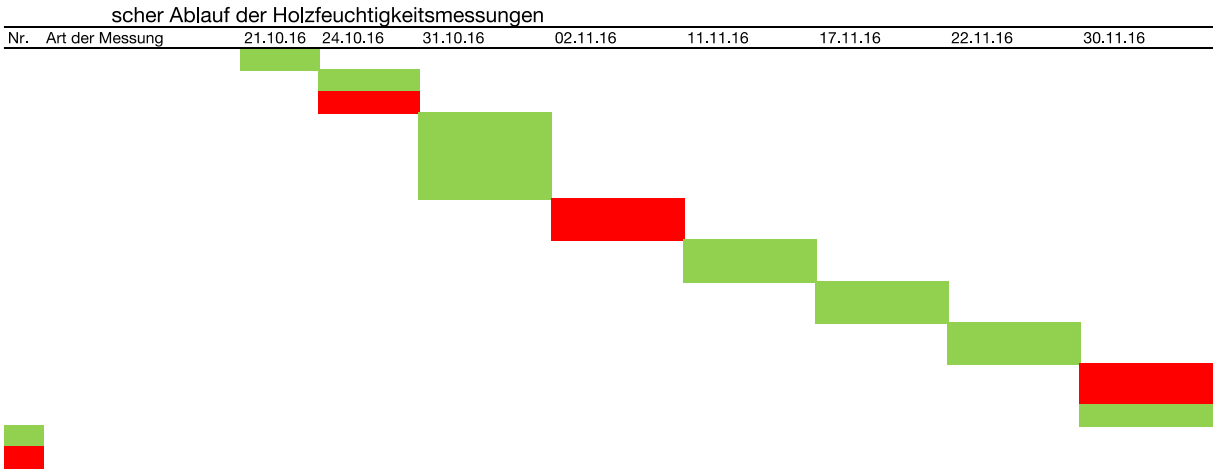
Grundsätzlich wird die Holzfeuchtigkeit elektrisch und mittels Darrprobe gemessen. Das elektrische Messgerät ermittelt die Holzfeuchtigkeit über den elektrischen Widerstand innerhalb des Prüfkörpers. Das Darrverfahren zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit ist präziser als die elektrische Messung. Dem Holz wird im Darrofen sämtliche Feuchtigkeit entzogen, woraus sich die Holzfeuchtigkeit mit folgender Formel berechnen lässt:

Holzfeuchtigkeit	$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \times 100\%$	u = Holzfeuchtigkeit [%] m_u = Masse der feuchten Probe [g] m_0 = Masse der trockenen Probe [g]

Formel 1 Berechnung der Holzfeuchtigkeit mittels Darrverfahren

Die Ausgleichsfeuchte der Prüfkörper wird gemäss folgender Road Map gemessen.

Tabelle 4 Daten der Holzfeuchtigkeitsmessungen



Eingangs wird die Holzfeuchtigkeit aller Prüflinge elektrisch gemessen und Darrproben der Serien A und B angelegt. Für nachfolgende Messungen werden nur noch Referenzproben verwendet. Dazu ausgewählt sind die Proben mit der Holzfeuchtigkeit, welche dem Mittelwert am nächsten kommen. Die Auflistung der Referenzproben ist im Anhang *Kapitel 9.2 Protokoll* ersichtlich.

Der Profilquerschnitt der Fensterflügel ist zu schmal, wodurch die Elektroden des Feuchtemessgeräts nicht normgetreu[6] quer zur Faser eingetrieben werden können. Dadurch wird der Vergleich mit der Darrprobe umso wichtiger. Aus diesem ergibt sich ein Korrekturwert, welcher auf die elektrisch bestimmte Holzfeuchtigkeit angewendet wird. Er ist jedoch nur approximativ für Abschätzungen anwendbar und gilt ausschliesslich für das verwendete Holzfeuchtigkeitsmessgerät.

Tabelle 5 Produktbezeichnungen zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeiten

Messgeräte zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeiten

Messgerät	Bezeichnung
Elektrisch	GANN HYDROMETTE M4050
Waage	Mettler Toledo
Darrofen	Memmert Modell 600 D06062

[6] GANN HYDROMETTE, o.J.

2.4.2 Resultate

Nachfolgend sind die Messergebnisse der Holzfeuchtigkeit während Zyklusklimatisierung wie auch unmittelbar vor der Prüfung aufgeführt. Der Korrekturwert für die elektrisch gemessenen Holzfeuchtigkeiten ist ebenfalls angegeben.

2.4.2.1 Holzfeuchtigkeit vor der Prüfung

Tabelle 6 Holzfeuchtigkeit vor der Prüfung, elektrisch gemessen abzüglich Korrekturwert

Holzfeuchtigkeit vor der Prüfung

Serie	Holzfeuchtigkeit_9.2 u (30.11.16) [%]
Serie_1	13.81
Serie_2	13.23
Serie_3	13.67
Serie_4	13.70
Serie_5	10.51
Serie_6	10.93

Die Holzfeuchtigkeit aller Serien wurde vor der Prüfung ein letztes Mal gemessen, damit sie im von der ift Richtlinie vorgegebenen Bereich liegen und zur Prüfung zugelassen werden. Die Messung erfolgte mit dem elektrischen Messgerät und die Resultate verstehen sich abzüglich des ermittelten Korrekturwerts. Korrekturwert

Die ausführliche Dokumentation aller Holzfeuchtigkeiten zu gegebenen Daten findet sich unter Anhang *Kapitel 9.2 Protokoll* Seite 46 ff.

Gemäss Tabelle 7 liegt der Korrekturwert bei 2.81%. Dieser kann jeder elektrisch gemessenen Holzfeuchtigkeit nach Wareneingang abgezogen werden.

Tabelle 7 Differenz der Holzfeuchtigkeitsmessungen mittels Darrprobe und elektrisch

Ermittlung des Korrekturwerts

Serie	Messnummer	Bestimmungsmethode		
		Darrverfahren [%]	Elektrisch [%]	Differenz [%]
Serie_A	2.2	14.22	15.44	1.22
Serie_B	2.2	13.95	16.86	2.91
Serie_1	9.1	11.40	17.43	6.04
Serie_2	9.1	13.05	16.00	2.95
Serie_3	9.1	13.39	16.30	2.91
Serie_4	9.1	13.74	16.35	2.61
Serie_5	5.1	11.55	13.20	1.65
Serie_6	5.1	11.71	13.93	2.22
Mittelwert		13.39	16.64	**2.81**

2.4.2.2 Zyklusklimatisierung

Die Tabelle 6 zeigt die Mittelwerte im Verlauf der zyklischen Klimatisierung. Neben Serie 5 (Bu) und Serie 6 (Ro) ist auch die Soll-Holzfeuchtigkeit in jeder Phase des Zyklus' gegeben. Weiter sind auch die Rahmenbedingungen relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur angegeben.

Tabelle 8 korrigierte Holzfeuchtigkeiten der Serien 5 und 6 während der Zyklusklimatisierung

Holzfeuchtigkeit bei Zyklusklimatisierung elektrisch gemessen (Nach Korrektur)

		Zyklus_1	Zyklus_2	Zyklus_3		Zyklus_4
	Einheit	Holzfeuchtigkeit_5.1	Holzfeuchtigkeit_6.1	Holzfeuchtigkeit_7.1	Holzfeuchtigkeit_8.1	Holzfeuchtigkeit_9.2
Serie		02.11.2016	11.11.2016	17.11.2016	22.11.2016	30.11.2016
Serie_5	[%]	13.74	22.89	11.49	7.15	10.51
Serie_6	[%]	13.60	24.19	10.39	6.62	10.93
Soll u(ø)±2%	[%]	13	19	5.5	5.5	13
rL	[%]	65	90	30	30	65
Temperatur	[°C]	20	40	40	40	20

2.4.3 Diskussion

Die Feuchtigkeitsmessung mit dem elektrischen Messgerät weist erhebliche Differenzen auf, welche es zu berücksichtigen gilt. Ebenfalls verhält sich die Holzfeuchtigkeit nach zyklischer Klimabelastung anders als bei Normklimatisierung.

2.4.3.1 Holzfeuchtigkeit vor der Prüfung

Die Serien 1-4 (Norm) liegen alle im Bereich von 13±2%. Die Serien 5 und 6 (Zyklus) weisen eine Holzfeuchtigkeit < 18% auf. Die Resultate entsprechen den Vorgaben der ift Richtlinie und können zur Prüfung zugelassen werden.

2.4.3.2 Korrekturwert

Die Soll-Ausgleichsfeuchtigkeit (siehe *Anhang Kapitel 9.1*), welche sich beim Normklima einstellen müsste, entspricht der elektrisch gemessenen Feuchtigkeit nach Bereinigung des Soll-Werts. Der Korrekturwert ist somit zur Abschätzung der Holzfeuchtigkeit verwendbar.

Die Differenzen zwischen der Holzfeuchtigkeitsmessung bei der Produktion und bei Wareneingang lassen sich durch unterschiedliche Messgeräte erklären.

Die Darrprobe bestätigt, dass die Prüfkörper bei richtigem Klima gelagert wurden. Dies war aufgrund der stark abweichenden Messergebnissen von der Soll-Ausgleichsfeuchtigkeit zunächst in Frage gestellt worden.

2.4.3.3 Zyklusmessung

Die Ausgleichsfeuchte steigt und sinkt direkt proportional zur relativen Luftfeuchtigkeit, wie Abbildung 2 eindeutig zeigt. Die zyklische Klimatisierung zerstört Hydroxylgruppen zerstört, was zu einer geringeren Feuchtigkeitsaufnahme führt (Hysterese-Verhalten)[7]. Die geforderte Holzfeuchtigkeit[8] von u=13±2% kann somit nicht in der gegebenen Zeit erreicht werden. Allerdings wird für die Prüfung des Fensters nach künstlicher Alterung eine Holzfeuchtigkeit von u<18% gefordert. Da es sich ebenfalls um eine simulierte Klimabelastung handelt, ist das Verwenden dieser Vorgabe durchaus sinnvoll. Dies auch, wenn der künstliche Alterungsprozess von der hier angewandten zyklischen Belastung abweicht.

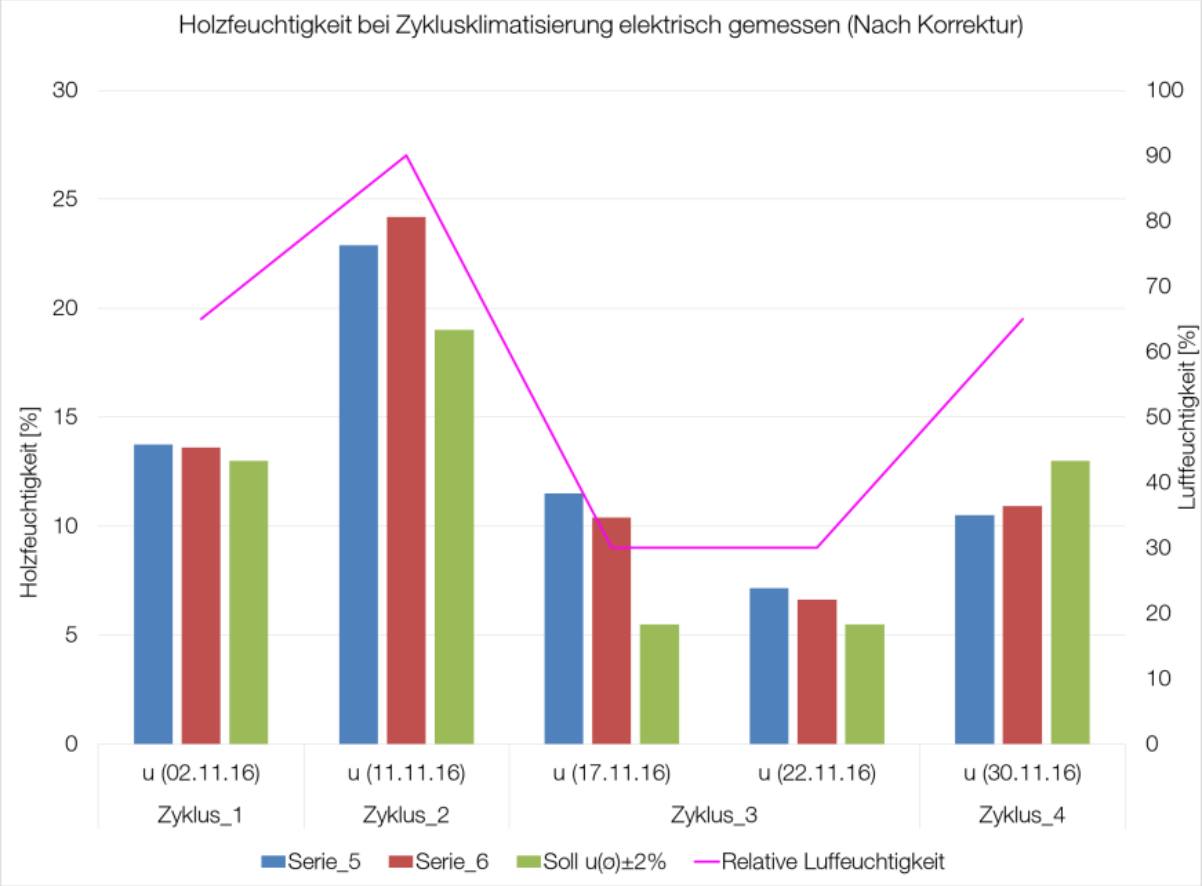


Abbildung 2 Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit
(Grafik: Seidlitz, 2016)

[7] vgl. Thomas Volkmer, 2015.
[8] ift Rosenheim, 2008.

3 Zug- und Scherfestigkeit von Buchen- und Robiniendübeln

Im direkten Vergleich der primären Belastungsarten erfolgt die Untersuchung bezüglich der besseren Eignung für Fenstereckverbindungen.

3.1 Einleitung

Der Versuchsaufbau für die Hauptaufgabe basiert soweit als möglich auf der Richtlinie des ift Rosenheim[9]. Bei den Prüfkörpern handelt es sich um unbeschichtete Flügelecken des Fenstertyps „Niesen Standard“[10] der Firma Wenger Fenster AG. Die Abmessungen der fertigen Fenster betragen 730 mm x 830 mm. Die verarbeiteten Fensterkanteln wurden im Aussenklima gelagert. Mitarbeiter der Wenger Fenster AG haben die Holzfeuchtigkeit der Fensterflügel sowie die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Werkstatt während der Produktion gemessen und auf den Prüfkörpern notiert. Vor dem Versand wurden die Fensterflügel in jeweils vier Ecken zugeschnitten.

3.2 Material und Methoden

In diesem Kapitel sind die Materialisierung und Vorbereitung der Prüfkörper aufgelistet. Ebenfalls sind die Vorgehensweise und die benötigten Prüfinstrumente aufgeführt.

3.2.1.1 Materialisierung der Prüfkörper

Der Prüfkörper ist wie folgt aufgebaut. Informationen über die Gesamtliefermenge sind aus dem Lieferschein von Wenger Fenster AG im Anhang *Kapitel 9.6.1 Auftragsdefinition Wenger intern* zu finden.

Die Dübel befinden sich an drei Stellen gemäss Abbildung 3.

Tabelle 6 Materialisierung der Prüfkörper der Versuche Zug- und Scherfestigkeit

Materialisierung

Material	Bezeichnung	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Anzahl [Stk]
Kantel	Fichte kvz (stehend)	400	68	77	1
profiliert	Fichte kvz (liegend)	350	68	77	1
Dübel	Bu oder Ro	60	8		3
Klebstoff	Collano DW2044				1

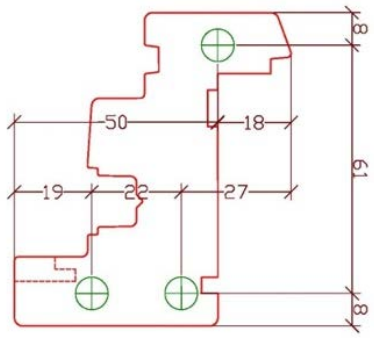


Abbildung 3 Profilquerschnitt und Dübelposition des Fenstertyps Niesen Standard (Bild: Bieri, 2016)

[9] Ebd.
[10] Wenger Fenster AG, 2016.

3.2.2 Vorbereitung der Prüfkörper

Dieses Unterkapitel enthält Informationen über vorbereitende Massnahmen an den Prüfkörpern.

3.2.3 Maschinelle Vorbereitungen

Um die Prüfkörper in die Prüfeinrichtung einzuspannen, sind folgende Vorbereitungen an den Stellen gemäss Abbildung 4 notwendig.

- Bohrung eines Loches Ø 13mm am stehenden Profil für Bolzen Ø 12mm der Einspannvorrichtung
- Bohrung eines Loches Ø 9 mm am stehenden Profil für Bolzen Ø 8 mm der Einspannvorrichtung

3.2.4 Prüfeinrichtung

Alle Serien werden mit der Universalprüfanlage Zwick/Roell Z050 des Werkstoffprüflabors im Technologiepark der Berner Fachhochschule, Fachbereich Holz am Standort Biel geprüft (Interne Nr.: 36.9489). Folgende Komponenten umfassen die Prüfeinrichtung:

- stationäre Anlage Zwick/Roell Z050 (50 kN)
- stationärer Rechner zur Aufzeichnung der Daten während der Prüfung
- Einspannvorrichtung mit Verklotzung, Befestigungs- sowie Stabilisierungsbolzen

3.2.5 Versuchsaufbau

Die Einspannvorrichtung ist aufgrund früherer Untersuchungen an der Berner Fachhochschule bereits vorhanden. Die Abbildung 4 zeigt die konkrete Situation mit den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Prüfkörpern.

Der Aufbau ist sowohl für Scher- als auch für Zugversuche derselbe. Als einziger Unterschied kann die Einspannrichtung der Prüfkörper formuliert werden.

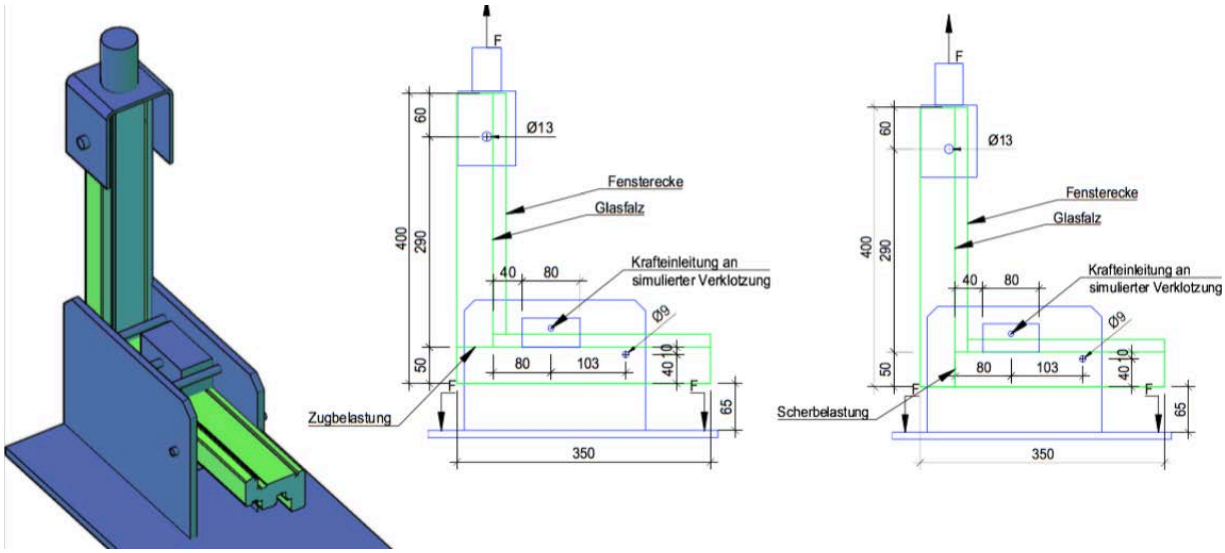


Abbildung 4 Versuchsaufbau links Zug und rechts Scherung[11,12] (Bild: Seidlitz, 2016)

[11] vgl. Marc Donzé, 2012.

3.2.6 Methodik

Während die Vorbereitung und Prüfung der Fensterecken auf der ift Richtlinie beruht, weicht die Auswertung von ebendieser ab. Der Auswertungsbogen gemäss Richtlinie ist von untergeordnetem Interesse und findet sich in *Kapitel 9.2 Protokoll* Seite 64 ff. Der Fokus liegt auf den maximal aufnehmbaren Zug- und Scherbelastungen der Holzarten Buche und Robinie.

3.2.7 Statistische Methoden

Die Prüfmaschine misst die maximale Kraftaufnahme F_{max}. Die Resultate gemäss *Kapitel 3.3 Messergebnisse* lassen sich mithilfe des Statistikprogramms NCSS 9 auswerten[13&14].

Folgende Vergleiche werden durchgeführt und mithilfe von Boxplots dargestellt:

1. Vergleich der Zugfestigkeit zwischen Buche und Robinie bei Konditionierung im Normklima
2. Vergleich der Scherfestigkeit zwischen Buche und Robinie bei Konditionierung im Normklima
3. Vergleich der Zugfestigkeit zwischen Buche und Robinie bei Zykluskonditionierung
4. Vergleich der Zugfestigkeit zwischen Buche bei Konditionierung im Normklima und Buche bei Zykluskonditionierung
5. Vergleich der Zugfestigkeit zwischen Robinie bei Konditionierung im Normklima und Robinie bei Zykluskonditionierung

Es existieren viele unterschiedliche Tests, die im Rahmen der Statistik durchgeführt werden können. Die Auswahl der Testmethode erfolgt in drei Schritten: Zunächst wird die zu untersuchende Frage gestellt. Daraus leiten sich die beiden Hypothesen Null- (H_0) und Alternativhypothese (H_A) ab. Diese decken zusammen alle möglichen statistischen Szenarien ab und sind wichtig, um im NCSS 9-Programm die richtigen Einstellungen zu treffen. Die Null- und Alternativhypothese werden unabhängig von den Messresultaten aufgestellt und untersuchen in dieser Arbeit immer die Überlegenheit der Buche gegenüber der Robinie. Im Anschluss hilft ein Entscheidungsbaum, je nach Stichprobenanzahl und Einflussfaktoren den richtigen Test auszuwählen. Diese drei Schritte werden am Anfang jedes Tests in den kommenden Unterkapiteln durchgespielt. Des Weiteren verlangt die Statistik vor der Betrachtung der Resultate eine Überprüfung der Voraussetzungen (tests of assumptions). Diese lauten:

1. Die Datenpunkte müssen normalverteilt sein.
2. Die Varianzen der beiden Stichproben sind gleich.

[12] vgl. ift Rosenheim, 2008.
[13] vgl. Beat Huber-Eicher, 2015a.
[14] vgl. Beat Huber-Eicher, 2015b.

Das Programm NCSS 9 verwendet gängige statistische Kennwerte, die wie folgt berechnet werden:

Mittelwert	$x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$	x = Mittelwert [N] n = Anzahl Datenpunkte [-] i = Laufvariable [-] x_i = Mittelwert bezüglich der Laufvariable [N]
Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)}$	s = Standardabweichung n = Anzahl Datenpunkte [-] i = Laufvariable [-] xi = Mittelwert bezüglich der Laufvariablen [N] x = Mittelwert [N]
Variationskoeffizient	$VarK = \frac{s}{x} * 100$	VarK = Variationskoeffizient [%] s = Standardabweichung [N] x = Mittelwert [N]

Formel 2 Verwendete Formeln des NCSS 9 Programms

3.3 Resultate

Neben den in Tabelle 10 aufgeführten Ergebnissen der Serien 1-6 folgen die Resultate der fünf Vergleiche unter *Kapitel 3.3.1* ff. Zu letzteren gehören auch die statistischen Auswertungen, welche die Aussagekraft der Ergebnisse definiert.

Tabelle 7 Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen

Maximale Belastungen

	Zug Bu Norm	Scher Ro Norm	Scher Bu Norm	Zug Ro Norm	Zug Bu Zyklus	Zug Ro Zyklus
	Serie_1	Serie_2	Serie_3	Serie_4	Serie_5	Serie_6
Prüfkörper	Fmax [N]	Fmax [N]	Fmax [N]	Fmax [N]	Fmax [N]	Fmax [N]
1	2848.2	4030.1	3842.4	1649.4	4288.9	1151.5
2	2841.8	5224.1	3379.2	2026.1	2726.0	2093.9
3	2294.2	3062.1	4174.9	1237.3	2948.2	1293.7
4	2290.2	3297.9	3249.6	2158.5	2741.1	2249.2
5	3200.5	5112.0	4570.2	1630.1	3401.5	966.0
6	2191.9	2811.8	3834.7	3652.5	3454.3	1632.1
7	2447.7	2660.0	3110.5	2934.6	4580.6	2607.8
8	2742.6	3326.6	4198.1	1691.7	2472.0	1096.9
9	3104.7	4743.4	4235.7	1940.8	2741.0	2780.5
10	2570.0	5057.9	3051.1	2107.1	1994.5	2663.8
11	1660.9	4112.8	3402.6	3080.5	2562.4	2091.7
12	2194.6	3291.4	3080.9	2144.2	2939.7	3056.0
Mittelwert	2532.3	3894.1	3677.5	2187.7	3070.9	1973.6
Standardabweichung	439.7	944.9	530.5	697.2	748.6	728.9
Variationskoeffizient	17.4%	24.3%	14.4%	31.9%	24.4%	36.9%

Die Tabelle 10 zeigt, dass die Mittelwerte der maximalen Kraftaufnahme bei Buche ausser bei der Scherprüfung höher liegen als diejenigen von Robinie.

3.3.1 Zugfestigkeit Bu/Ro Normklima

Die zu untersuchende Frage lautet: Ist der Mittelwert der maximalen Zugkraft von Bu signifikant höher als derjenige von Ro bei Vorkonditionierung im Normklima?
Daraus leiten sich folgende Hypothesen ab:

1. Alternativhypothese (H_A): Der Mittelwert von Bu ist grösser als derjenige von Ro.
2. Nullhypothese (H_0): Der Mittelwert von Bu ist kleiner oder gleich demjenigen von Ro.

Stichproben: 2 (Dübelarten: Bu und Ro)
Einflussfaktoren: keine
Test: t-Test
Test of assumptions:
1. Die Normalverteilung der Datenpunkte ist gegeben.
2. Die Varianzen der Stichproben sind gleich.
(gemäss Anhang Kapitel 4.1)

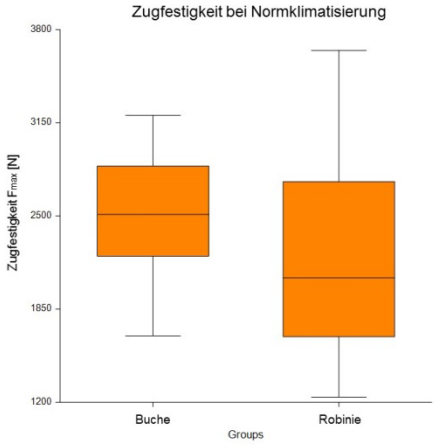


Abbildung 5 Boxplot Zugfestigkeit Bu/Ro, Normklima (Grafik: Mantovani, 2016)

Tabelle 8 Ergebnisse Zugfestigkeit Bu/Ro, Normklima

Zugfestigkeit Bu Ro Normklima		Bu	Ro
Mittelwert x	[N]	2532.3	2187.7
Standardabweichung s	[N]	439.74	697.19
Variationskoeffizient VarK	[%]	17.37	31.87
Überschreitungswahrscheinlichkeit (p-Wert)	[%]	16.17	
Signifikanz	-	nein	

Obwohl die Mittelwerte der Zugfestigkeit von Buchen- und Robiniendübeln in ähnlichen Bereichen liegen, ist die Standardabweichung bei Ro rund 1.5mal höher als bei Bu. Dies führt dazu, dass der Mittelwert von Ro deutlich mehr streut als derjenige von Bu, wie der Variationskoeffizient zeigt und im Boxplot sichtbar ist. Der p-Wert liegt bei 16.17%, weshalb die Nullhypothese (H_0) nicht verworfen werden kann. Die Zugfestigkeit von Buchendübeln bei Normklimatisierung ist nicht signifikant höher als diejenige von Robiniendübeln.

3.3.2 Scherfestigkeit Bu/Ro Normklima

Die zu untersuchende Frage lautet: Ist der Mittelwert der maximalen Scherkraft bei Buche signifikant höher als derjenige der Robinie bei Vorkonditionierung im Normklima?

1. Alternativhypothese (H_A): Der Mittelwert von Bu ist grösser als derjenige von Ro.
2. Nullhypothese (H_0): Der Mittelwert von Bu ist kleiner oder gleich demjenigen von Ro.

Stichproben: 2 (Dübelarten: Bu und Ro)

Einflussfaktoren: keine

Test: t-Test

Test of assumptions:

1. Die Normalverteilung der Datenpunkte ist gegeben.
2. Die Varianzen der Stichproben sind gleich.

(gemäss Anhang Kapitel 4.2)

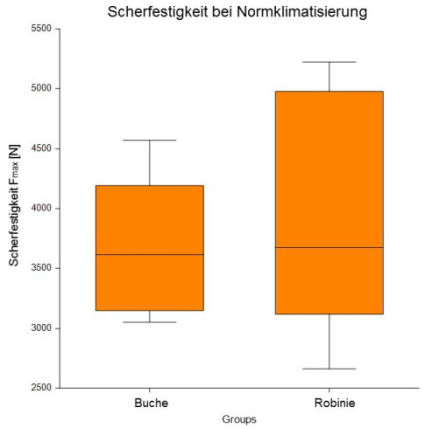


Abbildung 6 Boxplot Scherfestigkeit Bu/Ro, Normklima (Grafik: Mantovani, 2016)

Tabelle 9 Ergebnisse Scherfestigkeit Bu/Ro, Normklima

Scherfestigkeit Bu | Ro Normklima		Bu	Ro
Mittelwert x	[N]	3677.50	3894.15
Standardabweichung s	[N]	530.54	944.93
Variationskoeffizient VarK	[%]	14.43	24.27
Überschreitungswahrscheinlichkeit (p-Wert)	[%]	49.58	
Signifikanz	-	nein	

Der Vergleich wird durchgeführt, obwohl der Mittelwert der Zugfestigkeit von Buchendübeln unterhalb desjenigen von Robiniendübeln liegt. Eine Gegenüberstellung der Standardabweichung und Streuung ist dennoch sinnvoll. Die Standardabweichung bei Ro ist rund 1.8mal höher ist als bei Bu. Dies führt dazu, dass der Mittelwert von Ro deutlich mehr streut als derjenige von Bu, wie der Variationskoeffizient zeigt und im Boxplot sichtbar ist. Der p-Wert liegt deutlich über dem Grenzwert von 5% bei 49.58%. Somit kann die Nullhypothese (H_0) nicht verworfen werden. Die Scherfestigkeit von Buchendübeln bei Normklimatisierung ist nicht signifikant höher als diejenige von Robiniendübeln, jedoch bewegt er sich in einem engeren Bereich und ist daher verlässlicher.

3.3.3 Zugfestigkeit Bu/Ro Zyklusklima

Die zu untersuchende Frage lautet: Ist der Mittelwert der maximalen Zugkraft bei Buche signifikant höher als derjenige der Robinie bei Zyklusklimatisierung?

1. Alternativhypothese (H_A): Der Mittelwert von Bu ist grösser als derjenige von Ro.
2. Nullhypothese (H_0): Der Mittelwert von Bu ist kleiner oder gleich demjenigen von Ro.

Stichproben: 2 (Dübelarten: Bu und Ro)

Einflussfaktoren: keine

Test: t-Test:

Test of assumptions:

1. Die Normalverteilung der Datenpunkte ist gegeben.
2. Die Varianzen der Stichproben sind gleich.

(gemäss Anhang Kapitel 4.3)

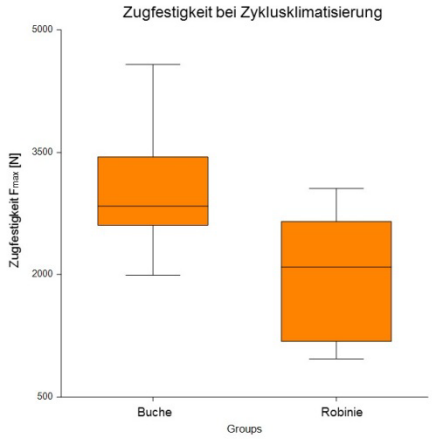


Abbildung 7 Boxplot Zugfestigkeit Bu/Ro, Zyklusklima (Grafik: Mantovani, 2016)

Tabelle 10 Ergebnisse Zugfestigkeit Bu/Ro, Zyklusklima

Zugfestigkeit Bu | Ro Zyklusklima		Bu	Ro
Mittelwert x	[N]	3070.86	1973.59
Standardabweichung s	[N]	748.56	728.91
Variationskoeffizient VarK	[%]	24.38	36.93
Überschreitungswahrscheinlichkeit (p-Wert)	[%]	0.15	
Signifikanz	-	ja	

Während die Standardabweichung von Buchen- und Robiniendübeln in sehr ähnlichen Bereichen liegen, divergieren die Mittelwerte deutlich. Dies führt dazu, dass der Mittelwert von Ro deutlich mehr streut als derjenige von Bu, wie der Variationskoeffizient zeigt und im Boxplot sichtbar ist. Der p-Wert liegt deutlich unter dem Grenzwert von 5% bei 0.15%, weshalb die Nullhypothese (H_0) verworfen werden kann. Die Zugfestigkeit von Buchendübeln bei Zyklusklimatisierung ist signifikant höher als diejenige von Robiniendübeln.

3.3.4 Zugfestigkeit Bu/Bu Norm- und Zyklusklima

Die zu untersuchende Frage lautet: Ist der Mittelwert der maximalen Zugkraft bei Buche und Vorkonditionierung im Normklima signifikant höher als derjenige der Buche und Zyklusklimatisierung?

1. Alternativhypothese (H_A): Der Mittelwert von Bu bei Normklima ist grösser als derjenige von Bu bei Zyklusklima.
2. Nullhypothese (H_0): Der Mittelwert von Bu bei Normklima ist kleiner oder gleich demjenigen von Bu bei Zyklusklima.

Stichprobe: 1 (Dübelart: Bu)
Faktor: 1 (Vergleich Normklima mit Zyklusklima)
Test: ANOVA
Test of assumptions:
1. Die Normalverteilung der Datenpunkte ist gegeben.
2. Die Varianzen der Stichproben sind gleich.
(gemäss Anhang Kapitel 4.4)

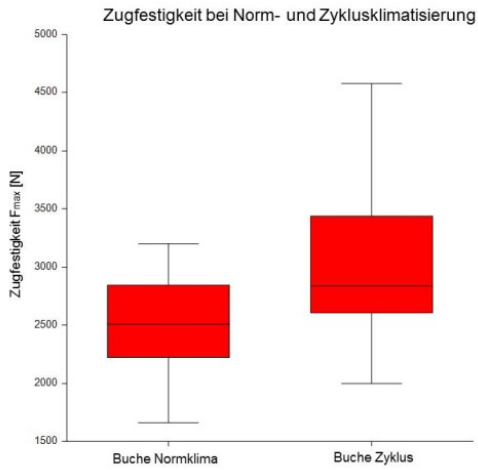


Abbildung 8 Boxplot Zugfestigkeit Bu/Bu, Norm- und Zyklusklima (Grafik: Mantovani, 2016)

Tabelle 11 Ergebnisse Zugfestigkeit Bu/Bu, Norm- und Zyklusklima

Zugfestigkeit Bu Norm | Bu Zyklus

		Bu Norm	Bu Zyklus
Mittelwert x	[N]	2532.27	3070.86
Standardabweichung s	[N]	439.74	748.56
Variationskoeffizient VarK	[%]	17.37	24.38
Überschreitungswahrscheinlichkeit (p-Wert)	[%]	8.32	
Signifikanz	-	nein	

Der Variationskoeffizient von Buchendübeln bei Zyklusklimatisierung unterscheidet sich um lediglich 7% von demjenigen von Buchendübeln bei Normklimatisierung, was bei unterschiedlichen Mittelwerten zu ähnlicher Streuung führt. Daher ähneln sich die beiden Boxplots. Der p-Wert liegt mit 8.32%, knapp über dem Grenzwert von 5%, weshalb die Nullhypothese (H_0) nicht verworfen werden kann. Die Zugfestigkeit von Buchendübeln bei Normklimatisierung ist nicht signifikant höher als diejenige von Buchendübeln bei Zyklusklimatisierung.

3.3.5 Zugfestigkeit Ro/Ro Norm- und Zyklusklima

Die zu untersuchende Frage lautet: Ist der Mittelwert der maximalen Zugkraft bei Robinie und Vorkonditionierung im Normklima signifikant höher als derjenige der Robinie und Zyklusklimatisierung?

1. Alternativhypothese (H_A): Der Mittelwert von Bu bei Normklima ist grösser als derjenige von Bu bei Zyklusklima.
2. Nullhypothese (H_0): Der Mittelwert von Bu bei Normklima ist kleiner oder gleich demjenigen von Bu bei Zyklusklima.

Stichprobe: 1 (Dübelart: Ro)
Faktor: 1 (Vergleich Normklima mit Zyklusklima)
Test: ANOVA
Test of assumptions:
1. Die Normalverteilung der Datenpunkte ist gegeben.
2. Die Varianzen der Stichproben sind gleich.
(gemäss Anhang Kapitel 4.5)

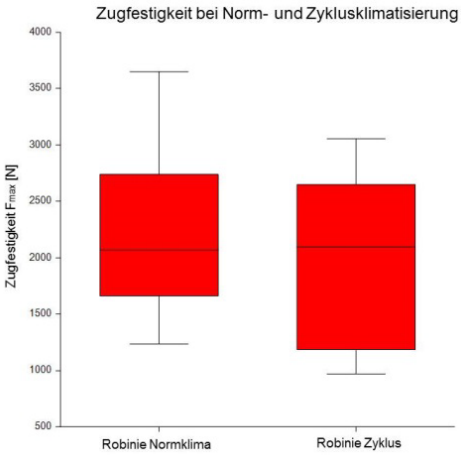


Abbildung 9 Boxplot Zugfestigkeit Ro/Ro, Norm- und Zyklusklima (Grafik: Mantovani, 2016)

Tabelle 12 Ergebnisse Zugfestigkeit Ro/Ro, Norm- und Zyklusklima

Zugfestigkeit Ro Norm | Ro Zyklus

		Ro Norm	Ro Zyklus
Mittelwert x	[N]	2187.73	1973.59
Standardabweichung s	[N]	697.19	728.91
Variationskoeffizient VarK	[%]	31.87	36.93
Überschreitungswahrscheinlichkeit (p-Wert)	[%]	52.54	
Signifikanz	-	nein	

Sowohl die Mittelwerte als auch die Standardabweichungen von Robiniendübeln bei Norm- und Zyklusklimatisierung liegen nahe beieinander, was zu einem ähnlichen Variationskoeffizient führt. Mit 31.87% und 36.93% streuen die Mittelwerte stark, was sich in entsprechend grossen Boxplots widerspiegelt. Der p-Wert liegt deutlich über dem Grenzwert von 5% bei 52.54%, weshalb die Nullhypothese (H_0) nicht verworfen werden kann. Die Zugfestigkeit von Robiniendübeln bei Normklimatisierung ist nicht signifikant höher als diejenige von Robiniendübeln bei Zyklusklimatisierung.

3.4 Diskussion

Die statistisch ausgewerteten Ergebnisse können anhand materialtechnischer Faktoren eingeordnet und begründet werden. Ausserdem haben Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Sauberkeit der Oberfläche Einfluss auf die Resultate. Als zentrale Einflüsse auf die maximale Belastbarkeit gelten insbesondere die Klebstoffeigenschaften, die Rohdichte[15] der Fensterkanteln sowie die Holzinhaltsstoffe der Dübel.

Der verwendete Einkomponenten-Dispersionsklebstoff Collano DW 2044 ist polyvinyacetatbasiert (PVAc) und für Anwendungen in Fensterecken geeignet[16]. PVAc ist wasserunlöslich, wegen der Hydroxylgruppen jedoch hydrophil. Bei physikalischem Abbinden bilden sich Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Klebstoff und Holz[17]. Neben der Verbindung des Klebstoffs mit dem Dübel muss auch die Verbindung mit der Fensterkantel betrachtet werden.

Während eine höhere Rohdichte eine höhere Festigkeit bewirkt, kann auch die Klebstoffaufnahme reduziert werden. Der Zellwandanteil ist grösser und somit der Porenanteil kleiner, weshalb die Aufnahme jeglicher Flüssigkeit erschwert wird.

Die Holzfeuchtigkeit spielt aufgrund der seriösen Klimatisierung eine untergeordnete Rolle, wie Abbildung 10 zeigt. Für eine eindeutige Aussage ist die Stichprobengrösse zu klein.

Abbildung 10 Zusammenhang F_{max} und Holzfeuchtigkeit der Fensterkanteln bei Versuchsdurchführung (Grafik: Seidlitz, 2016)

[15] Thomas Volkmer 2016.
[16] vgl. Collano AG, 2013.
[17] vgl. Frédéric Pichelin, 2015.

Verschiedene Struktureigenschaften beeinflussen den Feuchtigkeitstransport im Holz.
Robinie als ringporige und Buche als zerstreutporige Laubholzart besitzen beide Gefässe. Der Unterschied besteht in der Zellwandstruktur; Buche weist schlitzförmige, leicht behöfte Tüpfel auf, welche den Feuchtigkeitstransport zusätzlich begünstigen. Die verthyllten Gefässe der Robinie vermindern diesen hingegen. Weiter haben die Holzstrahlen einen wichtigen Einfluss. Die Holzstrahlen der Buche sind mit 15 bis 100 Zellen in der Höhe und 2 bis 25 Zellen in der Breite sehr gross. Allerdings liegt der Anteil der Holzstrahlen mit durchschnittlich 15.7% tendenziell unter dem Anteil bei der Robinie (ca. 21%), deren Holzstrahlen wiederum kleiner sind[18]. Diese beiden Charakteristika verhalten sich zuweilen gegenläufig, wodurch deren Einfluss klein ist. Die maximal erreichbare Festigkeit hängt auch mit der Saugfähigkeit des Werkstoffs zusammen. Buche als saugfähige Holzart ist dementsprechend gut imprägnierbar.
Hinsichtlich der Resultate aus der Zyklusklimatisierung sind die unterschiedlichen Inhaltsstoffe beider Holzarten relevant. Nachfolgend ein Vergleich mit ihrem jeweiligen Anteil der Holzinhaltstoffe von Buche und Robinie.

Tabelle 13 chemische Zusammensetzung von Buche und Robinie[19]

Chemische Zusammensetzung

		Buche		Robinie	
		min	max	min	max
Lignin	[%]	11.6	22.7	20.6	29.1
Zellulose	[%]	33.7	46.4	39.1	50.1
Gesamtzucker	[%]	75.7	85	ca. 81.7	
Pentosane	[%]	17.8	25.5	20.8	23.7
Acetylgruppen	[%]	6	7.1	2.7	3.2
Asche	[%]	0.3	1.2	0.1	0.6
Gerbstoff	[%]			bis 26	
Methoxyl	[%]	5.1	6.8	4.2	4.5
Ethanolextrakt	[%]			10.7	
Methanolextrakt	[%]			10.7	
Acetonextrakt	[%]			7.4	

[18] Rudi Wagenführ, 2000.
[19] Ebd.

3.4.1 Zugfestigkeit Bu/Ro Normklima

Gemäss statistischer Auswertung darf die Nullhypothese nicht verworfen werden. Folgende Ausführungen begründen nun dieses Ergebnis aus materialwissenschaftlicher Sicht.

Die Ermittlung der Rohdichte ergibt bei den Fensterkanteln eine Differenz von $\Delta\rho$=12 kg/m3.

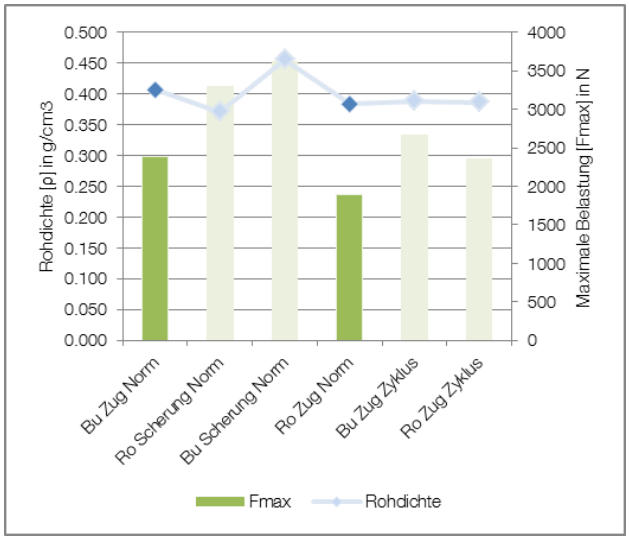


Abbildung 11 Zusammenhang von F_ und Rohdichte der Fensterkanteln bei Zugbelastung im Normklima (Grafik: Seidlitz, 2016)

Diese Differenz ist sehr gering, wodurch der Einfluss auf die Resultate beschränkt ist.

Wie auf der mikroskopischen Aufnahme in Abbildung 13 zu erkennen ist, dringt der Klebstoff kaum in den ringporigen, verkernten Robiniendübel ein. Das verthyllte Frühholzgefäss des Robiniendübels enthält kein Klebstoff (Abbildung 12), während die vielen kleinen Gefässe in der Randzone des Buchendübels (Abbildung 13) gefüllt sind.

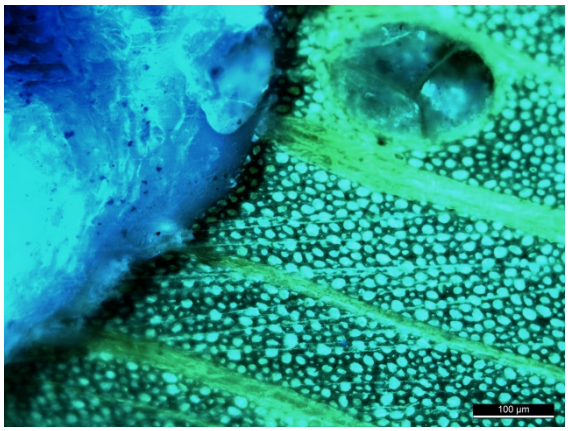


Abbildung 13 Übergang Klebstoff-Robiniendübel (Bild: Mantovani/Seidlitz, 2016)

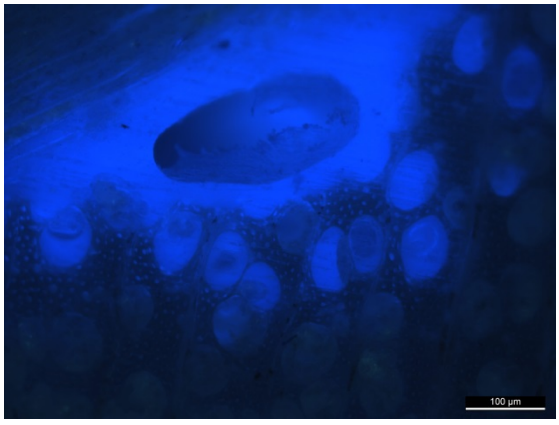


Abbildung 12 Übergang Klebstoff-Buchendübel (Bild: Mantovani/Seidlitz, 2016)

Das Volumenquellmass liegt bei der Buche mit α_V=17.9% deutlich höher als bei der Robinie mit α_V=11.4%[20]. Das im PVAc-Klebstoff enthaltene Wasser reicht bereits, um den Dübel Quellen zu lassen. Bei Buchendübel ist der Pressdruck aufgrund des grösseren Quellmasses um etwa 40% höher[21]. Die Klebstofffuge wird bei der Zugprüfung auf Scherung beansprucht. Diese Scherfestigkeit in der Fuge ist massgebend für die Belastbarkeit der gesamten Fenstereckverbindung.

Trotz der nichtsignifikanten Überlegenheit der Buche weist sie eine höhere Belastbarkeit, geringere Streuung und bessere Verklebbarkeit auf als Robinie.

3.4.2 Scherfestigkeit Bu/Ro Normklima

Wie aus der statistischen Auswertung hervorgeht, sind Robiniendübel bezüglich ihrer maximalen Scherbelastung nicht signifikant besser als Buchendübel.

Während bei der Zugbelastung die Festigkeit des Klebstoffs eine zentrale Rolle spielt, ist dessen Relevanz bei Scherbelastung deutlich kleiner. Grund dafür ist, dass die Klebstofffuge zwischen Dübel und Fensterkantel auf Druck und Zug belastet wird. Auch die Dübel sind auf Druck belastet. Die Fensterkantel ist bei Scherbelastung auf Querzug beansprucht. Die Querzugfestigkeit der Fensterkanteln ist zu klein, als dass die Druckfestigkeit der Dübel getestet würde. Diese liegt bei Robinie zwischen $\sigma_{D\perp}$=62 und 81 N/mm2, bei Buche zwischen $\sigma_{D\perp}$=42 und 99 N/mm2, wobei die Querzugfestigkeit der Fichte mit $\sigma_{Z\perp}$=1.5 bis 4 N/mm2 deutlich unter beiden Werten liegt.[22]

Die unterschiedlich grosse Streuung kann auf die Dichte der Fensterkanteln zurückgeführt werden. Gemäss Abbildung 14 liegt die grössere maximale Scherbelastung eindeutig bei den Prüfkörpern mit höherer Dichte[23].

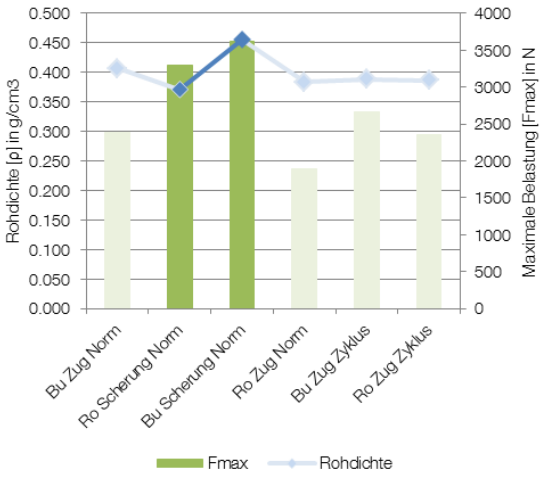


Abbildung 14 Zusammenhang F⊥ und Rohdichte der Fensterkantel bei Scherbelastung im Normklima (Grafik: Seidlitz, 2016)

[20] Ebd.
[21] Thomas Volkmer 2015.
[22] vgl. Rudi Wagenführ, 2000.
[23] vgl. Peter Niemz, 1993.

Da es sich bei der Messung um Stichproben handelt, entspricht der Mittelwert von F_{max} nicht dem Wert über alle Prüfkörper, weshalb die maximale Scherbelastung von Buche höher liegt als die der Robinie. Aufgrund der Belastungsrichtung in der Fensterkantel ist die Holzart der Dübel bei der Scherprüfung irrelevant. Folglich ist die Rohdichte der Fensterkantel massgebend.

3.4.3 Zugfestigkeit Bu/Ro Zyklusklima

Zwischen den maximalen Zugbelastungen von Buche und Robinie besteht statistisch eine signifikante Differenz. Somit darf die Nullhypothese verworfen werden.

Der Unterschied der Rohdichte zwischen den Fensterkanteln beträgt nur $\Delta\rho=2kg/m^3$, weshalb dieser Einflussfaktor vernachlässigt werden kann.

Die Temperatur von 40°C in Phase 2 und 3 ist entspricht einer schonenden Trocknungstemperatur. Wird dieser warmen Luft Feuchtigkeit beigefügt, ist dies für das Holz umso schonender. Demnach ist das Auffeuchten bei relativer Luftfeuchtigkeit von 90% weniger strapaziös als das nachfolgende Abtrocknen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30%. Wegen seiner verthyllten Struktur ist Robinie nur mässig gut zu trocknen[24], was in Bezug auf die Dübel bedeutet, dass weder beim Auffeuchten Feuchtigkeit eindringt noch anschliessend austritt. Die Buche passt sich dem Umgebungsklima schneller an, weshalb sie auch mehr quillt resp. schwindet. Der D4-Klebstoff von Collano (DW 2044) enthält neben seiner Grundkomponente Polyvinylacetat Phenolharz[25], weshalb er der Feuchtigkeit und Temperatur problemlos widerstehen kann[26].

Als Thermoplast ist PVAc bis zu seiner Zersetzung plastisch verformbar. Mit der Erwärmung beginnt der Klebstoff also leicht zu fliessen, wodurch er seine Oberfläche vergrössert und neue chemische Bindungen eingehen kann.

PVAc ist in niederen Alkoholen und Ketonen löslich[27]. Diese kommen in Form von Ethanol, Methanol und Aceton in der Robinie vor. Bei Erwärmen nehmen sie einen lösungsmittelähnlichen Zustand an[28]. Somit schwächen die austretenden Holzinhaltsstoffe die Festigkeit des Klebstoffs.

Eine Stärkung der Klebstofffestigkeit erfolgt besonders durch den Feuchtigkeitsentzug in der Trocknungsphase. Die Bindungslänge zwischen den Molekülen wird reduziert, wodurch die Bindungen starrer werden[29]. Während bei der Buche lediglich diese Art der Festigkeitszunahme vorliegt, hebt sie sich bei der Robinie durch deren Holzinhaltsstoffe auf. Dies führt zur signifikanten Überlegenheit der Buche über die Robinie.

[24] Jürgen Sell, 1989.
[25] Hans Stalder 2017.
[26] Collano AG, 2013
[27] Dietrich Braun, *2012*
[28] Dominic Juchli, 2017.
[29] Ebd.

3.4.4 Zugfestigkeit Bu Zyklus- und Normklima

Mit 8.35% Überschreitungswahrscheinlichkeit wird die Signifikanz nur knapp nicht erreicht.

Als Grund für den Unterschied zwischen norm- und zyklischer Klimabelastung gelten die Ansätze, die in den *Kapiteln 3.4 Diskussion* und *3.4.3 Zugfestigkeit Bu/Ro Zyklusklima* formuliert wurden. Die mittlere Belastbarkeit der Buche steigt bei nahezu gleichbleibender Streuung. Dies ist ihr grosser Vorteil und verschafft ihr in der Verarbeitung eine hohe Prozesssicherheit.

3.4.5 Zugfestigkeit Ro Zyklus- und Normklima

Zwischen der maximalen Zugbelastung der Fensterecken mit Robiniendübel vor und nach zyklischer Klimatisierung besteht kein signifikanter Unterschied. Die Festigkeit wird durch den Feuchteentzug erhöht, allerdings werden durch die Erwärmung die Inhaltsstoffe gelöst. Dadurch bleibt die mittlere Belastbarkeit gleich oder wird tendenziell schlechter, während die Streuung zunimmt.

3.5 Fazit

Sowohl die statistische Auswertung als auch die werkstofftechnischen Überlegungen attestieren der Buche mindestens Ebenbürtigkeit mit der Robinie. Mit der wechselhaften Klimatisierung, welche der Realität näherkommt als die Normklimatisierung, kann sich die Buche besser arrangieren als die Robinie. Letztere ist wegen ihrer Holzinhaltsstoffe in anderen Anwendungen zwar sehr dauerhaft, allerdings beim Einsatz in Fenstereckverbindungen nur bedingt geeignet. Ihre Inhaltsstoffe greifen den verwendeten Klebstoff an.

Da bei der Scherbelastung die Fensterkantel aus Fichte das limitierende Element ist, sind beide Holzarten gleichermassen geeignet. Bei Zugbelastung wird jedoch vor allem auch die Klebstofffuge getestet. Somit ist die Buche aufgrund ihrer weniger aggressiven Inhaltsstoffe und auch der grösseren Volumenquellung besser geeignet als die Robinie.

Eine Präzision der Resultate bedarf in Bezug auf die Art des Bruchs. Die Leimfuge besteht aus fünf Ebenen[30]: Dübel, Übergang Dübel-Klebstoff, Klebstoff, und Übergang Klebstoff-Kantel. Je nachdem, wo der Ort des Versagens liegt, resultieren unterschiedliche Aussagen bezüglich Eignung der verwendeten Komponenten.

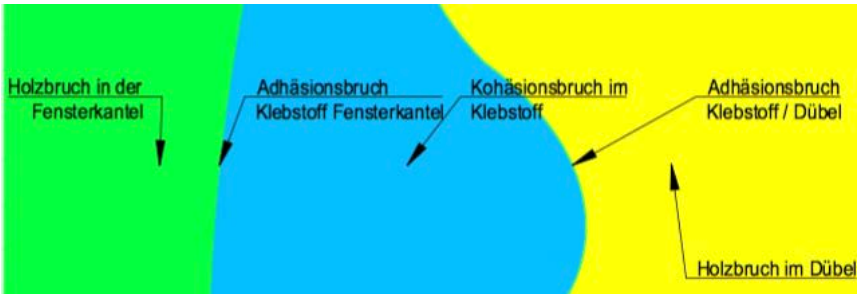


Abbildung 15 Ebenen, in denen die Klebeverbindung versagen kann (Bild: Seidlitz, 2017)

[30] Thomas Volkmer, 2016

4 Frühzugfestigkeit von Buchen- und Robiniendübeln

Angesichts der allseits geforderten Reduktion nicht wertschöpfender Tätigkeiten wäre eine geringere Abbindzeit des Klebstoffs ein willkommenes Argument für Buchendübel.

4.1 Einleitung

Es wird untersucht, ob die Verklebbarkeit von Buchendübeln aufgrund ihrer unterschiedlichen beziehungsweise abwesenden Inhaltsstoffe im Vergleich zu Robiniendübeln besser ist. Dies wird festgestellt, indem die Dübel 15 Minuten[31]&[32] nach der Verklebung in die liegende Fensterkantel durch die Prüfvorrichtung aus den Fensterkanteln gezogen werden.

4.2 Material und Methoden

Die Untersuchung der Frühzugfestigkeit basiert auf keiner Norm oder Richtlinie und hat eine qualitative Beurteilung der Buchen- und Robiniendübel zum Ziel. Die Versuchsdurchführung wurde zusammen mit dem betreuenden Dozierenden Urs Uehlinger definiert und lehnt sich an gängige Zugversuche, zum Beispiel DIN 52377.

4.2.1 Materialisierung der Prüfkörper

Die Prüfkörper sind wie folgt aufgebaut. Die Informationen sind aus dem Lieferschein von Wenger Fenster im Anhang *Kapitel 9.6.4 Lieferschein* zu finden.

Tabelle 14 Materialisierung der Prüfkörper des Versuchs Frühzugfestigkeit

Materialisierung

Material	Bezeichnung	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Anzahl [Stk]
Kantel	Fichte kvz	600	68	77	1
Dübel	Bu oder Ro	60	8		12
Klebstoff	Collano DW2044				1

4.2.2 Nummerierung der Prüfkörper

Die Kanteln werden mit den Buchstaben A und B gekennzeichnet. Dabei steht A für Buche und B für Robinie. Die einzelnen Bohrungen erhalten die Nummern A1-A12 bzw. B1-B12.

[31] Collano AG, 2013
[32] Beat Werfeli und Lukas Pirkheim, 2016

4.2.3 Vorbereitung der Prüfkörper

Tabelle 16 Taktzeit der Bu Prüfkörper

Frühzugfestigkeit Buche

Probe	Taktzeit [min]	Uhrzeit Beleimung [hh:mm]	Uhrzeit Prüfung [hh:mm]
B.1	3	14.38	14.53
B.2	3	14.41	14.56
B.3	3	14.44	14.59
B.4	3	14.47	15.06
B.5	3	14.50	15.09
B.6	3	14.53	15.12
B.7	3	15.15	15.3
B.8	3	15.18	15.33
B.9	3	15.21	15.36
B.10	3	15.24	15.39
B.11	3	15.27	15.42
B.12	3	15.30	15.45

Tabelle 15 Taktzeit der Ro Prüfkörper

Frühzugfestigkeit Robinie

Probe	Taktzeit [min]	Uhrzeit Beleimung [hh:mm]	Uhrzeit Prüfung [hh:mm]
A.1	3	14.20	14.35
A.2	3	14.23	14.38
A.3	3	14.26	14.41
A.4	3	14.29	14.44
A.5	3	14.32	14.47
A.6	3	14.35	14.5
A.7	3	14.53	15.08
A.8	3	14.56	15.11
A.9	3	14.59	15.14
A.10	3	15.02	15.17
A.11	3	15.05	15.2
A.12	3	15.08	15.23

Unterschiedliche Einwirkzeiten des Klebstoffs führen zu unterschiedlichen Festigkeiten der Prüfkörper. Deshalb ist es wichtig, dass die Verklebung der Dübel mit den Fensterkanteln getaktet erfolgen und die festgelegten Prüfzeiten genau eingehalten werden. In obenstehenden Tabellen ist ersichtlich, zu welcher Zeit die Verklebung sowie die Zugprüfung stattfindet.

4.2.4 Konditionierung der Prüfkörper

Die Fensterkanteln werden nach Eintreffen im Prüflabor bis zur Prüfung bei Normklima gelagert. Die durchschnittliche Holzfeuchte sollte 13±2% betragen.

4.2.5 Maschinelle Vorbereitungen

- Hobeln der Fensterkanteln (77 x 68mm) auf die Abmessung 77 x 62mm
- Bohrung von 12 Löchern Ø 8mm an der liegenden Kantel

4.2.6 Prüfeinrichtung

Die Prüfung erfolgt auf der Universalprüfmaschine Zwick/Roell Z050 (Interne Nr.: 36.9489) des Werkstoffprüflabors im Technologiepark der Berner Fachhochschule, Fachbereich Holz am Standort Biel.

Die Prüfvorrichtung umfasst folgende Komponenten:

- stationäre Anlage Zwick/Roell Z050
- stationärer Rechner zur Aufzeichnung der Daten während der Prüfung
- Einspannvorrichtung

Die Einspannvorrichtung gliedert sich in den fixen, unteren und den verschieblichen, oberen Teil. Mit zunehmender Zugbelastung erhöht sich die Spannung im Spannbackenaggregat, welches am oberen, verschieblichen Teil installiert wird. Dadurch ist eine aufwändige Einspannvorrichtung überflüssig, was sich aufgrund der hohen Probenanzahl bei vorgegebener Taktzeit äusserst vorteilhaft auswirkt.

4.2.7 Versuchsaufbau

Zur Prüfung wird eigens ein Versuchsaufbau entworfen. Die Bohrungen werden im Abstand von 60mm mittig angebracht und sind 30mm tief. Die Dübel sind somit bis zur Hälfte in die Kantel versenkt. Der Klebstoff Collano DW 2044 wird mithilfe einer Pipette in einer Menge von 1g in die Bohrung appliziert.

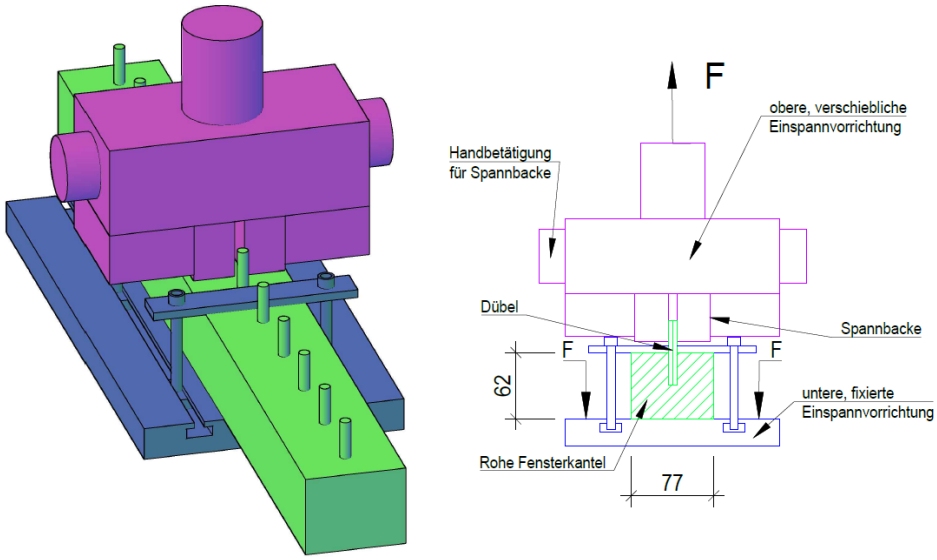


Abbildung 16 Versuchsaufbau der Frühzugfestigkeitsprüfung (Bild: Seidlitz, 2017)

4.2.8 Methode

Bei der Prüfung werden die Spannbacken manuell angezogen. Die Vorkraft beträgt 20N. Die Stichprobengrösse umfasst 12 Stück je Holzart, wobei eine zusätzliche Kantel als Testexemplar mit je 6 Dübeln pro Holzart verwendet wird. Diese dient zum Bestimmen der geeigneten Vorkraft. Abgeglichen mit gängigen Normen sollte sie bei Zugversuchen so hoch sein, dass die Verbindung bei 90±30s versagt.

4.3 Resultate

Aus den Ergebnissen fällt auf, dass die Mittelwerte in ähnlichen Bereichen liegen. Die Standardabweichungen sind sehr hoch, was zu einer entsprechend hohen Streuung führt. Die Einzelergebnisse der Prüfkörper unterliegen einer extrem grossen Schwankung.

Tabelle 17 Ergebnisse der Frühzugfestigkeit von Bu und Ro

Frühzugfestigkeit				
	Bu		Ro	
	Probe	Fmax [N]	Probe	Fmax [N]
	A.1	62.9	B.1	123
	A.2	164	B.2	218
	A.3	53.5	B.3	83
	A.4	178	B.4	157
	A.5	165	B.5	253
	A.6	206	B.6	94.5
	A.7	241	B.7	289
	A.8	256	B.8	412
	A.9	660	B.9	198
	A.10	132	B.10	413
	A.11	133	B.11	409
	A.12	477	B.12	164
Mittelwert		227.4		234.5
Standardabweichung		167.5		117.2
Variationskoeffizient		74%		50%

4.4 Diskussion

Werden die Mittelwerte der Frühzugfestigkeit direkt miteinander verglichen, ergibt sich für die Robinie ein leicht höherer Wert. Dadurch, dass die Standardabweichung bei beiden Holzarten in ähnlichem Bereich wie der Mittelwert liegt, resultiert eine absurd hohe Streuung. Dieser Umstand macht eine Aussage bezüglich Frühzugfestigkeit unmöglich.

Die ohnehin geringe Festigkeit ist auf die kurze Abbindzeit des Klebstoffs zurückzuführen. Bei diesem Versuch fungiert der Klebstoff als Gleitmittel, welches die Reibungskraft innerhalb der Dübelverbindung drastisch senkt. Wegen der geringen Belastbarkeit kann die Prüfzeit von 90±30 Sekunden selbst bei niedrigster Einstellung der Vorkraft und –zeit nicht eingehalten werden. Der Kraftabfall erfolgt jeweils schon bei 10 Sekunden, wie in den Protokollen im Anhang *Kapitel 5.7 und 5.8* ersichtlich ist.

Verwendeter Versuchsaufbau ist folglich nicht geeignet für die Beurteilung der Frühzugfestigkeit von Buchen- und Robiniendübeln. Die Ergebnisse beschreiben eine vage Tendenz, jedoch ist unter keinen Umständen eine abschliessende Aussage möglich.

5 Reflexion

Dieser Arbeit lag die Hauptfrage zugrunde: „Sind Buchendübel in Fenstereckverbindungen besser geeignet als Robiniendübel?“ Auf dem Weg zu einer abschliessenden Antwort erschwerten einige Stolpersteine die lineare Vorgehensweise.

Das Arbeiten gemäss der ift Richtlinie gestaltete sich schwieriger als zunächst angenommen. Sie bezieht sich auf die Tauglichkeit des gesamten Fensters, während in vorliegender Projektarbeit der Fokus beim konkreten Vergleich zwischen Buchen- und Robiniendübel in Fenstereckverbindungen liegt. Das verwendete Fenster und die Verglasungsart sind dabei zweitrangig. Die Richtlinie diente somit lediglich als Grundlage für die vorbereitenden Arbeiten, während die Auswertungen nach Vorbild interner Prüfberichte und Aneignung statistischer Vergleichsmöglichkeiten erfolgte. Das Synthetisieren der verschiedenen Einflüsse forderte die methodengetriebene Herangehensweise eines Ingenieurs resp. einer Ingenieurin. Schliesslich entpuppte sich dies als eigentliche Herausforderung der Projektarbeit.

Die Holzfeuchtigkeitsbestimmung über den elektrischen Widerstand konnte nicht normgetreu durchgeführt werden. Die entlang der Faserrichtung eingeschlagenen Elektroden verfälschten die Messergebnisse teilweise drastisch. Beim Hersteller des elektrischen Holzfeuchtigkeitsmessgeräts existiert kein Korrekturwert. Über die Differenz zu einigen Referenzproben, welche mittels Darrverfahren getestet wurden, konnte letztlich ein solcher errechnet werden. Um dem dadurch entstandenen Mehraufwand Rechnung zu tragen, erhielt die korrekte Ermittlung der Holzfeuchtigkeit ein eigenes Kapitel in den vorbereitenden Arbeiten.

Eine Herausforderung stellte sich ausserdem durch das enge vordefinierte Zeitfenster, in welchem die Prüfungen vonstattengehen mussten. Dies manifestiert sich zum einen in der dichten Belegung des Werkstoffprüflabors, zum anderen in den nicht durchgängig geregelten Zuständigkeiten für die Anlagen. Beide Umstände führten zu kurzfristigen Umdisponierungen während der Konditionierungsphase und Verzögerung des Stichdatums für die Versuchsdurchführung.

Die Resultate entsprechen mit Ausnahme der Scherfestigkeit (Norm) und der Zugfestigkeit (Zyklusklima) unseren Erwartungen. Wie die Belastungssituation zeigt, testet die Scherprüfung de facto die Querzugfestigkeit der Fensterkantel. Aus der Literatur geht hervor, dass die Holzinhaltsstoffe der Robinie generell Dauerhaftigkeit verleihen, beim Einsatz in Fenstereckverbindungen den Klebstoff jedoch schädigen. Daher sind auch diese beiden Prüfergebnisse einleuchtend.

Wir betrachten diese Projektarbeit als initiierender Impuls, gewohnheitsbedingte Strukturen in der Fensterbranche und darüber hinaus kritisch zu hinterfragen. Das Potenzial des Themas ist jedoch noch lange nicht ausgeschöpft. Im *Kapitel 6 Ausblick* sind Gebiete mit Handlungsbedarf aufgeführt, die in einer nächsten Versuchsreihe prioritär behandelt werden müssen.

6 Ausblick

Auch wenn sich eine Arbeit wie diese natürlicherweise laufend entwickelt und verändert, bedarf es einer Systematik, welche in einer nächsten Arbeit übersichtlicher und anpassungsfähiger aufgebaut ist.

Zunächst sollte eine einfache, kontinuierliche Holzfeuchtigkeitsmessung gewährleistet sein. Sei dies durch breitere Fensterprofile oder mithilfe eines geeigneten Messgeräts.

In puncto Holzart der Dübel wäre es aufgrund des unterschiedlichen Volumenquellmasses von Interesse, die exakte Dimension festzustellen, zumal sie von unterschiedlichen Herstellern und folglich unterschiedlichen Produktionsabläufen entstammen. Eine geringe Differenz des Dübeldurchmessers kann in der vom Bearbeitungszentrum identischen Bohrung ein grosser Unterschied im Quelldruck verursachen. Denkbar wäre dies durch die Messung mittels Messschiebers.

Die in der Literatur angegebenen prozentualen Anteile an Holzinhaltsstoffen bei Robinie und Buche deuten zwar eine gewisse Verhaltenstendenz an, jedoch bedarf es einer quantitativen Messung anhand der Prüfkörper. Nur so kann eine exakte Abhängigkeit der Prüfergebnisse von den Holzinhaltsstoffen hergeleitet werden.

Allgemein betrachtet ist die Stichprobengrösse 12 für eine studentische Arbeit ausreichend, jedoch für eine materialspezifische Untersuchung eher knapp kalkuliert. Ausreisser sind nicht selten und können in Anbetracht der vielen beeinflussenden Faktoren schwierig einer Ursache zugewiesen werden. Mit der Erhöhung der Stichprobe verkleinern sich in der Regel die Streuungen und die Ergebnisse sind besser prognostizierbar.

Schlussendlich, und dies gilt es in einer nächsten Versuchsreihe besonders zu beachten, ist die präzise Beurteilung des Bruchbilds von höchster Bedeutung. Da die klassische Leimfuge einer Holz-Holz-Verbindung aus fünf Bereichen besteht, kann der Bruch fünf limitierenden Faktoren entspringen. Auf diese wirken wiederum eine Vielzahl von Einflüssen aus Verarbeitung und Verwendung.

Unter Berücksichtigung dieser Punkte ist es möglich, die Thematik „Buche oder Robinie in Fenstereckverbindungen“ tiefer zu erforschen.

7 Empfehlung

Die Empfehlung richtet sich an Eicher Holzwaren AG, welche bereits im Vorfeld eine Stellungnahme bezüglich ihrer Buchen Riffeldübel gewünscht hat. Sie ist das Produkt einer studentischen Projektarbeit, welche in enger Zusammenarbeit mit den Dozierenden Martin Wiederkehr und Urs Uehlinger entstanden ist. Der Auftrag lautete, die Eignung von Buchen- mit Robiniendübel in Fenstereckverbindungen materialwissenschaftlich zu vergleichen. Die Arbeit ist nach wissenschaftlichen Kriterien basierend auf der ift Richtlinie für Fensterprüfungen aufgebaut. Sie schreibt Scher- und Zugversuche vor. Diese wurden im akkreditierten Prüflabor der Berner Fachhochschule durchgeführt. Aufgrund des studentischen Ursprungs der Projektarbeit kann die Berner Fachhochschule nicht belangt werden.

Die Prüfkörper wurden gemäss ift Richtlinie FE-08/1 unter Normklima vorkonditioniert. Neben dieser Normklimatisierung wurden Zugprüfungen nach zyklischer Klimatisierung durchgeführt. Diese imitierte die realen Witterungsverhältnisse und muss demnach prioritär behandelt werden. Nachfolgend sind die Ergebnisse der durgeführten Versuche aufgeführt:

Tabelle 18 Auflistung der Prüfergebnisse und statistische Auswertung

		Zugbelastung								Scherbelastung	
		Normklima		Zyklusklima		Norm /Zyklus		Norm /Zyklus		Normklima	
		Bu	Ro	Bu	Ro	Bu Norm	Bu Zyklus	Ro Norm	Ro Zyklus	Bu	Ro
Mittelwert x	[N]	2532	2188	3071	1974	2532	3071	2188	1974	3678	3894
Standardabweichung s	[N]	440	697	749	729	440	749	697	729	531	945

Überschreitungswahrscheinlichkeit	[%]	16.17	0.15	8.32	52.54	49.58
Signifikanz	-	**nein**	**ja**	**nein**	**nein**	**nein**

Aus statistischer Sicht ist die Buche nach zyklischer Klimatisierung signifikant (Überschreitungswahrscheinlichkeit ≤ 5%) besser für den Einsatz in Fenstereckverbindungen geeignet. Bei den übrigen Ergebnissen unterscheidet sich die Buche nicht signifikant von der Robinie.

Die materialtechnische Betrachtung erlaubt eine differenziertere Aussage. Unter zyklischer Klimabelastung gehen die Holzinhaltsstoffe aus dem Robiniendübel in einen lösungsmittelartigen Zustand über und greifen den Klebstoff an. Es resultiert eine schlechtere Zugbelastbarkeit. Bei Scherbelastung versagen die Fensterkanteln ausnahmslos vor den Dübeln. Dabei werden die Dübel auf Druck und die Fensterkanteln auf Querzug belastet. Die Querzugfestigkeit von Fichte liegt deutlich unter der Druckfestigkeit von Buche und Robinie. Daher spielt die Holzart der Dübel in der auf Scherung belastete Verbindung keine Rolle.

Angesichts der erhaltenen Ergebnisse kann den Buchendübeln der Eicher Holzwaren AG Ebenbürtigkeit mit den Robiniendübeln des Maschinenherstellers Weinig AG attestiert werden. Entscheidend ist hierbei das Verhalten gegenüber wechselhafter Klimabelastung, welche die realen Witterungsverhältnisse simuliert.

8 Verzeichnisse

8.1 Glossar

Begriffe, die in vorliegender Arbeit unterstrichen sind, werden zur Abgrenzung und für das bessere Verständnis des Lesers definiert.

Schlüsselwort	Bezeichnung
Ausgleichsfeuchtigkeit	Die Ausgleichsfeuchtigkeit ist diejenige Wassermenge, die sich in einem hygroskopischen Material nach längerer Lagerung in einer Umgebung mit konstanter Luftfeuchtigkeit und Temperatur einstellt.
Alternativhypothese (H_A)	In der Statistik beschreibt die Alternativhypothese (H_A) eine durch Überlegungen begründete Annahme über die Verteilung der Einzelwerte einer Stichprobe. Eine statistische Untersuchung hat häufig zum Ziel, zu zeigen, dass es zwischen den Einzelwerten zweier oder mehreren Stichproben einen Unterschied gibt. Dies wird in der Alternativhypothese (H_A) formuliert.
Nullhypothese (H_0)	Die Nullhypothese (H_0) steht der Alternativhypothese gegenüber und beschreibt eine Annahme über die Verteilung der Einzelwerte einer Stichprobe. Sie enthält die Annahme über die Gleichheit von Ergebnissen, zum Beispiel, dass zwischen den Resultaten zweier Stichproben keinen Unterschied besteht. Alternativ- und Nullhypothese decken zusammen alle möglichen Ergebnisse ab. Ziel einer statistischen Untersuchung ist es, die Nullhypothese zu verwerfen.
Normalverteilung	Die Normalverteilung ist die wichtigste Wahrscheinlichkeitsverteilung von Ergebnissen einer Stichprobengrösse. Dargestellt wird sie in einer Glockenkurve, wobei der Erwartungswert das lokale Maximum bildet. Alle anderen Ergebnisse sind wie folgt um den Erfahrungswert verteilt: - Im Intervall der Standardabweichung vom Erfahrungswert sind 68% aller Ergebnisse zu finden - Im Intervall der doppelten Standardabweichung vom Erfahrungswert sind 95% aller Ergebnisse zu finden - Im Intervall der Abweichung vom Mittelwert sind 99% aller Messwerte zu finden
t-Test	In der Statistik eignet sich der t-Test, um die Erwartungswerte (Mittelwerte) zweier oder mehrerer Stichproben mit n Datenpunkten unter gleichen Bedingungen zu vergleichen.

ANOVA-Test	In der Statistik eignet sich der ANOVA-Test, um die Erwartungswerte (Mittelwerte) zweier oder mehrerer Stichproben mit n Datenpunkten unter dem Einwirken von einem oder mehreren Einflussfaktoren. Damit lassen sich die Varianzen der Stichproben vergleichen. Unterscheiden sich die Ergebnisse signifikant, kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb der Stichproben unterschiedliche Gesetzmässigkeiten gelten, die durch den Einflussfaktor hervorgerufen werden. In vorliegender Arbeit treffen die statistischen Bezeichnungen auf folgende Parameter zu: - Stichproben: Bu und Ro - Datenpunkte: 12 (Stichprobengrösse) - Einflussfaktor: Klima
Mittelwert (Erwartungswert)	Der Erwartungswert ergibt sich als Quotient aus der Summe der Ergebnisse einer Stichprobe und ihrer Anzahl. Er bildet also den Durchschnitt der Ergebnisse. Für die statistischen Versuche dieser Arbeit gilt: - Summe der Ergebnisse: Summe der aufnehmbaren Belastungen (Zug und Scherung) - Anzahl Stichproben: 12 Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit ausschliesslich der Ausdruck Mittelwert verwendet.
Standardabweichung (Stichprobenvarianz)	Unter der Stichprobenvarianz versteht man die durchschnittliche Streuung von n Datenpunkten zu ihrem Erwartungswert. Sie bildet sich aus der Wurzel der Varianz und hängt daher eng mit ihr zusammen. Grundsätzlich gilt: Je höher die Standardabweichung, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass das Ergebnis eines einzelnen Datenpunkts weit weg vom Erwartungswert liegt. Der Einfachheit halber wird in dieser Arbeit ausschliesslich der Ausdruck Standardabweichung verwendet.
Varianz	Die Varianz beschreibt ein weiteres Mass dafür, wie fest das Ergebnis eines Datenpunkts zum Erwartungswert der Stichprobe streut. Trotz des engen Zusammenhangs zur Standardabweichung unterscheidet sich die Varianz in ihrer Dimension; sie wird im Quadrat angegeben.
Variationskoeffizient	Im Gegensatz zur Varianz ist der Variationskoeffizient ein relatives Streuungsmass. Aus unterschiedlichen Erwartungswerten der Stichproben könnten gleiche Standardabweichungen und Varianzen resultieren; die jedoch nicht miteinander verglichen werden dürfen. Es bedarf einer Relation zwischen Standardabweichung und Erwartungswerten, die erreicht wird, indem der Quotient aus der Standardabweichung und dem Erwartungswerten gebildet wird. Der Faktor wird häufig in Prozent angegeben und beschreibt die prozentuale Streuung des Erwartungswertes einer Stichprobe.

p-Wert (Überschreitungs-wahrscheinlichkeit)	Der p-Wert gibt an, wie extrem die Ergebnisse einer Stichprobe sind. Er deutet an, wie wahrscheinlich es ist, dass die Nullhypothese (H_0) zutrifft. Je kleiner der p-Wert, desto mehr spricht dafür, dass sie verworfen werden kann. Die Festlegung der p-Wert-Grenze erfolgt in jedem statistischen Test individuell, jedoch haben sich für typische Tests wie der t-Test und ANOVA p-Werte von 5% festgelegt.
Signifikanz	Falls eine statistische Untersuchung ergibt, dass sich die Ergebnisse zweier oder mehrerer Stichproben so stark voneinander unterscheiden, dass die Nullhypothese verworfen werden kann, spricht man von einem signifikanten Unterschied.
Boxplot	Der Boxplot ist eine Darstellungsform von Ergebnissen einer Stichprobe. Mithilfe der im Boxplot enthaltenen Informationen sind die Verteilungen der Ergebnisse gut sichtbar und können mit denjenigen anderen Stichproben verglichen werden. Folgende Begrenzungen zeichnen sich im Boxplot ab: - Der Median in der Mitte des Kastens - Das obere und untere Quartil an den Enden des Kastens - Der obere und untere Extremwert an den beiden Antennen des Kastens
Inhaltsstoffe	Der Begriff beschreibt alle chemischen Stoffe, die neben der allgemeinen Holzstruktur bestehend aus Lignin, Zellulose, Hemizellulose und anderen Zuckern in der Holzart vorkommen. Im weiteren Sinne werden die Bestandteile der allgemeinen Holzstruktur ebenfalls zu den Holzinhaltsstoffen gezählt.
Collano DW 2044	Der von Wenger Fenster AG verwendete Klebstoff ist ein lösemittelfreier, wasser- und wärmefester, auf einer PVAc-Dispersion basierender 1K-Holzklebstoff.[33]
PVAc	Polyvinylacetat ist ein thermoplastischer Kunststoff, der in Weissleimen wie der Holzklebstoff Collano DW 2044 als Bindemittel eingesetzt wird. Aufgrund der tiefen Glasübergangstemperatur geht das PVAc schnell in den festen Zustand über. Diese Eigenschaft zeichnet den Holzklebstoff aus.
Physikalisches Abbinden	Die physikalische Austrocknung eines Klebstoffs erfolgt durch das Prinzip der Bildung von Wasserstoffbrücken zwischen den Hydroxylgruppen der Zellulose und den Acetylgruppen des Bindemittels (PVAc).

[33] Collano AG, „Produktdatenblatt Collano DW 2044“.

8.2 Literaturverzeichnis

Beat Werfeli 2015.
CH - Riffeldübel Buche im Einsatz als statisches Verbindungselement im traditionellen und industriellen Holz-Fensterbau der Schweiz. Aktennotiz, 14. Dezember 2015

Beat Werfeli und Lukas Pirkheim 2016.
Auftrag Studentenarbeit BFH – Vergleich Riffeldübel. Verfasst am 22. Juni 2016. Eingegangen an der BFH AHB Biel am 27. Juni 2016

Bernhard Bieri 2016.
BFH Prüfecken Dübeleckverbindung. Internes Laufblatt von Wenger Fenster AG, 13. Oktober 2016

Collano AG 2013.
Produktdatenblatt Collano DW 2044.
http://www.collano.com/datenblaetter/d/TDB/D_Collano_DW_2044.pdf, Stand: Juli 2013, abgerufen am 16. Dezember 2016

Dietrich Braun 2012.
Erkennen von Kunststoffen - Qualitative Kunststoffanalyse mit einfachen Mitteln. 5. aktualisierte und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, erschienen im August 2012

Marc Donzé 2012.
Festigkeitsuntersuchung Flügelecke. Prüfbericht 9128-PB-02. BFH AHB Biel, Schweiz. Verfasst am 23.2.2012

Frédéric Pichelin 2015.
Klebstofftechnik. Skript zur Vorlesung, verfasst im HS 2015/16

Fred Wenger 2016.
Besprechung Projektarbeit Robinien vs Buchendübel, Auftragsdefinition Wenger Fenster AG, 7. Oktober 2016

GANN HYDROMETTE o. J.
Produktblatt elektrisches Holzfeuchtigkeitsmessgerät. Bedienungsanleitung M 4050, http://www.gann.de/Portals/0/Attachments/BA_1400_V11.04_DE.pdf, abgerufen am 16. Dezember 2016

Huber-Eicher, Beat 2015a.
Einführung in die statistische Analyse von geplanten Versuchen. Skript zur Vorlesung, unveröffentlicht BUUm014, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Berner Fachhochschule BFH, Zollikofen. Stand: Dezember 2016

Huber-Eicher, Beat 2015b.
Varianz- und Regressionsanalyse. Skript zur Vorlesung, unveröffentlicht BUUm014, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Berner Fachhochschule BFH, Zollikofen. Stand: Dezember 2016

ift Rosenheim, 2008.
Rahmeneckverbindungen für Holzfenster – Anordnung, Prüfung und Bewertung. Richtlinie FE-08/1. Veröffentlicht im Mai 2008, Stand: 27. November 2012

Lukas Pirkheim, 2015.
Eignungsbestätigung resp. Zertifikat für Dübel aus Buche. Anschreiben vom 16. März 2015

Niemz, Peter 1993.
Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. 1. Auflage, DWR-Verlag, Dresden, Deutschland

Sell, Jürgen 1989.
Eigenschaften und Kenngrössen von Holzarten. 3. Auflage, Lignum Baufachverlag, Zürich, Schweiz

Volkmer, Thomas 2015.
Werkstoffkunde Holzphysik. Skript zur Vorlesung, verfasst im HS 2015/2016, zugegriffen im Dezember 2016

Wagenführ, Rudi 2000.
HOLZatlas. 5. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, Carl Hanser Verlag, Dresden, Deutschland

Wenger, Fenster 2016.
Niesen Standard 72 2-fach – Technische Daten. Datenblatt AU.4.07.71, http://www.wenger-fenster.ch/images/content/produkte/download/datenblaetter/AU-4.07.71TechnischeDatenNiesenStandard722-fach_1477663613.pdf, aktualisiert am 17. Oktober 2016, abgerufen am 23. November 2016

Wiederkehr, Martin 2015.
Festigkeitsuntersuchung Fensterflügel-Eckverbindungen. Prüfbericht 73FE–006531–L–01–PB–03. BFH AHB Biel, Schweiz. Verfasst am 12. Juni 2012

8.3 Mündliche Quellen

Juchli, Dominic. Fachgespräch bezüglich chemischem Verhalten von Holzbestandteilen mit Dominic Juchli, 3. Januar 2017.

Stalder, Hans. Telefon-Interview mit Collano AG. Telefon, 3. Januar 2017.

Volkmer, Thomas. Fachgespräch mit Thomas Volkmer, 3. Dezember 2016.

8.4 Bildnachweis

Die Abbildungen in folgendem Verzeichnis sind geordnet nach Eigentümer des Bildes, Erscheinungsjahr, Name des Bildes, Quelle und Datum der Quelle.

Abbildung 1: Bild: ift Richtlinie Rosenheim FE-08/1 (2008): Belastungssituation am Fensterflügel. Stand: 27.11.2012
Bildmontage: Mantovani/Seidlitz (2017): Belastungssituation am Fenster. Bearbeitet im Januar 2017

Abbildung 2: Nicolas Seidlitz (2016): Holzfeuchtigkeit in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit. Excel Resultatauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 3: Bernhard Bieri (2016): Profilquerschnitt und Dübelposition des Fenstertyps Niesen Standard. AutoCAD Zeichnung, im Oktober 2016

Abbildung 4: Nicolas Seidlitz (2016): Versuchsaufbau links Zug und rechts Scherung. AutoCAD Zeichnung in Anlehnung an interner Prüfbericht 9128-PB-02 (2012) und ift Richtlinie Rosenheim FE-08/1 (2008), im Dezember 2016

Abbildung 5: Camilla Mantovani (2016): Boxplot Zugfestigkeit Bu/Ro, Normklima. NCSS 9 Prüfungsauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 6: Camilla Mantovani (2016): Boxplot Scherfestigkeit Bu/Ro, Normklima. NCSS 9 Prüfungsauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 7: Camilla Mantovani (2016): Boxplot Zugfestigkeit Bu/Ro, Zyklusklima. NCSS 9 Prüfungsauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 8: Camilla Mantovani (2016): Boxplot Zugfestigkeit Bu/Bu, Norm- und Zyklusklima. NCSS 9 Prüfungsauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 9: Camilla Mantovani (2016): Boxplot Zugfestigkeit Ro/Ro, Norm- und Zyklusklima. NCSS 9 Prüfungsauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 10: Nicolas Seidlitz (2016): Zusammenhang Fmax und Holzfeuchtigkeit der Fensterkanteln bei Versuchsdurchführung. Excel Resultatauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 11: Nicolas Seidlitz (2016): Zusammenhang von Fmax und Rohdichte der Fensterkanteln bei Zugbelastung im Normklima. Excel Resultatauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 12: Camilla Mantovani/Nicolas Seidlitz (2016): Übergang Klebstoff-Robiniendübel. UV-Mikroskopieaufnahme im Chemielabor der BFH AHB Standort Biel, im Dezember 2016

Abbildung 13: Camilla Mantovani/Nicolas Seidlitz (2016): Übergang Klebstoff-Buchendübel. UV-Mikroskopieaufnahme im Chemielabor der BFH AHB Standort Biel, im Dezember 2016

Abbildung 14: Nicolas Seidlitz (2016): Zusammenhang Fmax und Rohdichte der Fensterkantel bei Scherbelastung im Normklima. Excel Resultatauswertung, im Dezember 2016

Abbildung 15: Nicolas Seidlitz (2017): Ebenen, in denen die Klebeverbindung versagen kann. AutoCAD Zeichnung, im Januar 2017

Abbildung 16: Nicolas Seidlitz (2017): Versuchsaufbau der Frühzugfestigkeitsprüfung. AutoCAD Zeichnung, im Januar 2017

8.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Verwendete Literatur 5
Tabelle 2 Klimatisierung der Serien 5 und 6 vor der Zug- und Scherprüfung 6
Tabelle 3 Eigenschaften der zu prüfenden Serien 7
Tabelle 4 Daten der Holzfeuchtigkeitsmessungen 8
Tabelle 5 Produktbezeichnungen zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeiten 8
Tabelle 6 korrigierte Holzfeuchtigkeiten der Serien 5 und 6 während der Zyklusklimatisierung . 10
Tabelle 7 Differenz der Holzfeuchtigkeitsmessungen mittels Darrprobe und elektrisch 9
Tabelle 8 Holzfeuchtigkeit vor der Prüfung, elektrisch gemessen abzüglich Korrekturwert 9
Tabelle 9 Materialisierung der Prüfkörper der Versuche Zug- und Scherfestigkeit 12
Tabelle 10 Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen 15
Tabelle 11 Ergebnisse Zugfestigkeit Bu/Ro, Normklima 16
Tabelle 12 Ergebnisse Scherfestigkeit Bu/Ro, Normklima 17
Tabelle 13 Ergebnisse Zugfestigkeit Bu/Ro, Zyklusklima 18
Tabelle 14 Ergebnisse Zugfestigkeit Bu/Bu, Norm- und Zyklusklima 19
Tabelle 15 Ergebnisse Zugfestigkeit Ro/Ro, Norm- und Zyklusklima 20
Tabelle 16 chemische Zusammensetzung von Buche und Robinie zitat 22
Tabelle 17 Materialisierung der Prüfkörper des Versuchs Frühzugfestigkeit 27
Tabelle 18 Taktzeit der Ro Prüfkörper 28
Tabelle 19 Taktzeit der Bu Prüfkörper 28
Tabelle 20 Ergebnisse der Frühzugfestigkeit von Bu und Ro 30
Tabelle 21 Auflistung der Prüfergebnisse und statistische Auswertung 33

8.6 Formelverzeichnis

Formel 1 Berechnung der Holzfeuchtigkeit im Darrverfahren 7
Formel 2 Verwendete Formeln des NCSS 9 Programms 15