

Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft

Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg

Arbeitsbericht

aus dem

Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes

Nr. 2001/5

Juli 2001

Verklebung einheimischer dauerhafter Holzarten zur Sicherung von Marktbereichen im Außenbau

von

B. Pitzner, A. Bernasconi, A. Frühwald

**Bundesforschungsanstalt
für Forst- und Holzwirtschaft**

und die

Ordinariate für Holzbiologie,
Holztechnologie und Weltforstwirtschaft der

UNIVERSITÄT HAMBURG



E-Mail: pitzner@holz.uni-hamburg.de



Vorwort

Dieses Forschungsvorhaben des Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg, und dem Ordinariat für Holztechnologie der Universität Hamburg, wurde über die DGfH Innovations- und Service GmbH, München, aus Mitteln des Holzabsatzfonds, Bonn, gefördert (DGfH-Az.: G-1999/18). Dieser Arbeitsbericht macht die gewonnenen Ergebnisse allen Interessierten zugänglich.

An dieser Stelle sei dem Holzabsatzfonds für die Finanzierung des Vorhabens und allen Firmen, die Untersuchungsmaterial zur Verfügung gestellt haben, gedankt.

Dipl. -Holzwirtin Birte Pitzner, Dr. Andrea Bernasconi und Prof. Dr. Arno Frühwald

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Untersuchungsprogramm	3
2.1	Holzarten	3
2.1.1	Eiche	3
2.1.2	Robinie	3
2.1.3	Douglasie	3
2.1.4	Lärche	4
2.2	Holzfeuchte	4
2.3	Klebstoffe	4
2.3.1	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF)	5
2.3.2	Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz (PRF)	5
2.3.3	Polyurethanklebstoff	6
2.3.4	Epoxidharz	6
2.4	Prüfmethoden	7
2.4.1	Systematische Untersuchungen an Kleinproben	7
2.4.1.1	Druckscherversuche	8
2.4.1.2	Querzugversuche	9
2.4.2	Untersuchungen an größeren Elementen	9
2.4.2.1	Keilgezinkte Stöße	10
2.4.2.2	Delaminierung	10
3	Ergebnisse	14
3.1	Ergebnisse der systematischen Untersuchung	14
3.1.1	Lärche	15
3.1.1.1	Scherproben	15
3.1.1.2	Querzugproben	18
3.1.1.3	Ergebniszusammenfassung -Lärche-	21
3.1.2	Douglasie	22
3.1.2.1	Scherproben	22
3.1.2.2	Querzugproben	25
3.1.2.3	Ergebniszusammenfassung -Douglasie-	28
3.1.3	Eiche	30
3.1.3.1	Scherproben	30
3.1.3.2	Querzugproben	34
3.1.3.3	Ergebniszusammenfassung -Eiche-	38
3.1.4	Robinie	41
3.1.4.1	Scherproben	41
3.1.4.2	Querzugproben	45
3.1.4.3	Ergebniszusammenfassung -Robinie -	49

3.2	Keilgezinkte Stöße	52
3.2.1	Douglasie	53
3.2.2	Eiche	54
3.3	Delaminierung	56
3.3.1	Douglasie	56
3.3.2	Eiche	58
4	Zusammenfassung	60
5	Literatur	63

Anhang

Versuchsplan	A-1
--------------	-----

Die vollständigen Daten sind im Anhang des Projektberichtes enthalten.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage – Hintergrund

Holz im Außenbereich ist der Witterung ausgesetzt. Bei natürlich nicht oder nur wenig dauerhaften Holzarten (z.B. Fichte, Buche) ist ein chemischer Holzschutz notwendig, der heute zum einen umstritten ist (Ökologie, Entsorgung) und zum anderen häufig nicht oder nicht sorgfältig erfolgt. Früher wurde witterungsbeständiges Tropenholz eingesetzt, dieses wird aus verschiedenen Gründen zunehmend durch einheimisches oder importiertes Holz aus gemäßigten Zonen ersetzt.

Betroffene Einsatzbereiche sind Außenbaukonstruktionen wie Wand- und Dachbekleidungen, Carports, Laufstege, Pergolen, Balkone, Lärmschutzwände sowie Fenster und Türen. Dazu kommen noch verschiedene Anwendungen im Garten- und Spielplatzbereich sowie Brücken, Pavillons etc..

Eine Alternative zu Tropenhölzern und aufwendigen Holzschutzmaßnahmen ist der Einsatz von einheimischen, natürlich dauerhaften Holzarten. Hierzu sind als Nadelhölzer Lärchen- und Douglasienholz zu nennen und für besonders extreme Randbedingungen die Laubhölzer Robinie, Kastanie und Eiche. Die Anwendung der genannten Holzarten scheitert jedoch häufig daran, daß keine ausreichenden Abmessungen bzw. Qualitäten in größeren Mengen vorhanden sind. Zusätzlich erschweren eventuelle holzspezifische Eigenschaften, wie eine hohe innere Eigenspannung, den Einsatz von massiven Querschnitten, bzw. machen ihn sogar unmöglich.

Durch eine Verklebung kleinerer Querschnitte und Längen könnte nicht nur schwach dimensioniertes Eichenstammholz mit mittleren Qualitäten, sondern auch Robinienholz mit seinen hohen Eigenspannungen verarbeitet werden. Die Verklebung von Lamellen und die Durchführung von Längsstößen mit verklebten, keilgezinkten Verbindungen kann zu einer wirtschaftlich möglichen Herstellung von formstabilen und weitgehend rißfreien Querschnitten führen. Beide Laubhölzer gelten als schwierig verklebbar. Zur Zeit werden nur technisch getrocknete Hölzer verklebt, was jedoch im Hinblick auf einen späteren Einsatz im Außenbereich nicht immer sinnvoll scheint.

In diesem Forschungsvorhaben sollte die Möglichkeit der Verklebung von Eiche und Robinie sowie von Lärche und Douglasie für den Einsatz im Außenbereich untersucht und so weit weiterentwickelt werden, daß der Einsatz in den oben genannten Verwendungsbereichen verbessert werden kann. Dadurch sollen Alternativen zur Verwendung von weniger resistenten Holzarten mit chemischem Holzschutz und von Tropenhölzern gefördert werden.

1.2 Ziele der Untersuchung

Für das Forschungsvorhaben wurden auf Basis der Problemanalyse folgende Ziele formuliert:

1. Erarbeitung allgemeiner Grundlagen über die Verklebung von natürlich dauerhaften, einheimischen Holzarten (Eiche, Robinie, Lärche und Douglasie) für die Anwendung im Außenbereich.
2. Bestimmung und ggf. Entwicklung von dazu passenden Klebstoffen.
3. Berücksichtigung der Möglichkeit einer Verklebung ohne vorherige technische Trocknung des Holzes.
4. Experimentelle Überprüfung der durch Verklebung erreichten Festigkeitswerte bei keilgezinkten Verbindungen und Flächenverklebungen.
5. Darstellung der praktischen Möglichkeiten und Festlegung der einzuhaltenden Randbedingungen.
6. Verbreitung der Ergebnisse in der holzwirtschaftlichen Praxis.

2 Untersuchungsprogramm

Eine tabellarische Auflistung der durchgeführten Versuche ist im Anhang zu finden.

2.1 Holzarten

Im Rahmen dieses Projektes wurden die folgenden vier Holzarten eingesetzt: Eiche, Robinie, Lärche und Douglasie. Grundsätzlich wurde bei allen Holzarten nur das Kernholz verwendet. Im folgenden werden die natürlichen Dauerhaftigkeiten gegenüber holzerstörenden Pilzen aufgeführt (nach DIN EN 350-2). Als Vergleich soll hier die natürliche Dauerhaftigkeit von unbehandeltem Fichtenholz (*Picea abies*) mit der Klasse 4 (wenig dauerhaft) aufgeführt werden. Ebenfalls zeigt Fichtenholz eine deutlich geringere Dichte mit 460 kg/m^3 bei der Normalfeuchte (12 % relative Holzfeuchte) als die hier untersuchten Holzarten.

2.1.1 Eiche

Das Holz der Europäischen Stieleiche (*Quercus robur*) hat bei einer relativen Holzfeuchte von 12 % eine mittlere Dichte von 710 kg/m^3 . Es besitzt eine natürliche Dauerhaftigkeit der Klasse 2 (dauerhaft) gegenüber holzerstörenden Pilzen.

2.1.2 Robinie

Robinienholz (*Robinia pseudoacacia*) besitzt von den hier untersuchten Holzarten mit der Klasse 1 bis 2 (sehr dauerhaft bis dauerhaft) die höchste natürliche Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen. Es besitzt eine mittlere Dichte von 740 kg/m^3 bei einer relativen Holzfeuchte von 12 %.

2.1.3 Douglasie

Das Holz der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) weist mit 530 kg/m^3 bei einer relativen Holzfeuchte von 12 % die niedrigste Dichte der vier Holzarten auf. Es ist der Dauerhaftigkeitsklasse 3 (mäßig dauerhaft) gegenüber holzerstörenden Pilzen zugeordnet.

2.1.4 Lärche

Lärchenholz (*Larix decidua*) wird mit der Klasse 3 bis 4 (mäßig bis wenig dauerhaft) im Vergleich mit den drei oberen Holzarten am niedrigsten in der natürlichen Dauerhaftigkeit eingestuft. Es hat eine mittlere Dichte von 600 kg/m^3 bei einer relativen Holzfeuchte von 12%.

2.2 Holzfeuchte

Der Holzfeuchtigkeit wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Die Hauptuntersuchungen wurden mit drei verschiedenen Holzfeuchten durchgeführt: ca. 12 %, 18 % und 24 %. Die Holzfeuchten wurden zum einen nach der Darmmethode und zum anderen mit einem elektrischen Holzfeuchtemeßgerät bestimmt.

Die beiden niedrigeren Holzfeuchten wurden gewählt, da sie als Sollfeuchten für die möglichen Verwendungszwecke anzunehmen sind. Entscheidend für ca. 12 % relative Holzfeuchte war die Tatsache, daß Holz im Normalfall nach einer technischen Trocknung mit einer Feuchte von 10 bis 12 % verleimt wird, da die Sollfeuchte dann für das Feuchtegleichgewicht in geschlossenen Bauwerke mit und ohne Heizung eingestellt ist. Für überdeckte, offene Bauwerke im Außenbereich wird eine Sollfeuchte von bis zu 18 % angenommen, da sich im Außenbereich höhere Feuchtegleichgewichte einstellen. Die dritte, hohe Holzfeuchte von mindestens 24 % -nahe dem Fasersättigungsbereich- wurde gewählt, um etwaige Grenzen in der Feuchte für die Verleimung von verschiedenen Hölzern bestimmen zu können, außerdem würde sich bei einer Vortrocknung eine weitere technische Trocknung erübrigen.

2.3 Klebstoffe

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden vier Klebstofftypen eingesetzt: jeweils zwei Produkte von Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harzen, Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harzen und von Polyurethanklebstoffen sowie ein Epoxidharz.

Da der Vergleich zwischen den Produkten verschiedener Hersteller nicht als Ziel der Untersuchung gilt, werden die Produkte mit MUF 1, MUF 2, PRF 1 etc. bezeichnet.

2.3.1 Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF)

Für die Basisuntersuchungen wurden zwei Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz-Systeme von unterschiedlichen Herstellern eingesetzt. Dabei handelt es sich zum einen um das System Kauramin Leim 681 (pH-Wert bei 20°C ca. 9,5) mit dem Härter 686 (pH-Wert bei 20°C ca. 1,5) von der Firma BASF AG Ludwigshafen und zum anderen um das System Dynomel Leim L-435 (pH-Wert bei 20°C 9,5-10,0) mit Härter H-469 (pH-Wert bei 20°C von 1-2,5) der Firma DYNO Industrier ASA, Lillestrøm.

Diese Leimsysteme (im folgenden: MUF-Harz) setzen sich zusammen aus der wäßrigen Lösung eines Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsproduktes und einer ebenfalls wäßrigen Lösung von Ameisensäure als Härter. Die Zugabe des sauren Härters ist für diesen Leim bei Heiß- und Kaltverleimungen erforderlich, um die Abbindegeschwindigkeit zu erhöhen. Die Holztemperatur darf trotz eventuell niedrigerer Leimtemperatur nicht geringer sein als 20°C, um ein sicheres Abbinden des Harzes zu gewährleisten. Das Abbinden ist eine chemische Reaktion, bei der die während der Herstellung unterbrochene Polykondensationsreaktion fortgesetzt und Wasser abgespalten wird. Durch die fortschreitende Vernetzung entsteht ein weiß- bis cremefarbenes Endprodukt, das nicht mehr löslich ist. Für diesen Prozeß ist eine Nachhärtezeit von bis zu drei Tagen erforderlich. Diese Zeit kann durch erhöhte Raumtemperaturen verkürzt werden.

2.3.2 Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz (PRF)

Ebenfalls wurden zwei Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz-Systeme von unterschiedlichen Herstellern eingesetzt. Dabei handelt es sich zum einen um das System Kauresin Leim 460 (pH-Wert bei 20°C 7-8) mit dem Härter 466 (pH-Wert bei 20°C ca. 5, Suspension in Wasser) von der Firma BASF AG Ludwigshafen und zum anderen um das System Dynosol Leim S-199 (pH-Wert bei 20°C 7,8-8,2) mit Härter H-629 (pH-Wert bei 20°C 5-7, verdünnte Lösung) der Firma DYNO Industrier ASA, Lillestrøm.

Die rotbraunen Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze (im folgenden: PRF-Harz) setzen sich zusammen aus der wäßrigen Lösung eines Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Kondensationsproduktes und dem pulverförmigen Härter auf der Basis von Paraformaldehyd. Aufgrund dieses Härters entsteht wie auch beim MUF-Harz eine thixotrope Leimflotte, deren Aushärtung in ein unlöslich vernetztes Kondensat im neutralen Bereich erfolgt. Um den

Thixotropieeffekt zu erhalten, sollte die Leimtemperatur nicht geringer sein als ca. 20°C. Während der Verarbeitungs-, Preß- und Aushärtungszeit dürfen die Temperaturen des Holzes, des Leimes und der Räumlichkeiten 18°C nicht unterschreiten. Die volle Endfestigkeit der verleimten Teile wird bei ca. 20°C erst nach 2-3 Tagen erreicht. Durch höhere Raumtemperaturen läßt sich die Aushärtungsgeschwindigkeit erhöhen.

2.3.3 Polyurethanklebstoff

Es wurden drei einkomponentige Polyurethanklebstoffe von verschiedenen Herstellern gewählt. Dabei handelte es sich zum einen um das Produkt Kauranat 970 der Firma BASF AG Ludwigshafen und zum anderen um die Produkte Purbond HB 110 (für Flächenverleimungen) und Purbond HB 530 (für Keilzinkenverbindungen) der Firma Collano Ebnöther AG Sempach-Station, Schweiz.

Diese einkomponentigen Klebstoffe bestehen aus einem Gemisch von isocyanathaltigen Monomeren (meist MDI) und Isocyanat-Präpolymeren. Dieser Klebstofftyp härtet unter Einfluß der Luftfeuchtigkeit und der Holzfeuchte in einer Polyadditionsreaktion unter Abspaltung von Kohlendioxid zu einer zähelastischen Leimfuge aus. Die Raum- und Materialtemperatur sollte bei der Verarbeitung mindestens 20°C betragen.

Die Preßzeit ist wie bei den oben beschriebenen Klebstofftypen ebenfalls von der Umgebungstemperatur und -feuchte abhängig. Im Normalklima (20°C und 65 % relative Luftfeuchte) beträgt die Mindestpreßzeit für Flächenverleimungen drei Stunden und für Keilzinkenverbindungen mindestens zwei Sekunden. Die Endfestigkeit wird nach ca. 24 bis 48 Std. (bzw. bei den Keilzinkenverbindungen bereits nach 12 Std.) erreicht.

2.3.4 Epoxidharz

Es wurde der Epoxidharz WEVO-Spezialharz EP 20 VP/1 mit Härter B 20/1 der Firma WEVO-Chemie GmbH + Co., Ostfildern eingesetzt.

Bei diesem Klebstofftyp handelt es sich um Polyadditionsreaktionsprodukt aus Epoxidharzvorprodukten (Polyphenole und Epichlorhydrin) und einem Härter. Dieser Klebstoff wird für die Sanierung von Rissen in Brettschichtholz oder in alten Holzbauten eingesetzt. Epoxidharze vernetzen nahezu schrumpfungsfrei da keine Spaltprodukte wie bei MUF- und PRF-Harzen entstehen und haben dadurch auch sehr gute fugenfüllende Eigenschaften.

Im Normalklima (20°C und 65 % relative Luftfeuchte) beträgt die Mindestpreßzeit 12 Stunden und die Endfestigkeit wird nach ca. 16 Stunden erreicht. Die Mindestaushärtungstemperatur von 15°C ist nicht zu unterschreiten.

Dieser Klebstofftyp wird im Rahmen dieses Projektes nur bei 12 % und 18 % relativer Holzfeuchte eingesetzt, da die Voraussetzungen für eine korrekte Verklebung mit einem Epoxidharz bei einer noch höheren Holzfeuchte nicht mehr gegeben sind.

2.4 Prüfmethoden

Mit Hilfe der verschiedenen Prüfmethoden sollte die Verklebbarkeit dauerhafter Holzarten mit drei unterschiedlichen Holzfeuchten mit verschiedenen Klebstofftypen näher betrachtet und verglichen werden. Es wurde untersucht, ob sich die jeweiligen Klebstofftypen für die Verklebung der vier Holzarten eignen.

Als Grundlage wurden zunächst in größerem Umfang Kleinproben im Labor hergestellt und auf ihre Festigkeit geprüft. Nach Auswertung dieser systematischen Basisuntersuchung wurden mit ausgewählten Kombinationen weitere Versuche durchgeführt, dafür wurden in einem Brettschichtholzwerk Keilzinkenverbindungen und Balken hergestellt. Der Leimauftrag entsprach den Herstellerempfehlungen.

2.4.1 Systematische Untersuchungen an Kleinproben

Zur Prüfung der Verleimungsqualität wurden Druckscher- und Querkzugversuche in Anlehnung an DIN 52187 und DIN 68141 durchgeführt.

Für die ersten Flächenverklebungsversuche wurden jeweils Lamellen mit den Maßen 28 x 60 x 1100 mm³ miteinander verklebt. Diese verklebten Elemente wurden in bis zu maximal 20 Prüfkörper mit den Maßen 50 mm x 50 mm aufgesägt. Diese Prüfwürfel wurden alternierend mit Hilfe von Druckscher- und Querkzugprüfungen auf ihre Festigkeit untersucht. Es wurde zum einen die Leimfugenfestigkeit und zum anderen als Vergleichsgröße die Holzfestigkeit betrachtet. Bei der Prüfung der Leimfuge wurde das Bruchbild beurteilt und dokumentiert.

Je Kombination wurden vier Rohlinge, d.h. beispielsweise, daß vier Balken aus je zwei Lamellen Robinienholz mit 18% Holzfeuchte mit dem einen PRF-Harz und nochmals vier Balken mit dem zweiten PRF-Harz hergestellt wurden. Die beiden Laubholzarten wurden zum Teil zusätzlich vor der Verleimung gedämpft (2 Stunden bei 90°C), so daß bei der Robinie und Eiche mehr Versuchskombinationen auftreten als bei den beiden Nadelhölzern.

Die Dämpfung wurde in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, da zeitgleich ein anderes Projekt die Dämpfung von Laubhölzern untersuchte und die Frage der Verleimbarkeit solcher Hölzer untersucht werden sollte.

Eine Übersicht bietet der Versuchsplan im Anhang. Die Nadelhölzer wurden mit einem geringeren Preßdruck ($0,8 \text{ N/mm}^2$) als die Laubhölzer ($1,25 \text{ N/mm}^2$) gepreßt.

Im Zuge dieser systematischen Untersuchung wurden ca. 5.300 Prüfkörper angefertigt und geprüft.

2.4.1.1 Druckscherversuche

Die Druckscherversuche wurden in Anlehnung an DIN 52187 durchgeführt. Bei dieser Prüfmethode werden die verleimten Proben parallel zur Faserrichtung so beansprucht, daß sich die Leimfuge in der Scherebene befindet. Dadurch wird ein Bruch in der Ebene der Leimfuge erzeugt. Die Scherfläche beträgt $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$.

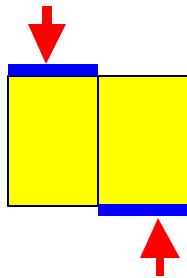


Abbildung 2.4.1-1: Druckscherprüfung

Nach dem Bruch werden beide Bruchflächen betrachtet und der Anteil an Holzbruch bestimmt. Ein Holzbruch liegt vor, wenn beide Bruchflächen mit Holzresten belegt sind (Bruch im Holz oder im Übergang Holz-Leim). Bei einem reinen Bruch in der Leimfuge sind keine Holzreste, sondern nur die Klebstoffreste erkennbar.

Zusätzlich wurde als Referenzwert die Scherfestigkeit des verwendeten Holzes bestimmt, indem an einzelnen Proben die Prüfung so durchgeführt wurde, daß sich die Scherebene nicht in der Ebene der Leimfuge befand.

2.4.1.2 Querzugversuche

Die Querzugversuche wurden in Anlehnung an DIN 68141 durchgeführt. Für die Querzugprüfung wurden die 50 mm x 50 mm Würfel so angebohrt, daß sich eine beanspruchte Fläche von 25 mm x 25 mm mit dem kleinsten Querschnitt in Höhe der Leimfuge ergibt. Somit entsteht in der Leimfuge die größte Beanspruchung. Bei dieser Prüfmethode werden die maximale Querzugbeanspruchung und der Holzbruchanteil bestimmt. Der Holzbruchanteil wurde wie bei der Scherprüfung bestimmt.

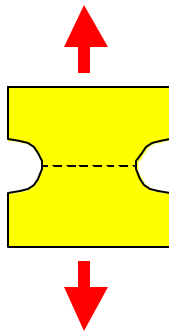


Abbildung 2.4.1-2: Querzugprüfung

2.4.2 Untersuchungen an größeren Elementen

Für diese Untersuchungen wurde das Probenmaterial in einem Brettschichtholzwerk hergestellt. Im Anschluß an die systematische Untersuchung (Kap. 2.4.1) wurden für die verbleibenden Versuche zwei Holzarten, drei Klebstoffe und eine Holzfeuchte ausgewählt. Eichen- und Douglasienbretter mit einer rel. Holzfeuchte von 18 % wurden mit einem MUF-Harz (MUF-1), einem PRF-Harz (PRF-1) und einem PU-Klebstoff (PU-2) zu Keilzinkenverbindungen und Brettschichtholzbalken verarbeitet. Die relative Holzfeuchte von 18 % wurde gewählt, da es das Ziel dieser Untersuchungen war, technisch ungetrocknetes Holz für die Anwendung im Außenbereich zu verleimen.

2.4.2.1 Keilgezinkte Stöße

Es wurden Proben mit einem Keilzinkenstoß mit den Abmaßen 28 x 150 x 800 mm³ hergestellt. Je Klebstofftyp und Holzart wurden ca. 15 Proben gefertigt. Somit ergibt sich ein Probenumfang von ca. 90 Stück. Dieses Probenmaterial wurde an der ETH in Zürich auf Zug beansprucht. Dabei wurden die Zugfestigkeiten sowie die Bruchbilder bestimmt.

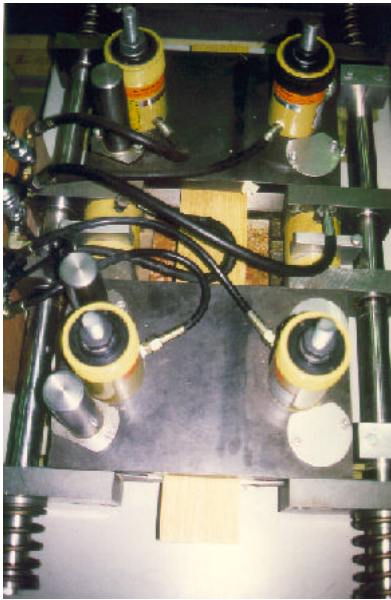


Abbildung 2.4.2-1: Keilzinkenprüfanlage

2.4.2.2 Delaminierung

Für diesen Versuchsteil wurden je Kombination drei Balken à 8 Lamellen mit den Maßen 2,60 m (Eiche) / 3,00 m (Douglasie) x 145 mm x 240 mm hergestellt, d.h., daß je drei Eichenbalken mit einem MUF-Harz (MUF-1), einem PRF-Harz (PRF-1) und einem PU-Klebstoff (PU-2) hergestellt wurden. Das gleiche gilt für die Douglasie. Insgesamt wurden 18 Balken mit einer rel. Holzfeuchte von ca. 18 % gefertigt.

Für diese Prüfmethode wurden jedem Balken zwei Prüfstücke entnommen. So standen je Holzart und Leimtyp sechs Prüfstücke zur Verfügung. Diese Prüfkörper wurden nach DIN EN 391 Verfahren B geprüft und die Ergebnisse aufgenommen sowie ausgewertet.

Die Delaminierungsprüfung ist definiert als eine Prüfmethode, die BSH-Prüfkörper mit Wasser über den Fasersättigungspunkt hinaus sättigt und diese danach schnell wieder trocknet, um die Qualität der Leimfugen zu testen. Durch dieses Vorgehen, zuerst durch das Quellen und das darauffolgende Schwinden der Proben, werden große Spannungen in den Leimfugen erzeugt. In dem Fall, daß die Leimfugenqualität nicht ausreicht, treten Fehlstellen in Form von Leimfugenöffnungen auf. Die addierte Länge dieser Öffnungen in Relation zur Leimfugenlänge ergibt den Gesamtprozentsatz der Delaminierung und gilt als Maß für die Leimfugenqualität.

Diese Art der Prüfmethode wird eingesetzt, um die Dauerstandfestigkeit von Leimholz insbesondere im Außengebrauch einzuschätzen. Mit Hilfe dieser Prüfung soll also die Verwendung von BSH-Elementen über eine längere Zeitspanne verkürzt simuliert werden.

Der Prüfkörper wird von einem vollständigen Querschnitt eines BSH-Elementes rechtwinkelig zur Faserrichtung mit einem scharfen Werkzeug entnommen. Die vorgeschriebene Länge beträgt 75 ± 5 mm.

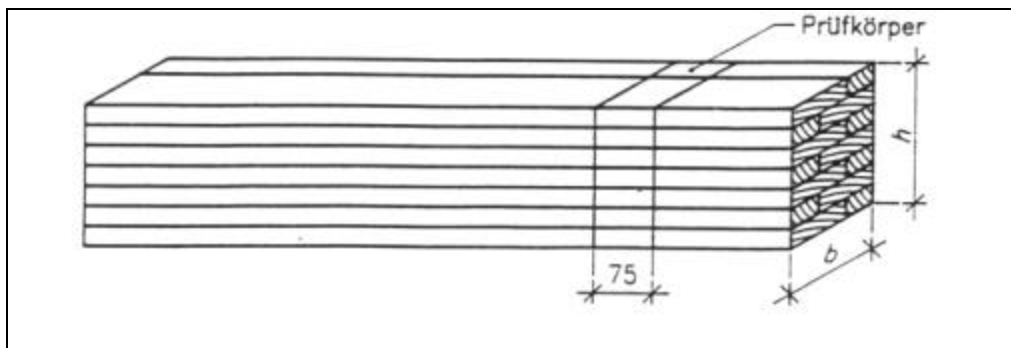


Abbildung 2.4.2-2: Ein aus einem Bauteil geschnittener Prüfkörper
(DIN EN 391:1995)

Nachdem die Prüfkörper auf die richtigen Maße zugeschnitten wurden, werden die Gesamtlängen der Hirnholzleimfugen gemessen und festgehalten. Ebenso werden die Massen der Probestücke bestimmt. Der Druckbehälter wird mit den Prüfkörpern mit soviel Abstand bestückt, daß die Hirnholzseiten frei von Wasser umspülbar sind. Um ein Auftreiben zu verhindern, werden die Holzproben beschwert, bevor anschließend genügend Wasser mit einer Temperatur von 10°C bis 20°C hinzu gegeben wird, bis alle Proben vollständig mit Wasser bedeckt sind.

Um die Imprägnierung zu beginnen, wird ein Vakuum von 70 kPa bis 85 kPa erzeugt und für 30 min gehalten. Darauf folgt eine zweistündige Phase mit einem Druck von 500 kPa bis 600 kPa. Die jetzt mit Wasser voll imprägnierten Prüfkörper werden in den Trockenofen so hinein gelegt, daß sie einen Mindestabstand von 50 mm voneinander haben und die Hirnholzflächen parallel zum Luftstrom liegen. Die Trockenzeit ist abhängig von der Masse der einzelnen Prüfkörper, sie ist beendet, wenn das jeweilige Probestück seine Ausgangsmasse $\pm 15\%$ erreicht hat.

Die jetzt sichtbare Delaminierung ist zu messen und festzuhalten. Eventuelle Öffnungen in der unmittelbaren Umgebung von Ästen sind nicht als Delaminierung zu berücksichtigen, ebensowenig wie Holzbruch aufgrund von Absplittern in absoluter Nähe zur Leimfuge. Der Fehler muß definitiv in der Leimfuge vorliegen, um gewertet zu werden. Die delaminierten Stellen, die eine geringere Länge als 3mm vorweisen, sind ebenfalls nicht zu werten, wenn sie weiter als 5mm von der nächsten Delaminierung entfernt liegen.

Aus den Leimfugenöffnungen auf den Hirnholzseiten muß für jeden Prüfkörper der jeweilige Gesamtprozentsatz und der Höchstprozentsatz der Delaminierung errechnet werden.

Die addierte Länge dieser Öffnungen in Relation zur Leimfugenlänge ergibt den Gesamtprozentsatz der Delaminierung und dieser gilt als Maß für die Leimfugenqualität.

Für den Fall, daß der vorgeschriebene Höchstwert des Gesamtprozentsatzes überschritten wird, muß ein zusätzlicher Prüfzyklus durchlaufen werden. Nach DIN EN 386 liegt der Höchstwert des Gesamtprozentsatzes nach einem Zyklus bei 4% und nach einem zusätzlichen Zyklus bei 8%. Diese Werte müssen unterschritten werden, um die Prüfung zu bestehen.

Gesamtprozentsatz der Delaminierung:

$$100 \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,Leimfuge}}$$

Höchstprozentsatz der Delaminierung:

$$100 \frac{l_{maxdelam}}{2l_{Leimfuge}}$$

$l_{tot,delam}$:	Delaminierungslänge aller Leimfugen des Prüfkörpers [mm]
$l_{tot,Leimfuge}$:	Gesamtlänge der Leimfugen an den beiden Hirnholzflächen jedes Prüfkörpers [mm]
$l_{max,delam}$:	Höchstlänge der Delaminierung einer einzelnen Leimfuge des Prüfkörpers [mm]
$l_{Leimfuge}$:	Länge der einzelnen Leimfuge, im Regelfall die Breite b, wie in Abb. 2-1 dargestellt [mm]

Abbildung 2-4: Prozentsätze der Delaminierung (DIN EN 391:1995)

3 Ergebnisse

Insbesondere die Leime für die Herstellung von tragenden BSH-Elementen müssen feste und dauerhafte Verbindungen gewährleisten, um „die Güte der Verleimung während der beabsichtigten Lebensdauer des Bauwerkes aufrechterhalten“ zu können. Es ist zu berücksichtigen, daß die schwächste Stelle der Verleimung für die Festigkeit der Verbindung maßgebend ist. Aus diesem Grund muß die Festigkeit in der Leimfuge und an den Grenzflächen größer sein als die des Holzes, so daß eventuelle Spannungsrisse nur im Holz auftreten.

3.1 Ergebnisse der systematischen Untersuchung

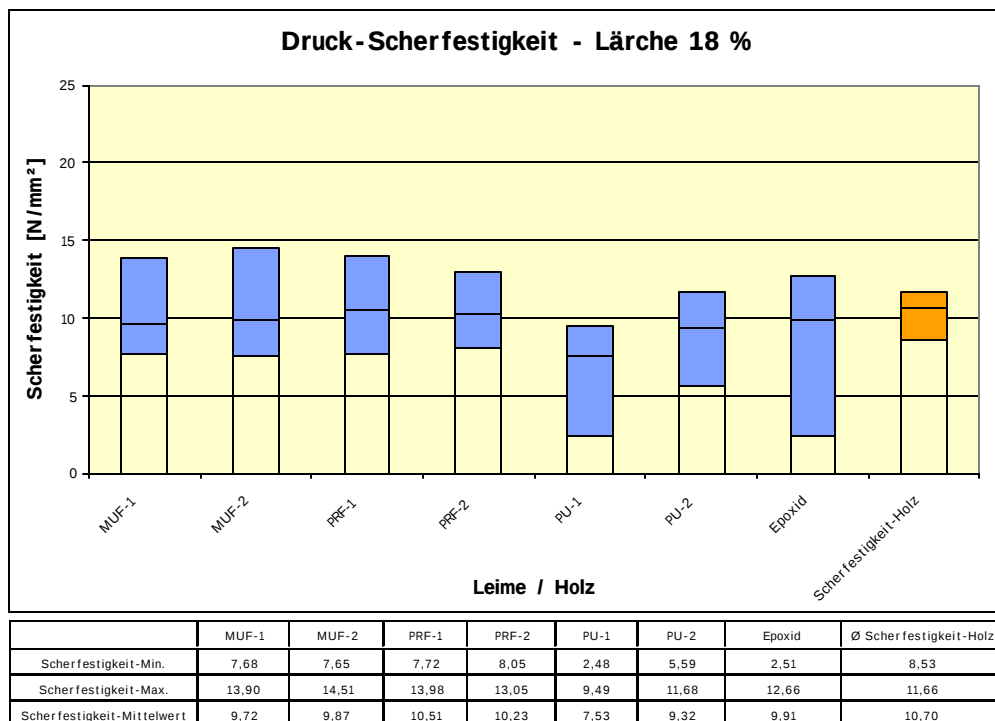
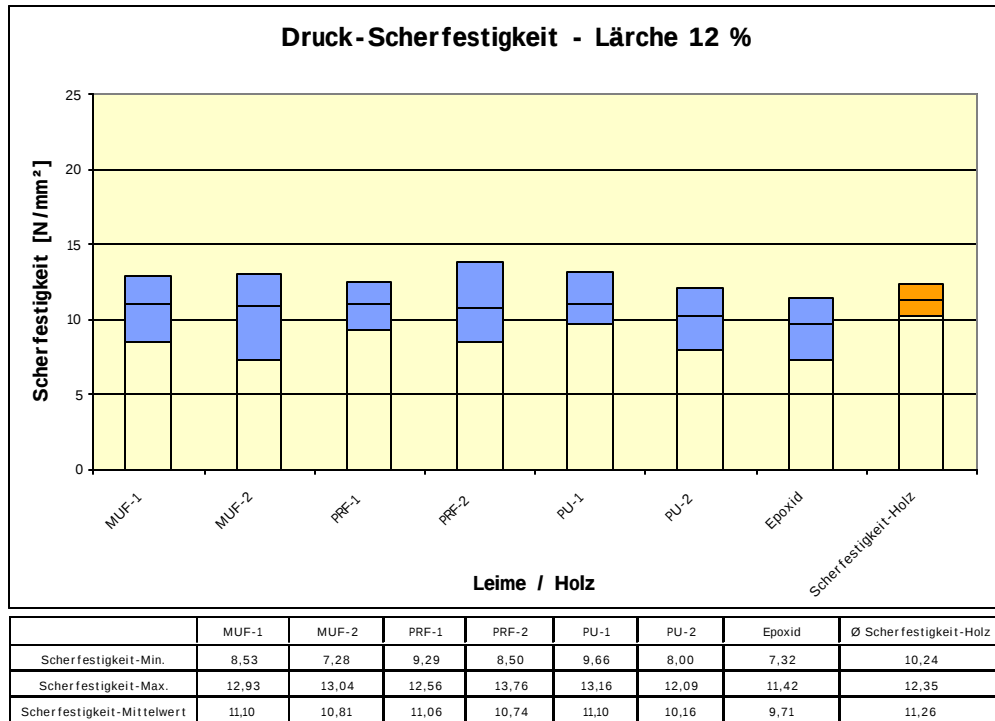
Bei der Untersuchung von Kleinproben, wie sie hier vorliegen, ist immer davon auszugehen, daß einzelne Proben zum Teil sehr niedrige Werte liefern, sowohl bei der Festigkeit als auch bei der Bestimmung des Holzbruchanteils. Bei der Durchführung von ausreichenden Prüfungen sind diese Einzelwerte jedoch wenig problematisch, da sie deutlich zu erkennen sind. Die Betrachtung der Gesamtergebnisse und nicht etwa nur der geringsten Werte aus jeder Serie scheint somit angebracht für die Auswertung der vorliegenden Resultate.

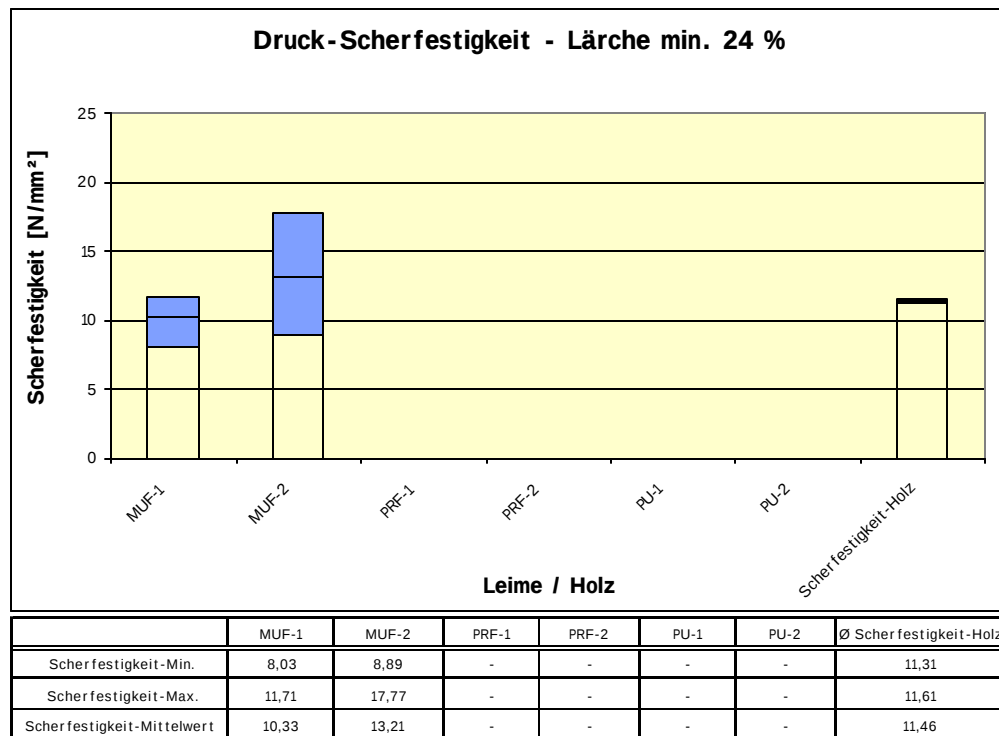
Bei den vorliegenden Resultaten sind die Maximalwerte besonders zu betrachten, da sie bei Bestimmung der Holzbruchanteile als absolute Maximalwerte gelten (es sind keine Werte über 100 % möglich). Bei den Festigkeitswerten -bei der Prüfung in der Leimfuge- liegen die maximal erreichbaren Werte bei der jeweiligen Festigkeit des Holzes, so daß auch in diesem Fall eine Art absolutes Maximum vorliegt.

3.1.1 Lärche

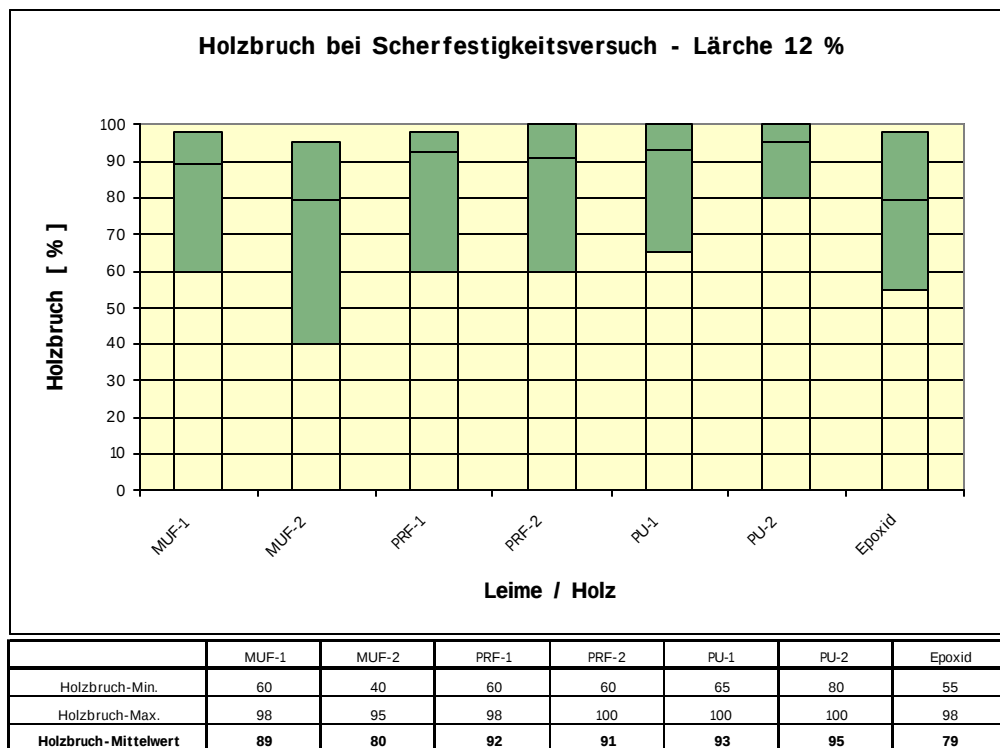
3.1.1.1 Scherproben

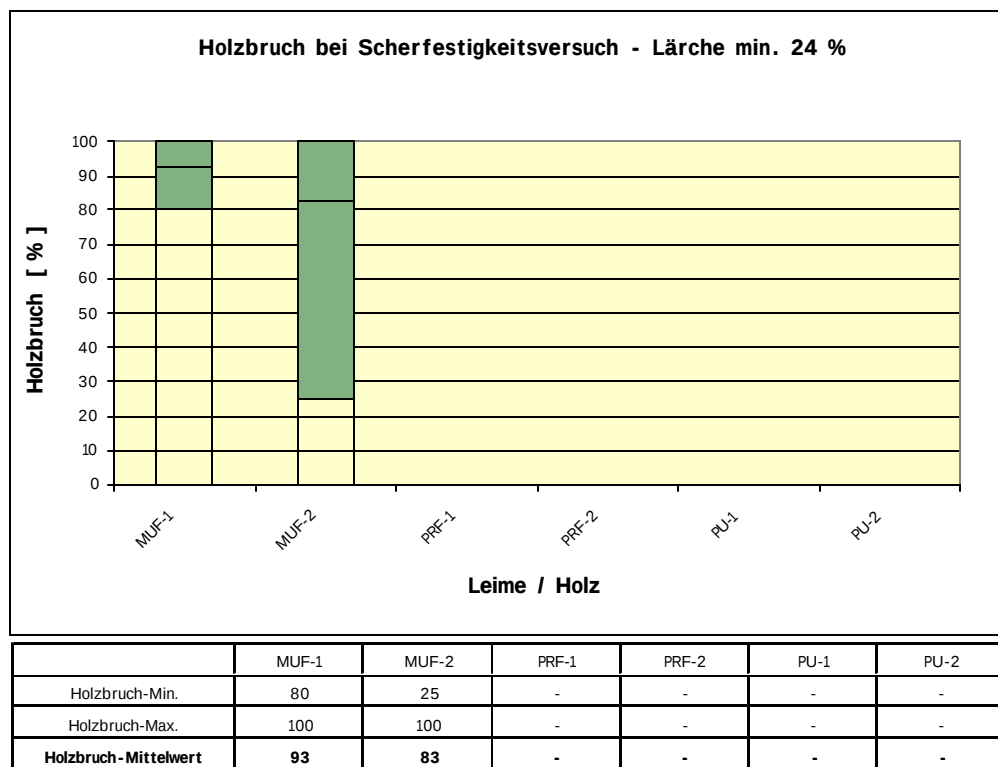
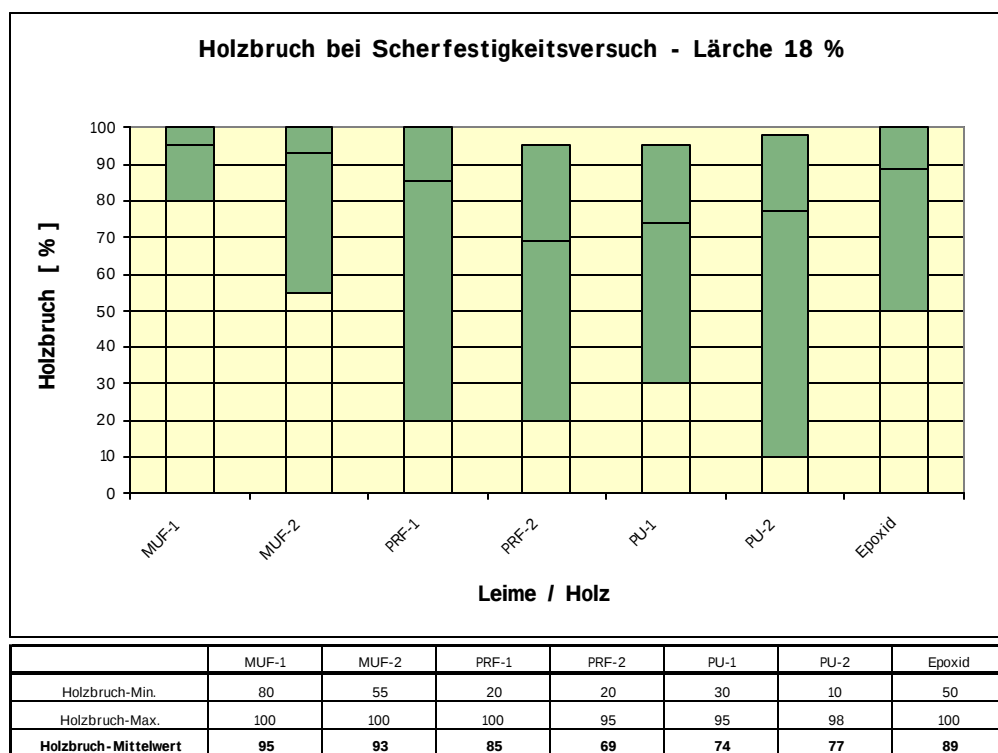
Druck-Scherfestigkeit





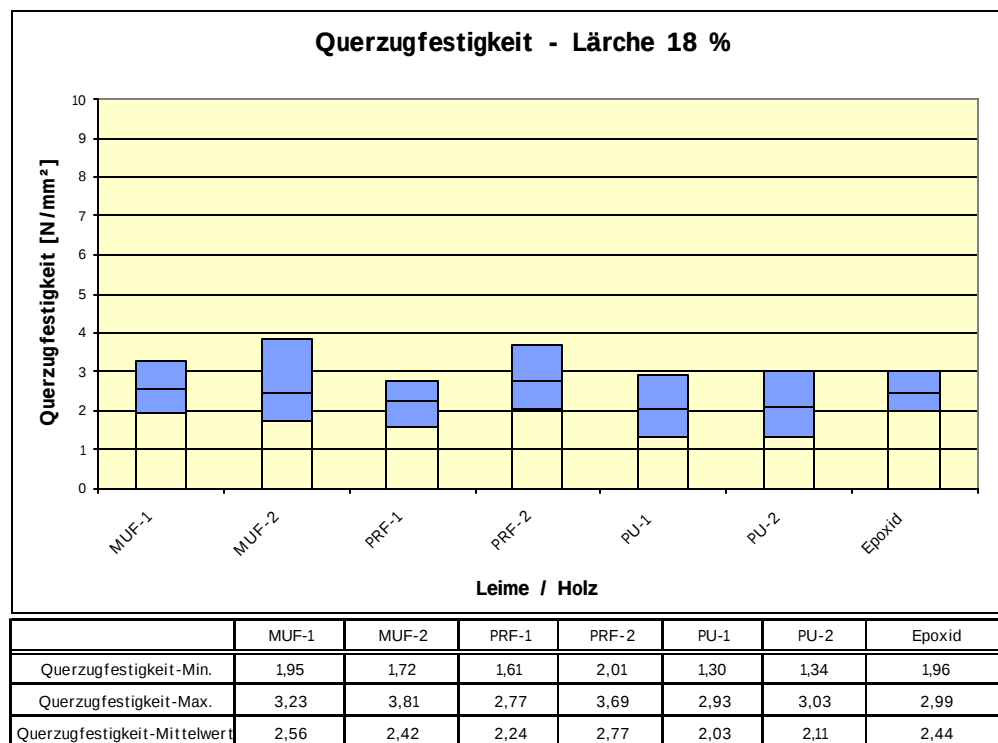
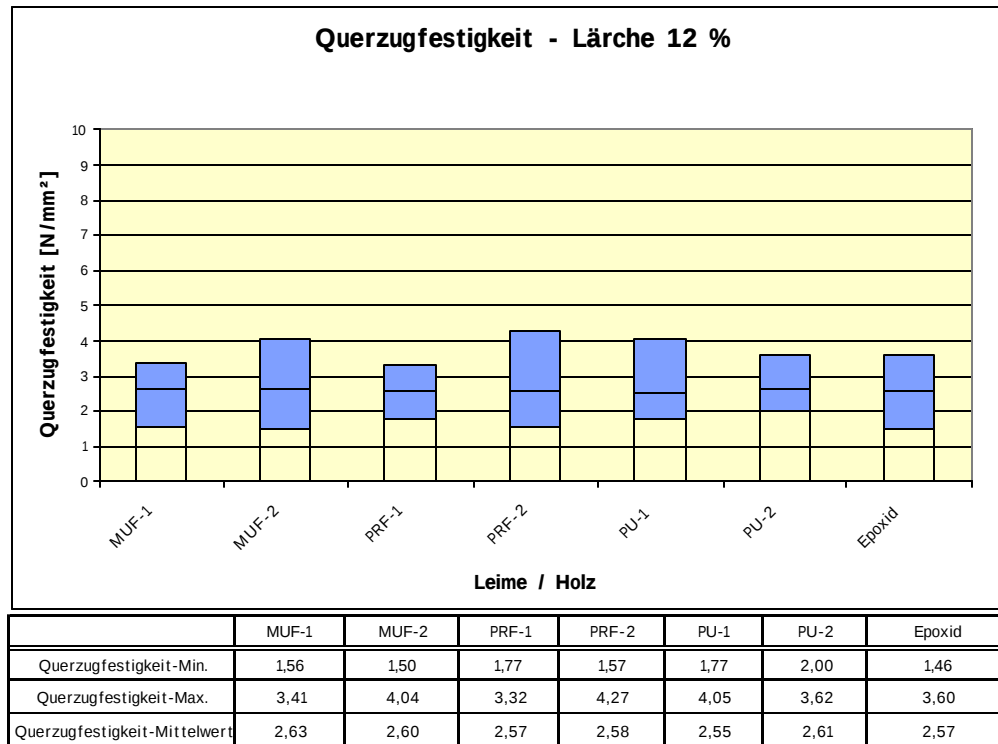
Holzbruchanteil

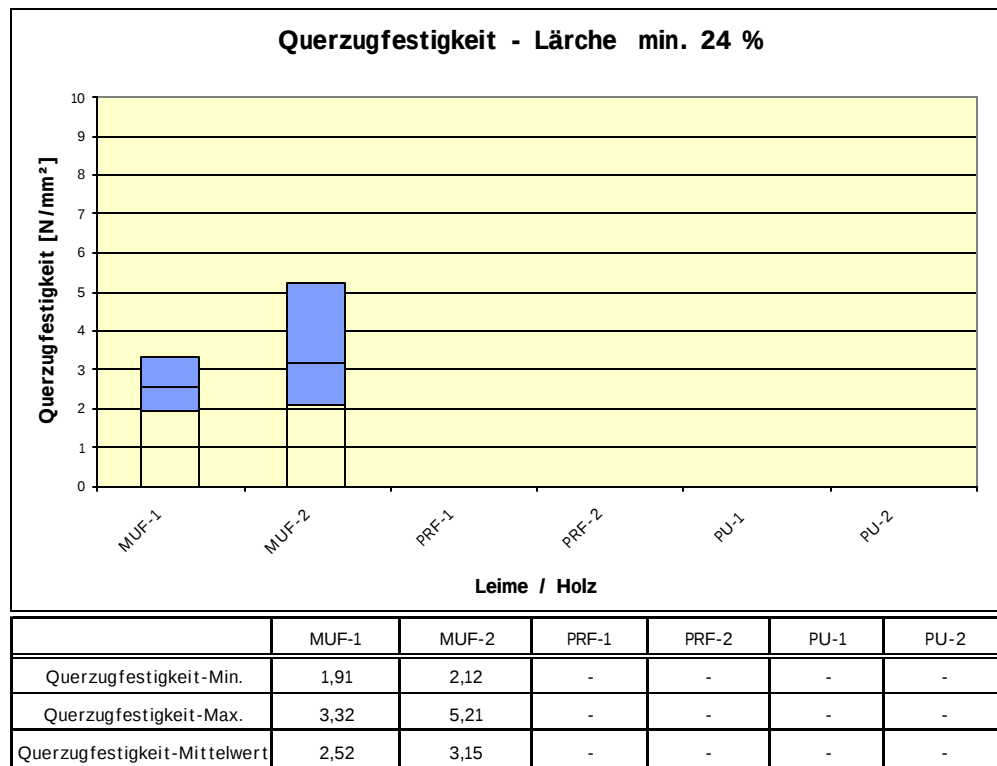




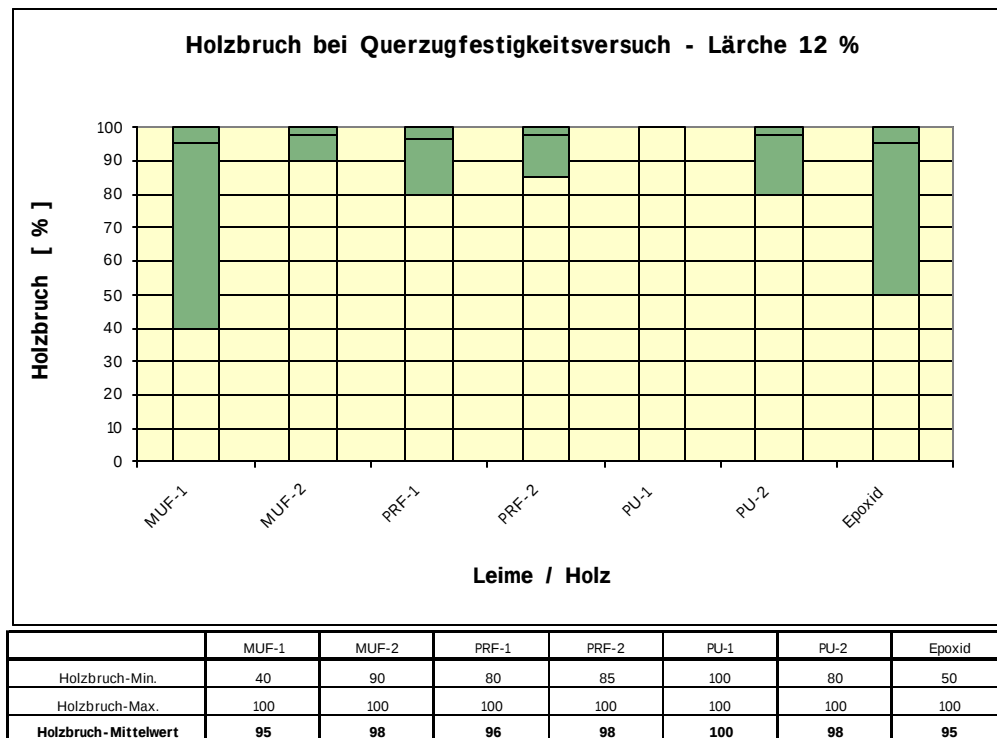
3.1.1.2 Querzugproben

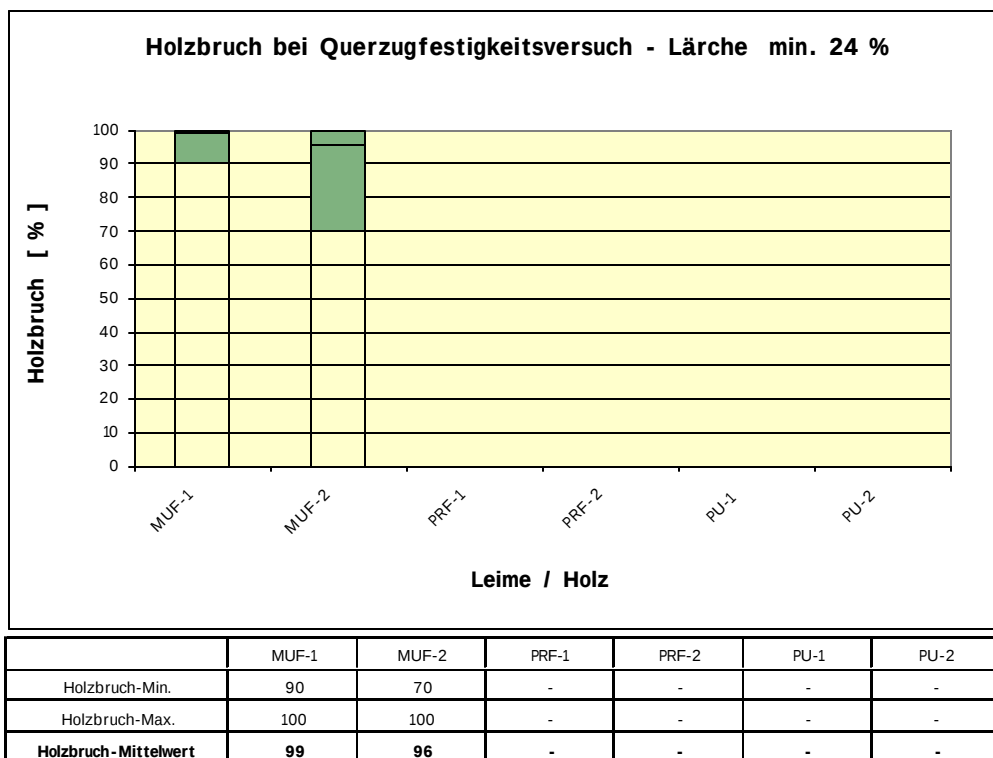
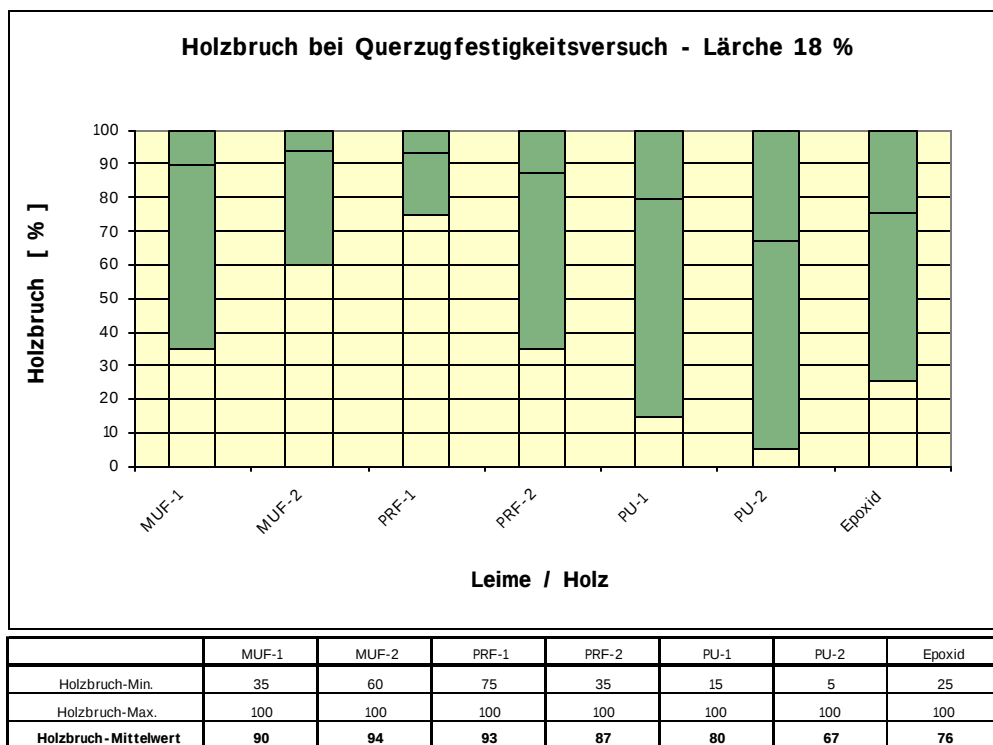
Querzugfestigkeit





Holzbruchanteil





3.1.1.3 Ergebniszusammenfassung -Lärche-

Die Verklebung von Lärchenholz führte grundsätzlich zum gleichen Ergebnis:

Eine gute Qualität der Verklebung sowohl bei trockenem (12 % rel. Holzfeuchte) als auch bei nassem Holz (relative Holzfeuchte > 24%).

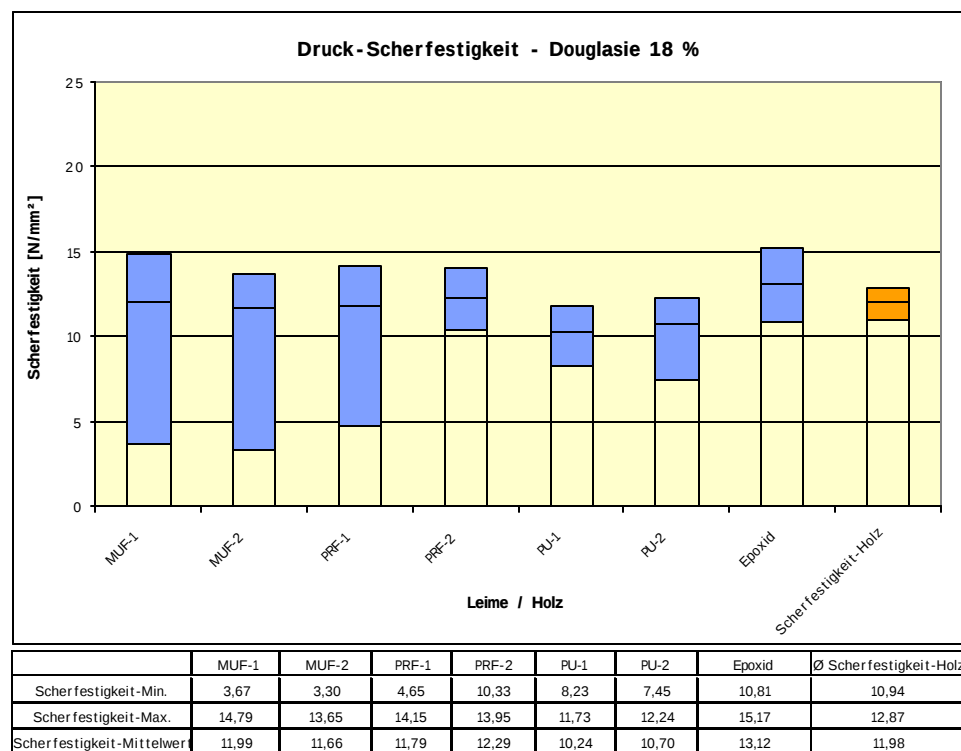
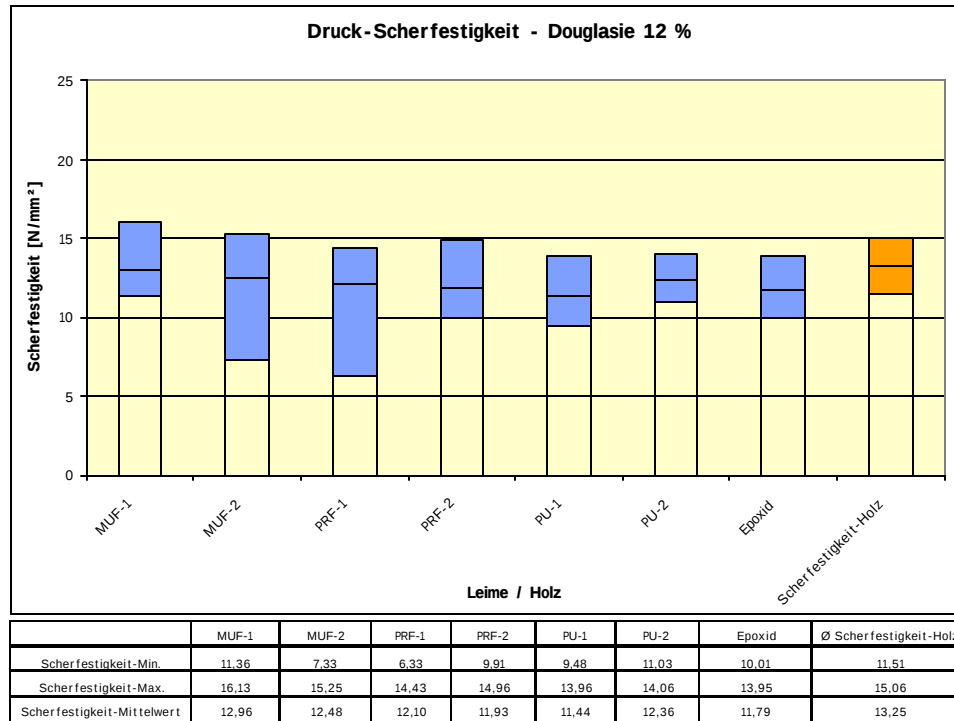
Die Ausnahmen finden sich bei einer rel. Holzfeuchte von 18 % bei beiden PU-Klebstoffen und dem PRF-2-Harz in Form einer leichten Reduktion der Werte. Obwohl daraus keine mangelhafte Verklebungsqualität abgelesen werden kann, ist eine leichte Qualitätsreduktion vorhanden. Diese könnte auf die höhere Holzfeuchte zurückgeführt werden. Die Untersuchung bei einer noch höheren Holzfeuchte konnte nicht durchgeführt werden.

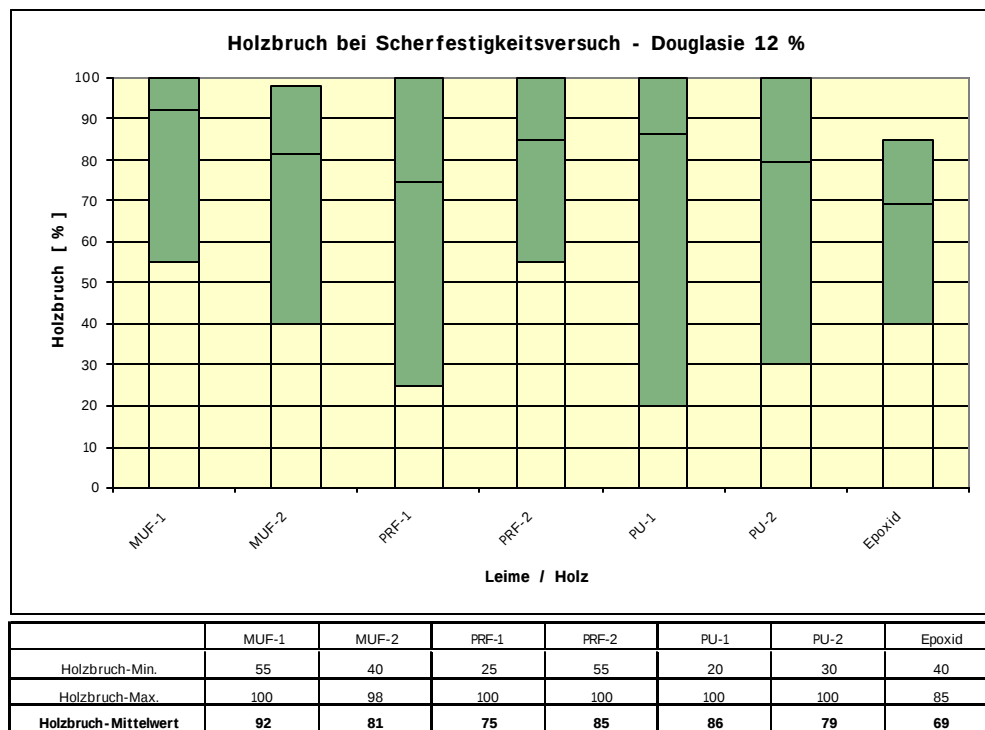
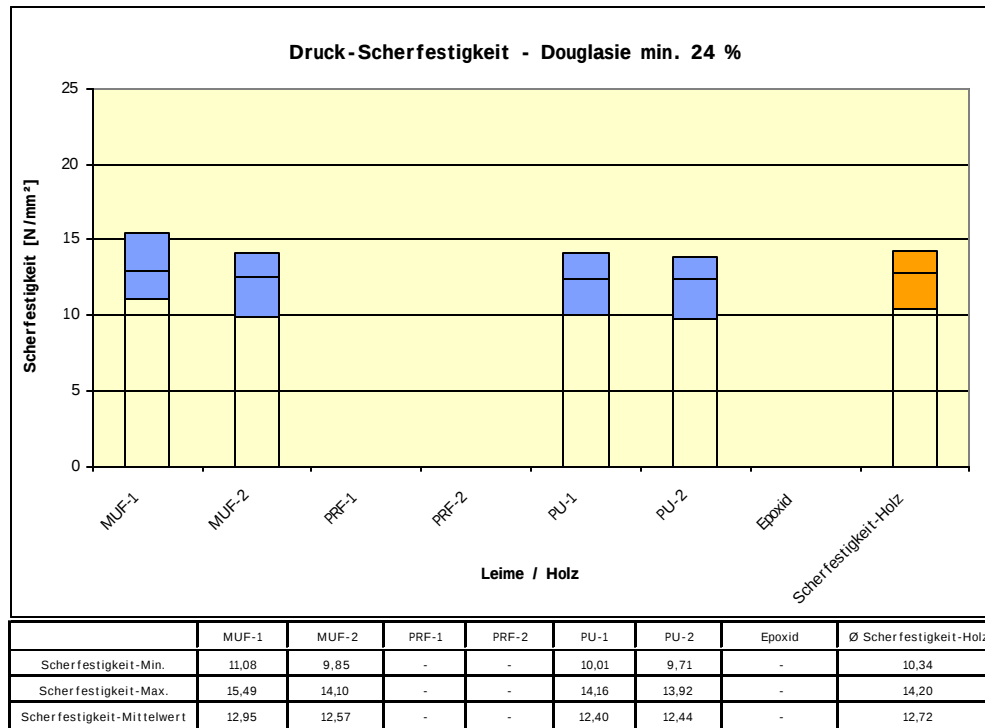
Im allgemeinen zeigen die vorliegenden Ergebnisse die gute Qualität der Verklebung von Lärchenholz mit beiden MUF-Harzen und dem PRF-1-Harz bei allen untersuchten Holzfeuchten und im trockenen Zustand mit sämtlichen Klebstoffen.

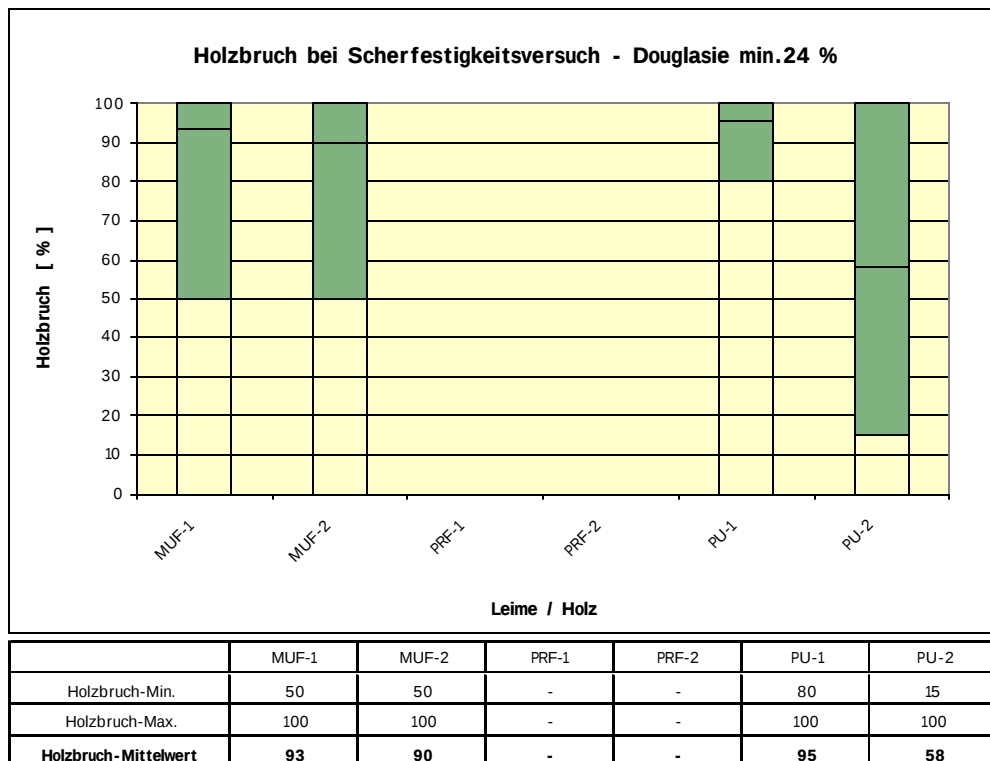
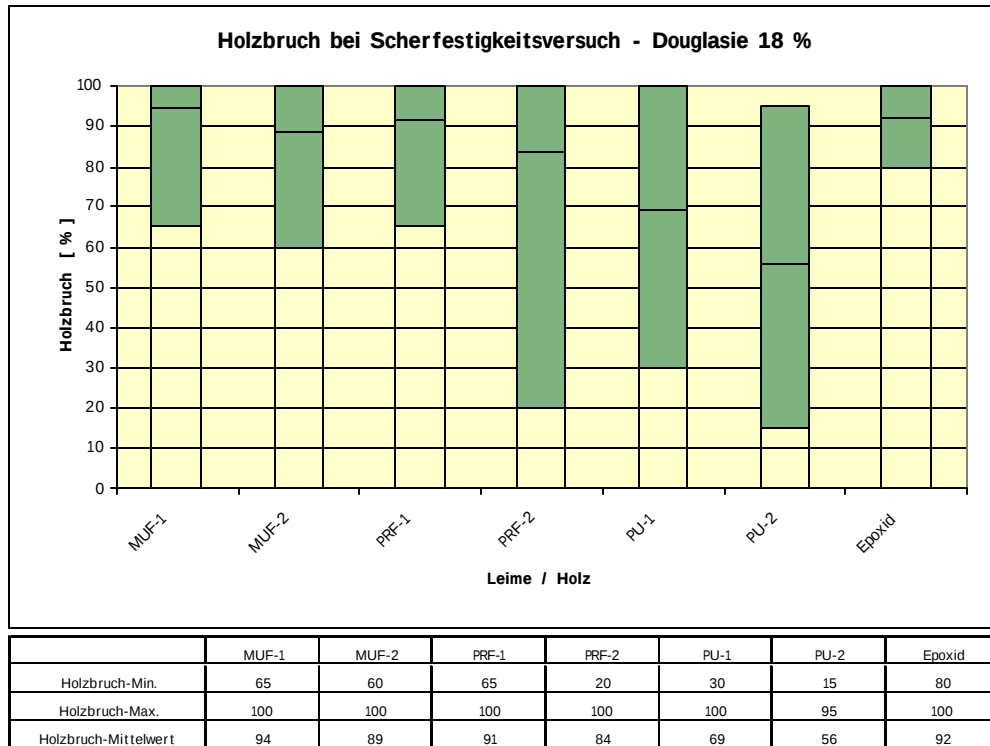
3.1.2 Douglasie

3.1.2.1 Scherproben

Druck-Scherfestigkeit

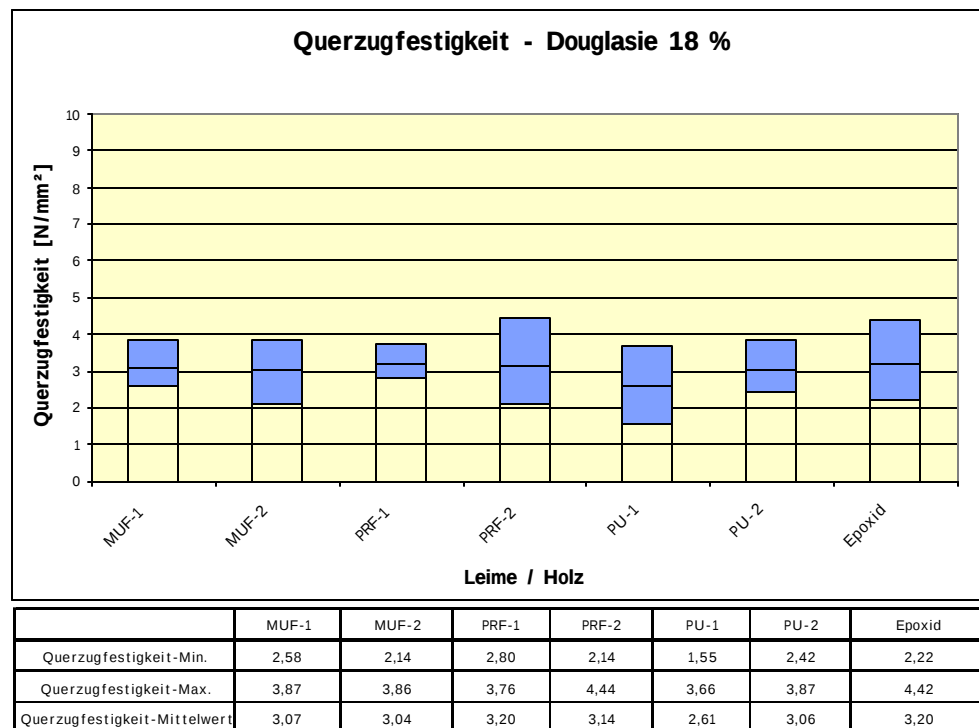
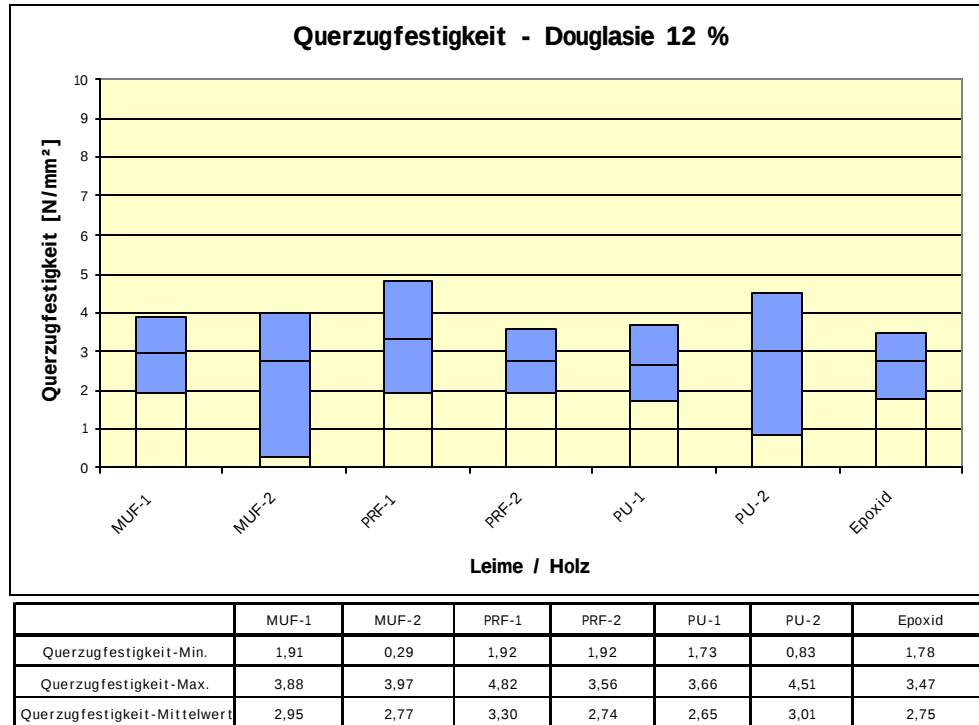


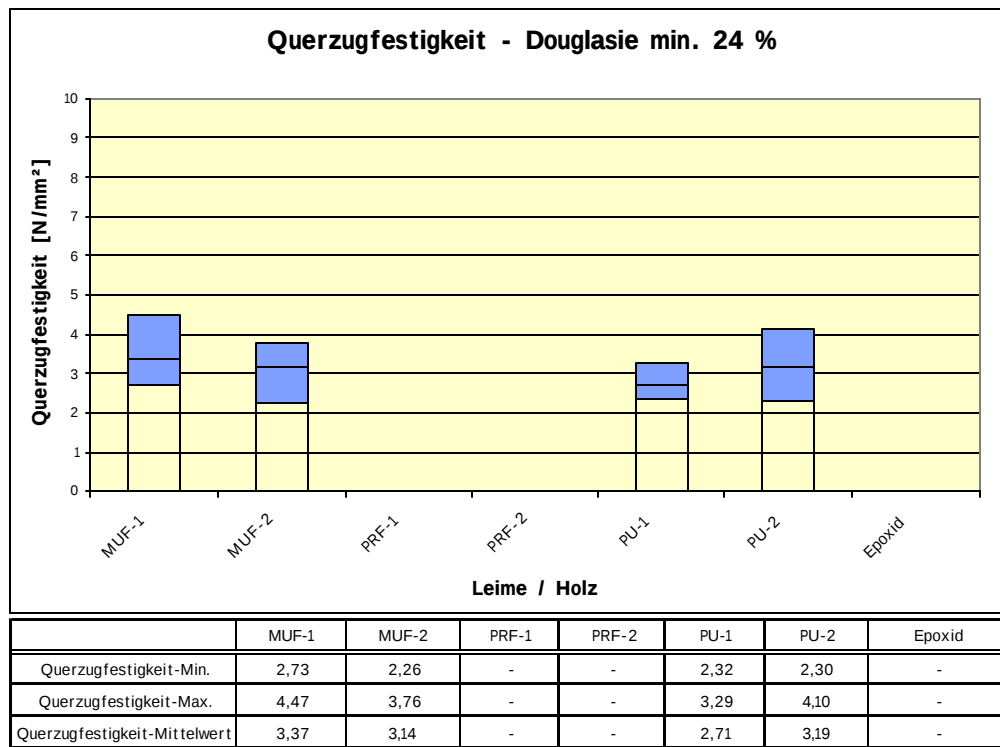




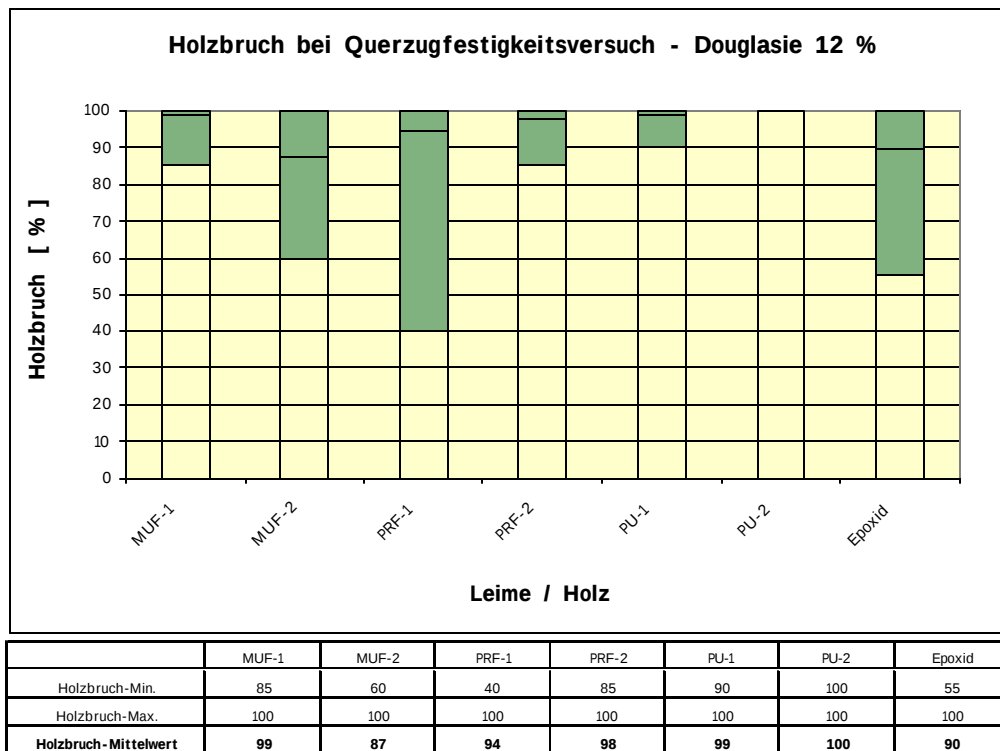
3.1.2.2 Querzugproben

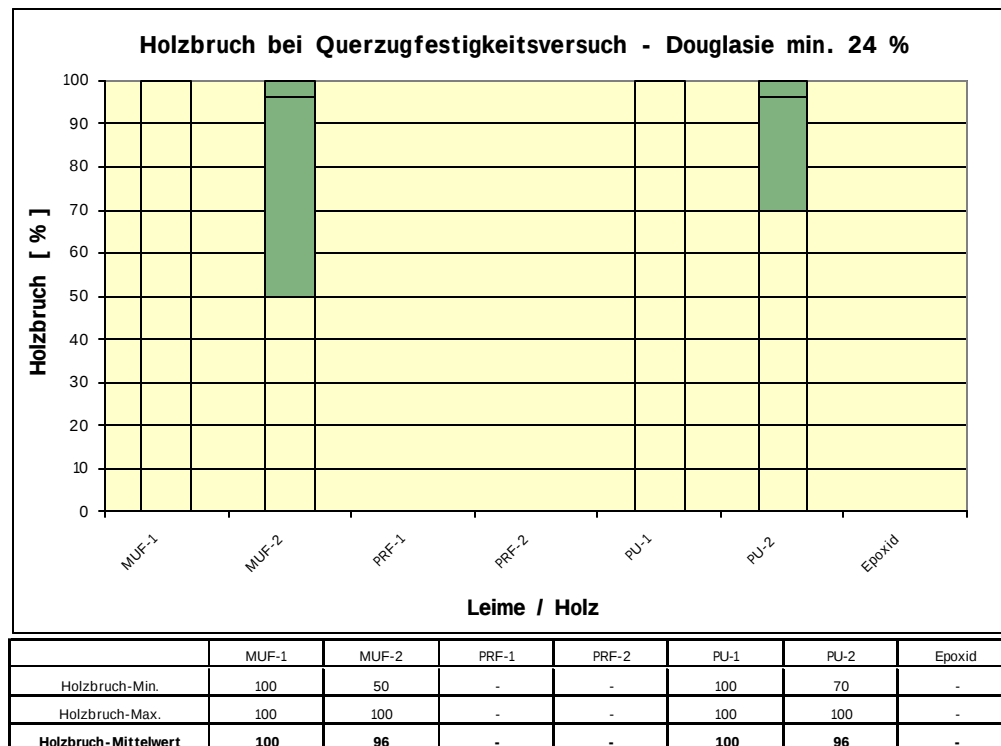
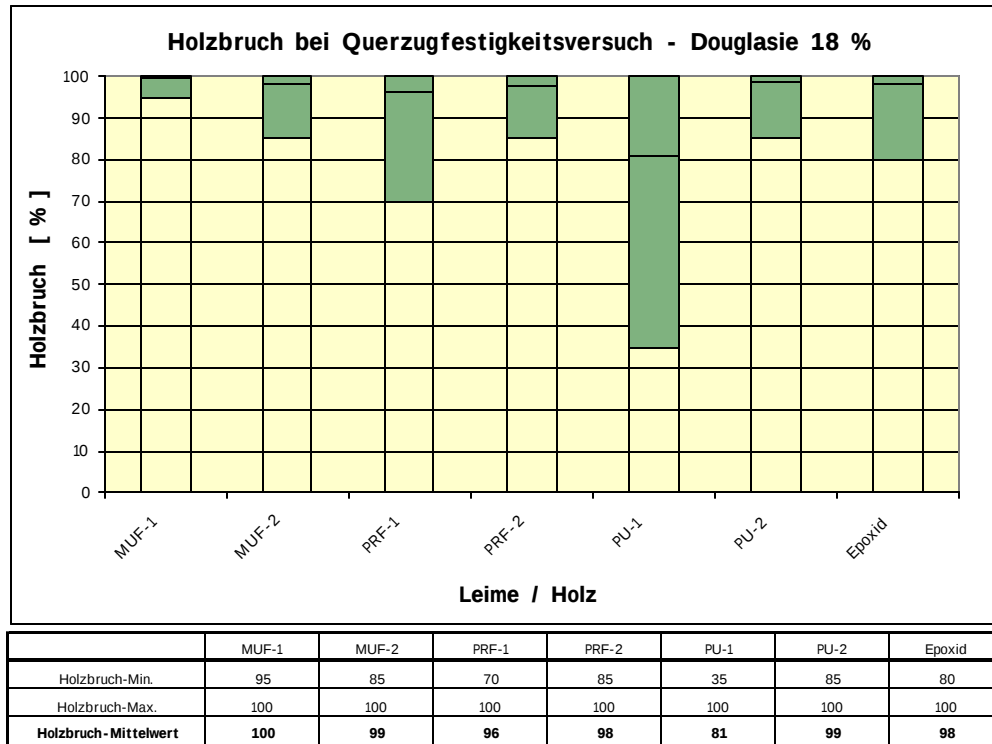
Querzugfestigkeit





Holzbruchanteil





3.1.2.3 Ergebniszusammenfassung -Douglasie-

MUF-Harze

Hier kann nur von der durchaus guten Verleimungsqualität berichtet werden. Ebenfalls bei der Verleimung von nassem Holz (rel. Holzfeuchte $> 24\%$) ist die Qualität gut.

PRF-Harze

Mit den PRF-Harzen konnten keine Untersuchungen mit der höchsten Holzfeuchte durchgeführt werden. Die vorhandenen Werte zeigen keinerlei Probleme bei der Verleimung von Douglasienholz mit den Holzfeuchten 12% und 18% .

PU-Klebstoffe

Die Resultate zeigen eine gute Verklebungsqualität bei allen untersuchten Randbedingungen. Bei der Holzfeuchte von 18% ist eine Reduktion der absoluten Druckscherfestigkeitswerte festzustellen (Mittelwert 10 N/mm^2 , Maximalwert 12 N/mm^2 , jeweils 2 N/mm^2 unterhalb sämtlicher anderer Ergebnisse), die sich auch in den Holzbruchanteilen widerspiegelt. Diese Reduktion ist jedoch sehr gering und bestätigt sich nicht bei den Querkzugproben, so daß nicht von einer mangelhaften Verleimung gesprochen werden kann.

Epoxidharz

Die Verklebung von Douglasienholz mit dem hier verwendeten Epoxidharz erzielte die besten Resultate bei einer Holzfeuchte von 18% . Allerdings ist zu beachten, daß auch bei einer Holzfeuchte von 12% von einer guten Verklebungsqualität ausgegangen werden kann.

Einfluß der Holzfeuchte

Die Verklebungsqualität von Douglasienholz mit den hier verwendeten Klebstoffen ist kaum von der Holzfeuchte abhängig. Bei den vorliegenden Ergebnissen sind kaum Unterschiede in der Verklebungsqualität bei den verschiedenen Holzfeuchten festzustellen.

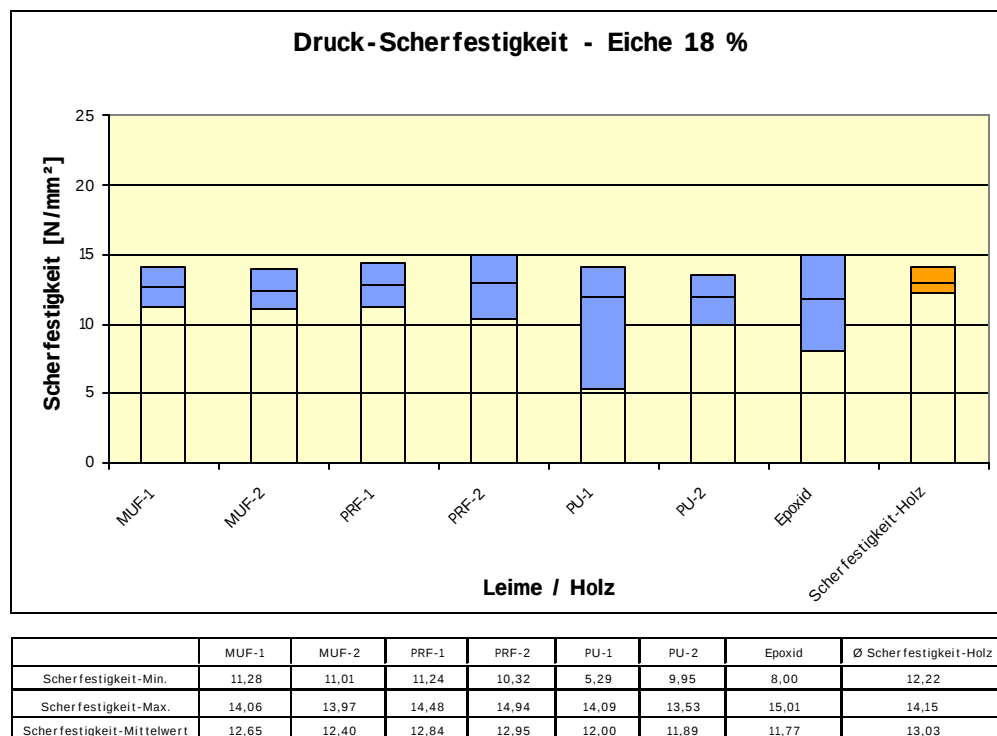
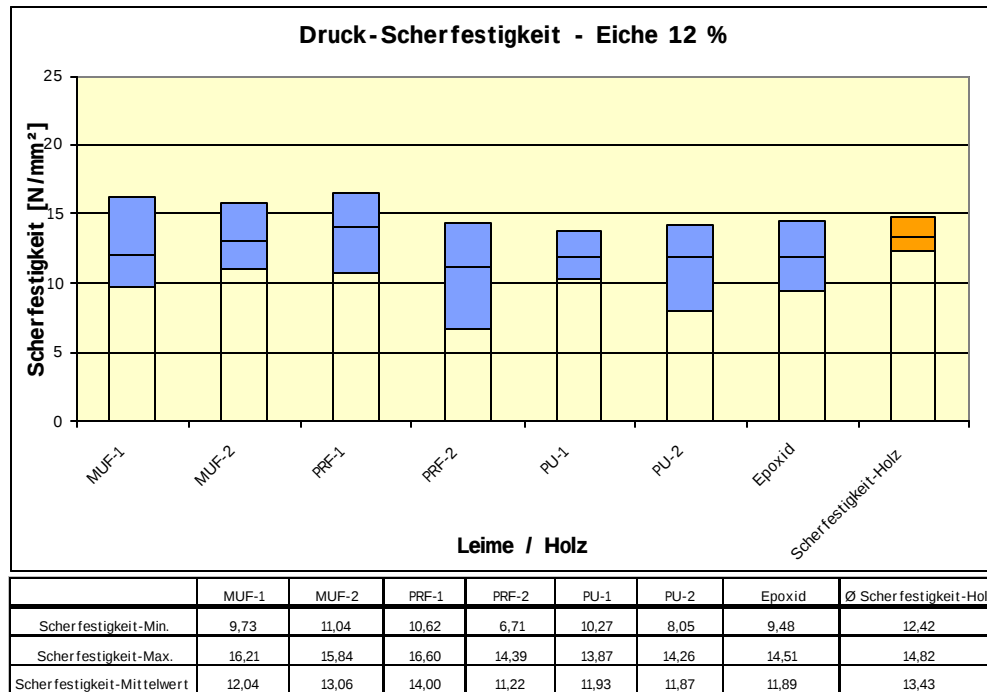
Zusammenfassung

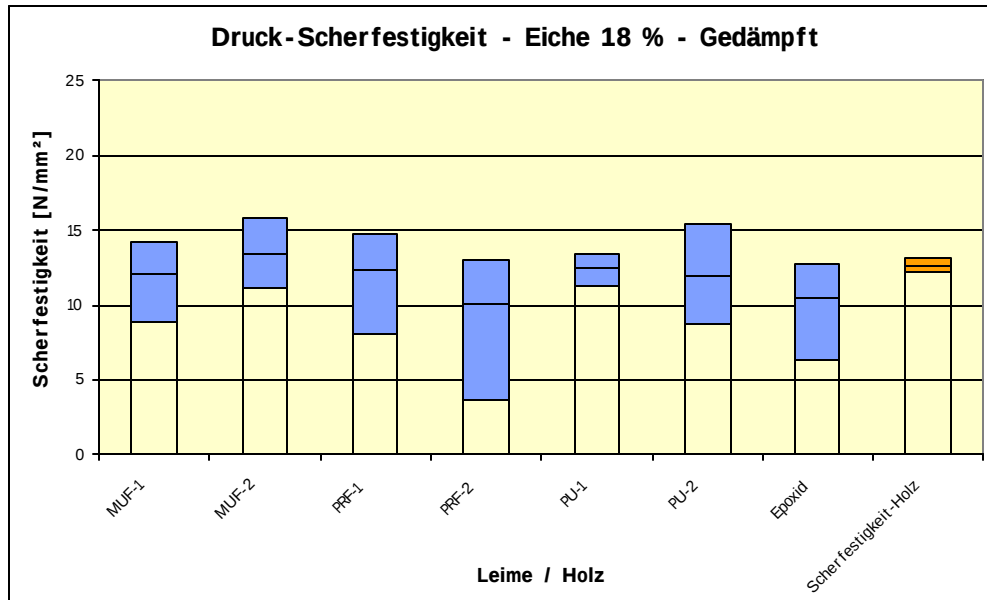
Die Verklebungseigenschaften von getrocknetem Douglasienholz sind bereits bekannt und finden Anwendung in der Praxis des Holzleimbau. Die hier vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß Douglasienholz mit den untersuchten Klebstoffen für diese Aufgabe und ebenfalls für die Anwendung bei höheren Holzfeuchten sehr gut geeignet ist.

3.1.3 Eiche

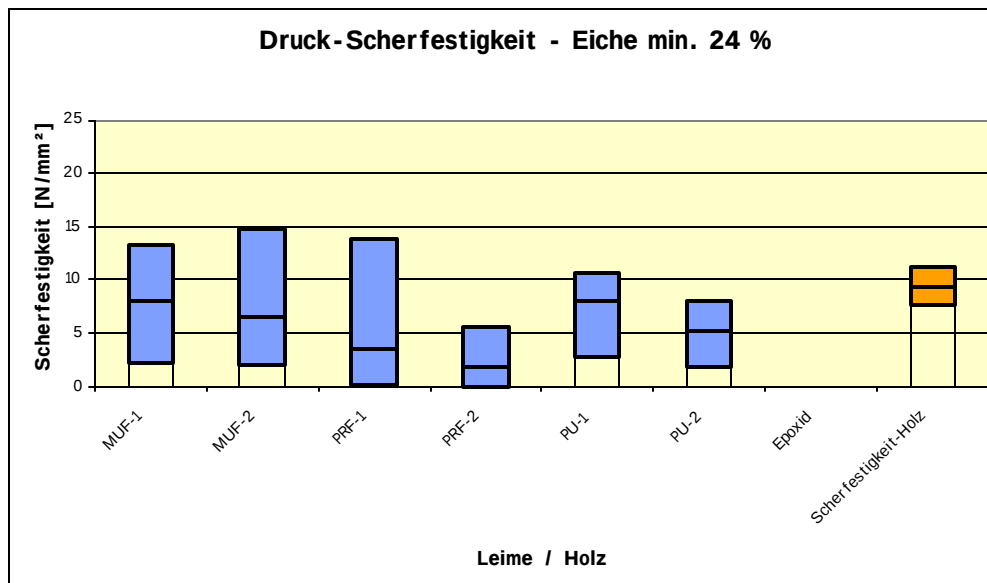
3.1.3.1 Scherproben

Druck-Scherfestigkeit



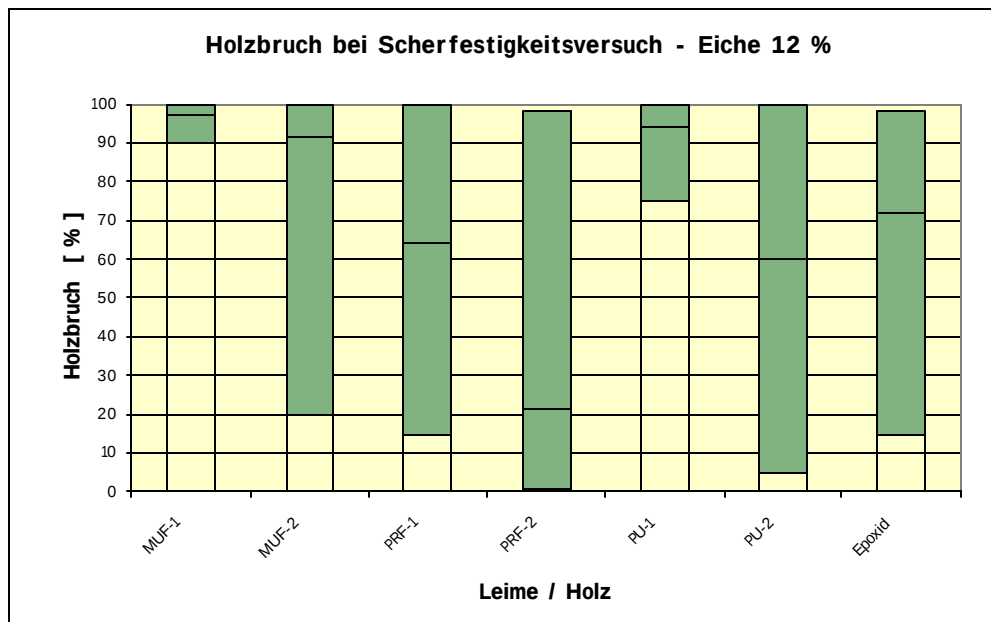


	MUF-1	MUF-2	PRF-1	PRF-2	PU-1	PU-2	Epoxid	Ø Scherfestigkeit-Holz
Scherfestigkeit-Min.	8,92	11,08	8,04	3,61	11,32	8,77	6,38	12,19
Scherfestigkeit-Max.	14,19	15,91	14,81	13,00	13,48	15,47	12,69	13,20
Scherfestigkeit-Mittelwert	12,12	13,42	12,31	10,07	12,46	12,02	10,44	12,64

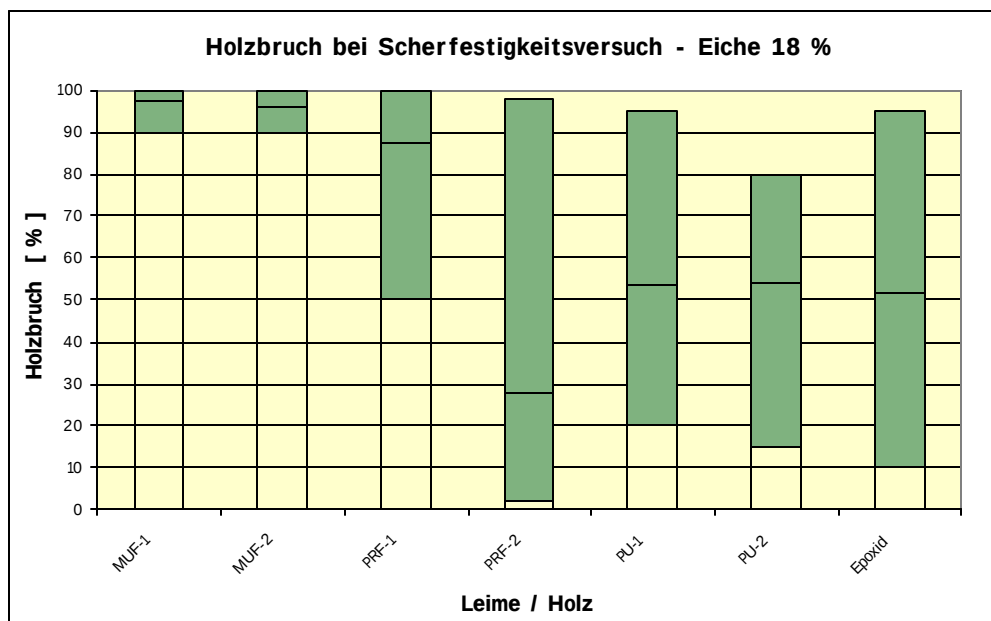


	MUF-1	MUF-2	PRF-1	PRF-2	PU-1	PU-2	Epoxid	Ø Scherfestigkeit-Holz
Scherfestigkeit-Min.	2,25	2,03	0,08	0,00	2,83	1,75	-	7,67
Scherfestigkeit-Max.	13,22	14,71	13,89	5,62	10,61	8,09	-	11,27
Scherfestigkeit-Mittelwert	8,04	6,45	3,60	1,83	8,11	5,22	-	9,39

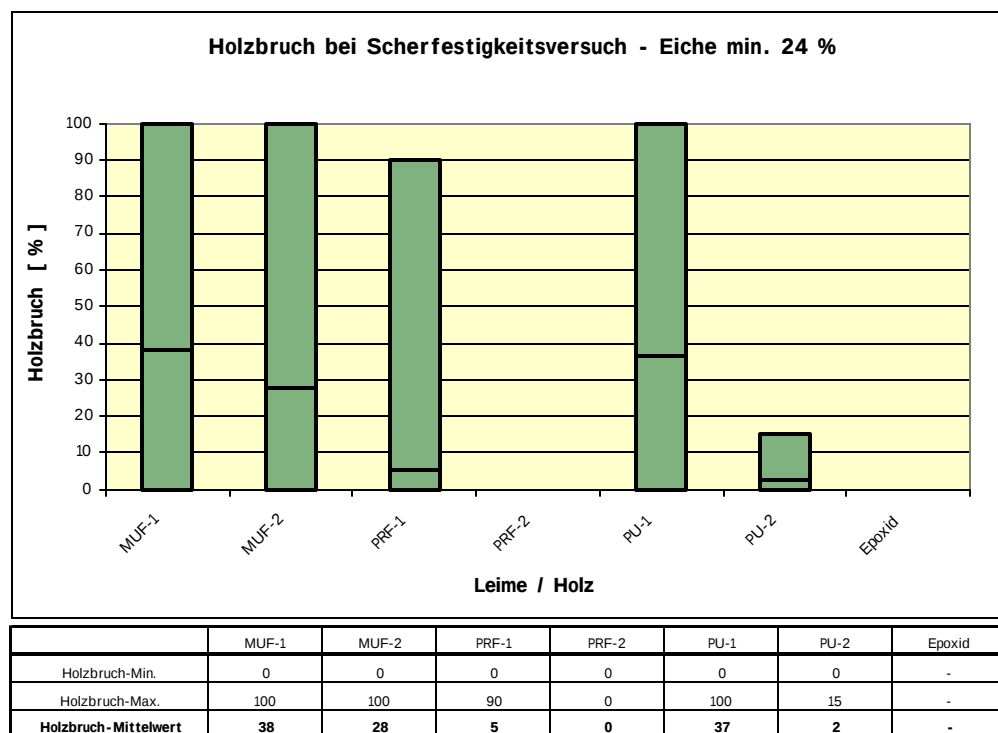
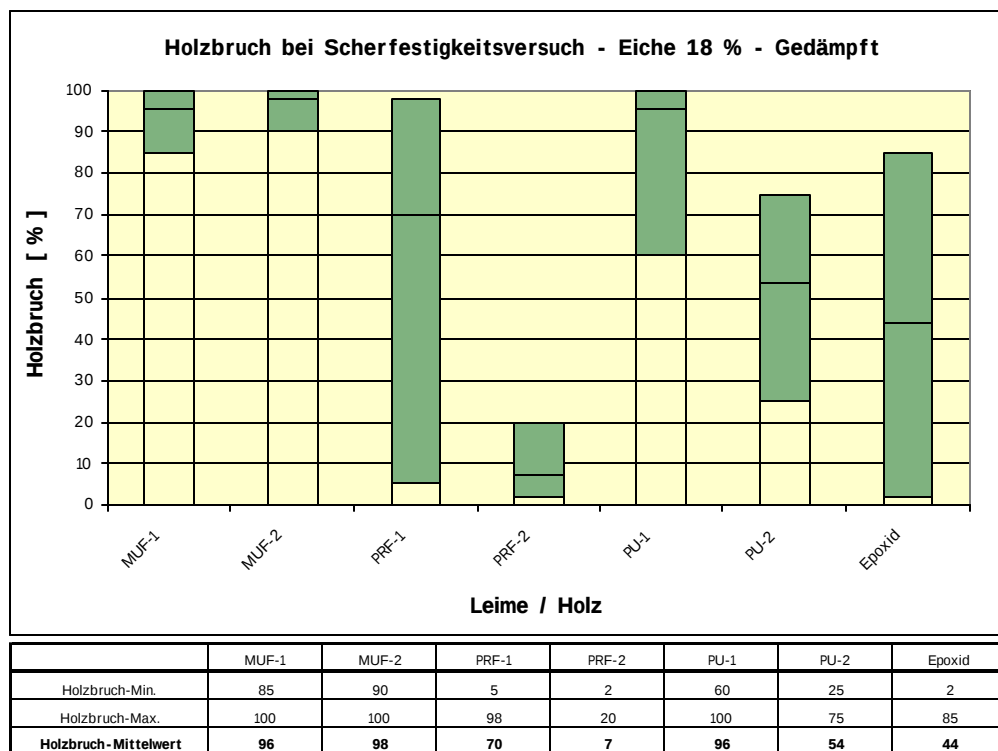
Holzbruchanteil



	MUF-1	MUF-2	PRF-1	PRF-2	PU-1	PU-2	Epoxid
Holzbruch-Min.	90	20	15	1	75	5	15
Holzbruch-Max.	100	100	100	98	100	100	98
Holzbruch-Mittelwert	97	92	64	21	94	60	72

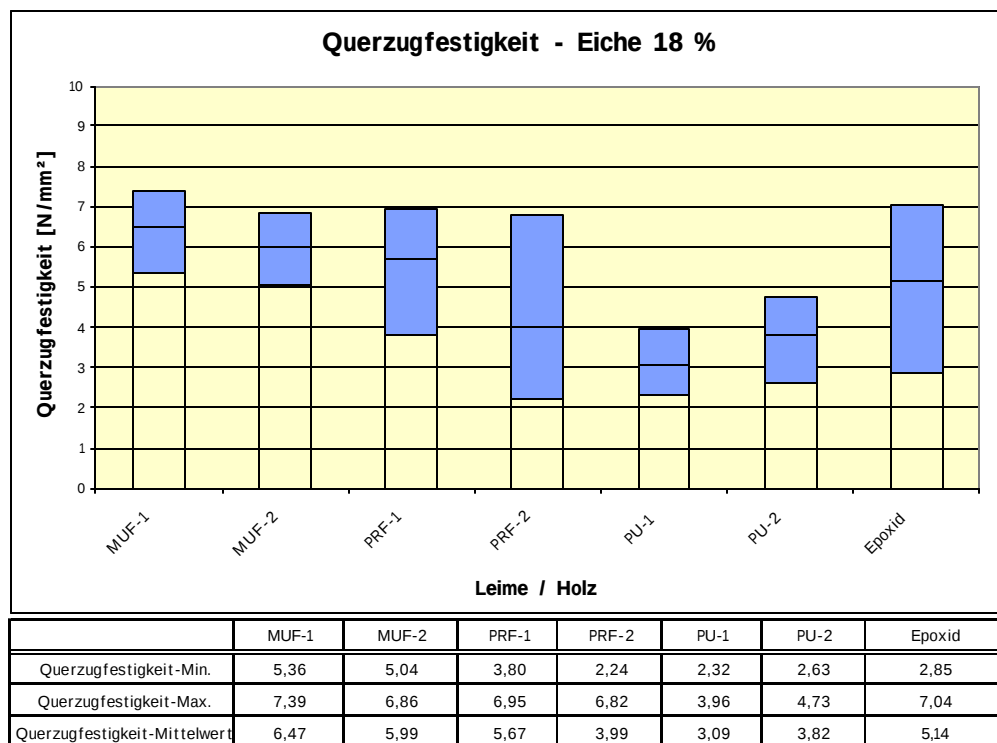
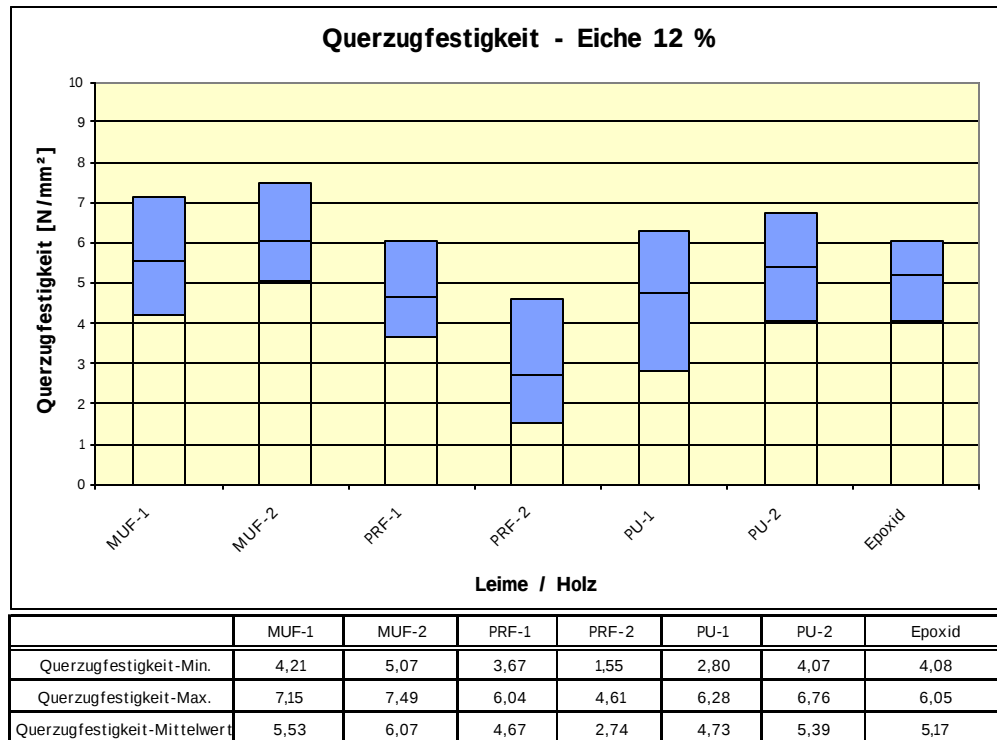


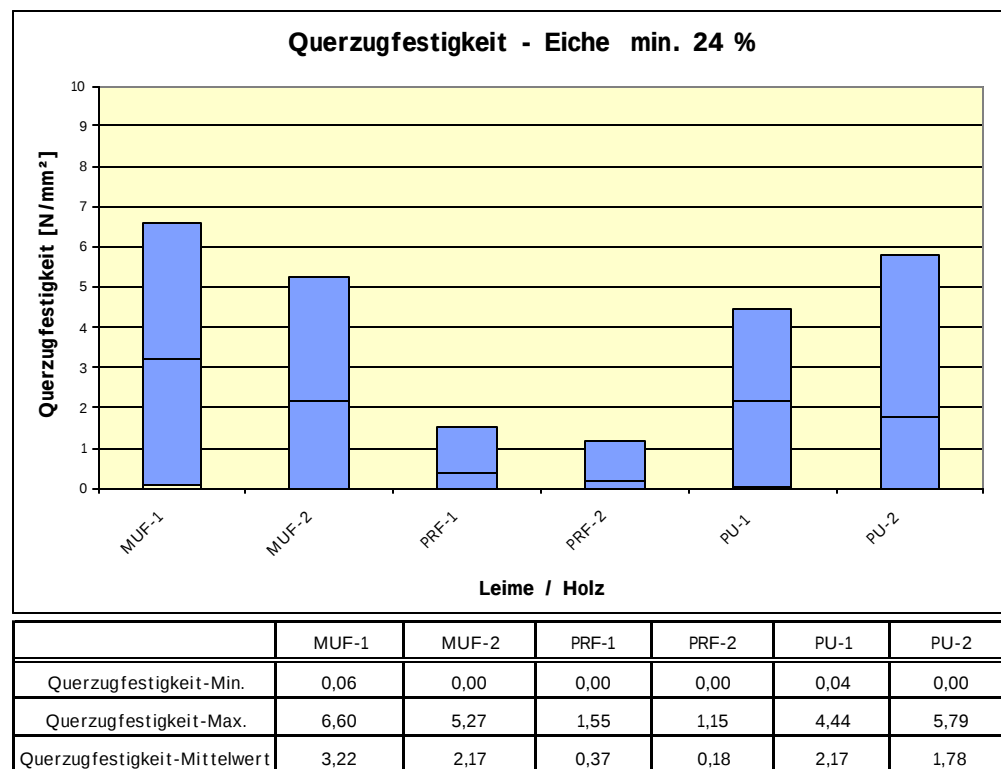
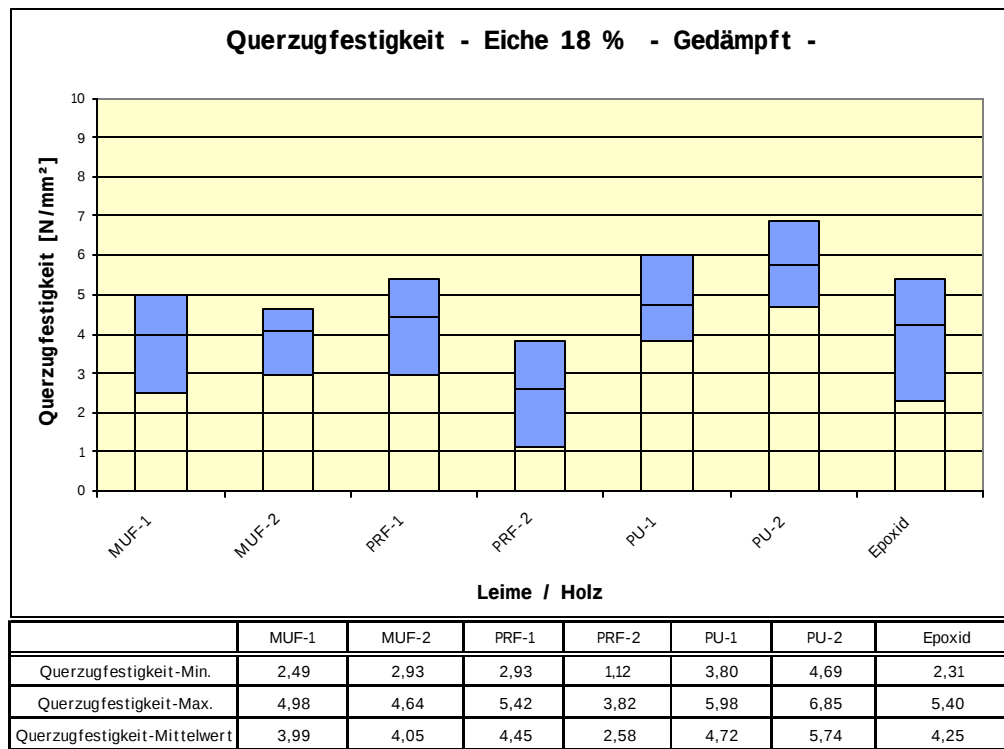
	MUF-1	MUF-2	PRF-1	PRF-2	PU-1	PU-2	Epoxid
Holzbruch-Min.	90	90	50	2	20	15	10
Holzbruch-Max.	100	100	100	98	95	80	95
Holzbruch-Mittelwert	98	96	87	28	53	54	51



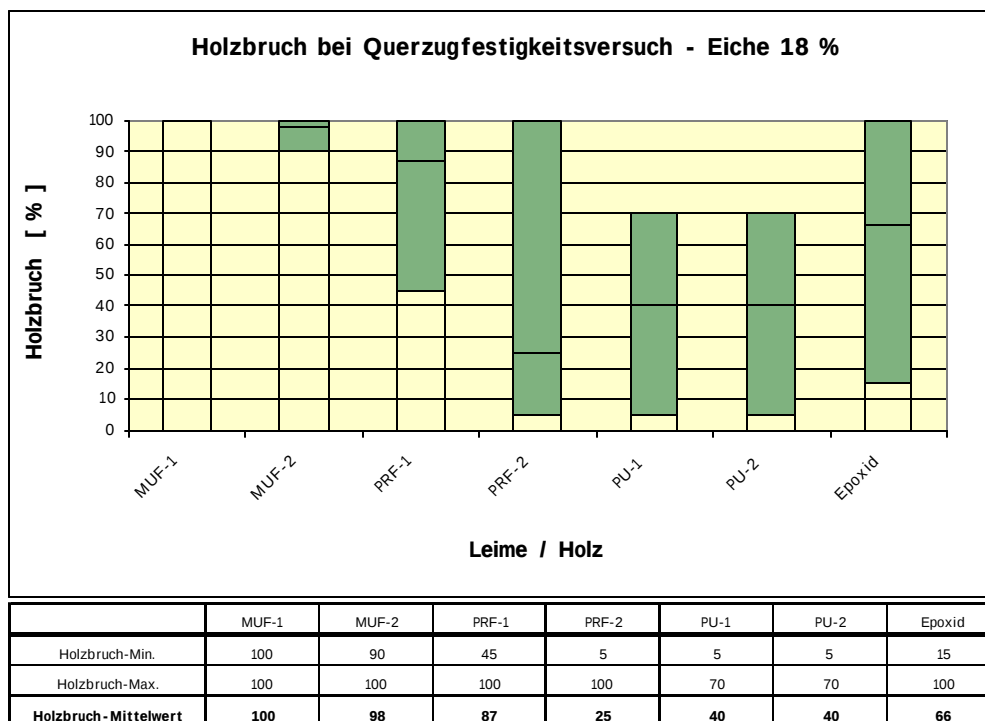
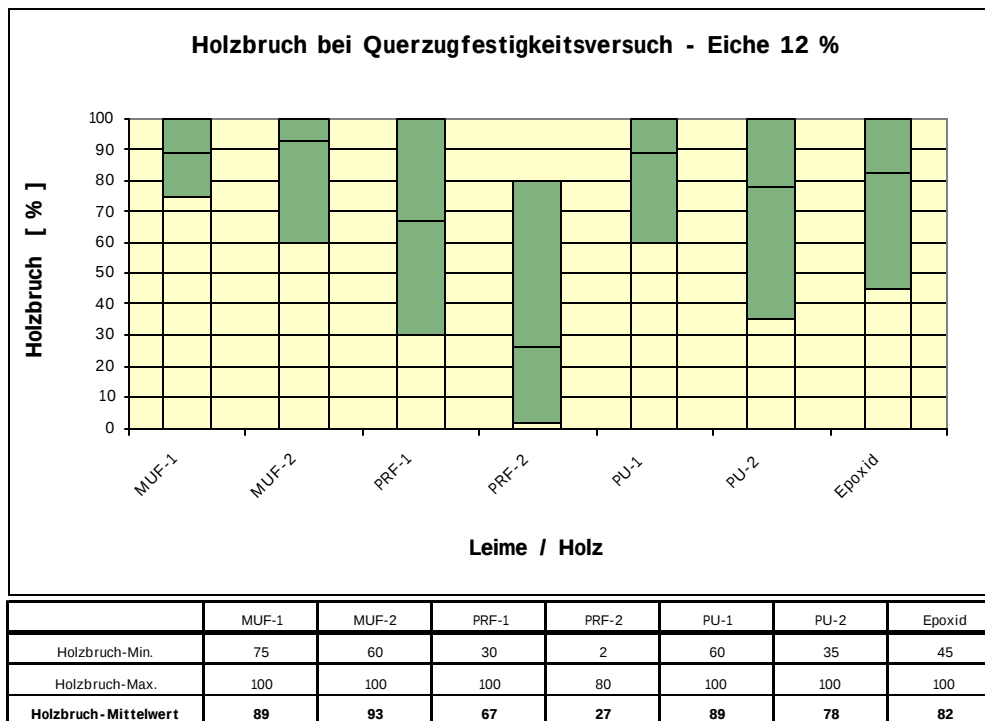
3.1.3.2 Querkzugproben

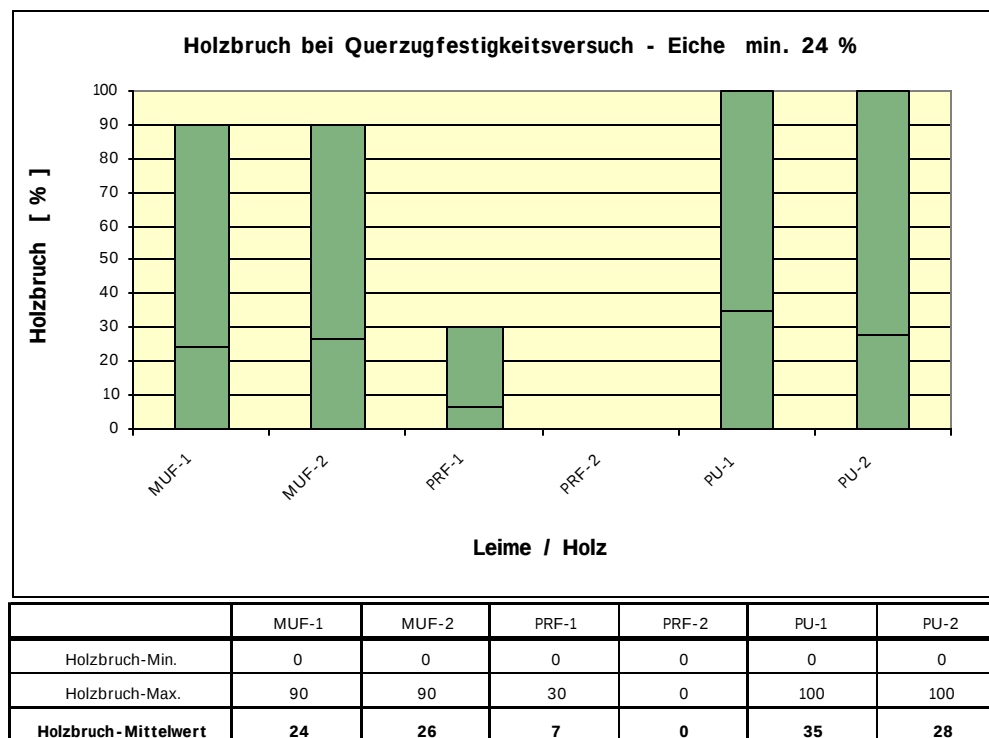
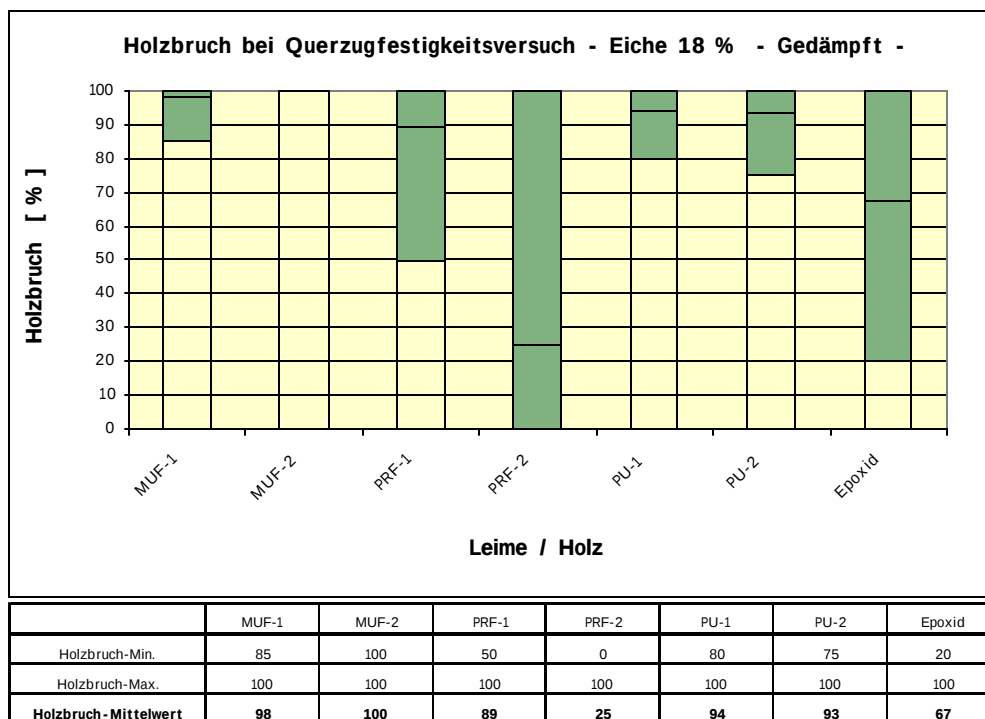
Querkzugfestigkeit





Holzbruchanteil





3.1.3.3 Ergebniszusammenfassung -Eiche-

MUF-Harze

Die zwei verwendeten Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze führten bei den niedrigeren Holzfeuchten von 12 % und 18 % zu einer guten Verklebungsqualität. Das teilweise vorhergehende Dämpfen hatte grundsätzlich keinen Einfluß auf die Ergebnisse.

Bei der Verarbeitung von nassem Holz (rel. Holzfeuchte > 24 %) war lediglich eine schlechte Qualität in Form von deutlich niedrigeren Festigkeitswerten sowie geringeren Holzbruchanteilen bei der Auswertung der Bruchbilder festzustellen.

PRF-Harze

Die zwei eingesetzten Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze führten zu ganz unterschiedlichen Resultaten. Bei Verwendung des PRF-1-Harzes waren sowohl bei 12 % als auch bei 18 % rel. Holzfeuchte gute Verleimungsqualitäten festzustellen.

Im Gegensatz dazu war die Verleimung mit dem PRF-2-Harz stets als mangelhaft zu bezeichnen, sogar bei der niedrigen Holzfeuchte von 12 %.

Die vorherige Dämpfung des Holzes zeigt keinen deutlichen Einfluß auf die Ergebnisse.

Die Verleimung von nassem Holz führte bei beiden Harzen zu schlechten Ergebnissen.

PU-Klebstoffe

Die zwei verwendeten PU-Klebstoffe erzielten bei der Verklebung von Eichenholz ganz ähnliche Resultate. Es konnte jedoch nur bei der geringsten Holzfeuchte von 12 % eine gute Verklebungsqualität festgestellt werden. Bei höheren Holzfeuchten war eine deutliche Reduktion der Festigkeitswerte sowie der Holzbruchanteile festzustellen. Dieses spricht für eine mangelhafte Verklebung.

Die Dämpfung des Holzes wirkte sich positiv auf die Ergebnisse aus. Die erreichten Resultate waren deutlich besser als die der unbehandelten Proben. Lediglich beim Klebstoff PU-2 waren bei den Scherversuchen keine optimalen Holzbruchbilder feststellbar, die Festigkeitswerte lagen jedoch im Bereich der Holzfestigkeit. Ansonsten konnte bei der Verklebung von gedämpftem Eichenholz mit einer Holzfeuchte von 18 % eine gute Qualität festgestellt werden. Dies läßt auf eine positive Auswirkung der Dämpfung schließen, die im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nicht weiter betrachtet oder begründet wird.

Epoxidharz

Die Verklebung von trockenem Eichenholz (12% rel. Holzfeuchte) mit dem hier verwendeten Epoxidharz führte zu einer prinzipiell guten Verleimungsqualität. Bei der Verklebung von 18%igem Holz wurden geringfügig schlechtere Resultate erzielt.

Die Dämpfung vor der Verklebung resultierte in einer deutlich schlechteren Verklebungsqualität.

Einfluß der Holzfeuchte

Die Verleimung von nassem Eichenholz führte in allen Fällen zu einer schlechten Verklebungsqualität. Die zunehmende Holzfeuchte wirkt sich je nach Klebstoff verschieden auf die Ergebnisse aus. Bei den PU-Klebstoffen ist eine deutliche Verschlechterung der Resultate bereits bei einer Holzfeuchte von 18% festzustellen. Bei beiden MUF-Harzen sowie bei dem PRF-1-Harz bleibt die Zunahme der Holzfeuchte auf 18% ohne nennenswerten Einfluß auf die Verleimungsqualität.

Einfluß der Holzdämpfung

Teilweise verbesserte sich die Verklebungsqualität der gedämpften Proben im Vergleich zu den ungedämpften Proben. Besonders auffällig war dieses bei der Querkzugprüfung der mit beiden PU-Klebstoffen verklebten Proben feststellbar. Die Holzbruchanteile stiegen bei beiden PU-Klebstoffen von einem Mittelwert bei beiden von 40% auf Mittelwerte von 94% bzw. 93%. Die absoluten Querkzugfestigkeitswerte verbesserten sich im Durchschnitt von 3,1 N/mm² auf 5,7 N/mm² (PU-1), bzw. von 3,8 N/mm² auf 5,7 N/mm² (PU-2).

Diese Ergebnisverbesserung zeigt sich nicht bei den Druckscherprüfungen, so daß keine allgemeingültige Aussage getroffen wird.

Zusammenfassung

Die Verklebung von Eichenholz ist -wie die praktische Erfahrung vieler Brettschicht-holzhersteller behauptet- sehr schwierig. Die Resultate zeigen, daß die Verklebung in trockenem Zustand (rel. Holzfeuchte von 12 %) prinzipiell möglich ist, auch wenn einzelne Klebstoffe dafür besser, andere schlechter geeignet scheinen. Insbesondere interessant ist die Feststellung, daß ein Produkt aus der Gruppe der Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze in diesem Fall eindeutig als nicht geeignet zu bezeichnen ist.

Daraus folgt, daß die Verklebungsqualität von Eichenholz nicht nur vom verwendeten Klebstofftyp abhängig ist, da auch innerhalb eines gleichen Klebstofftyps starke Ergebnisunterschiede auftreten.

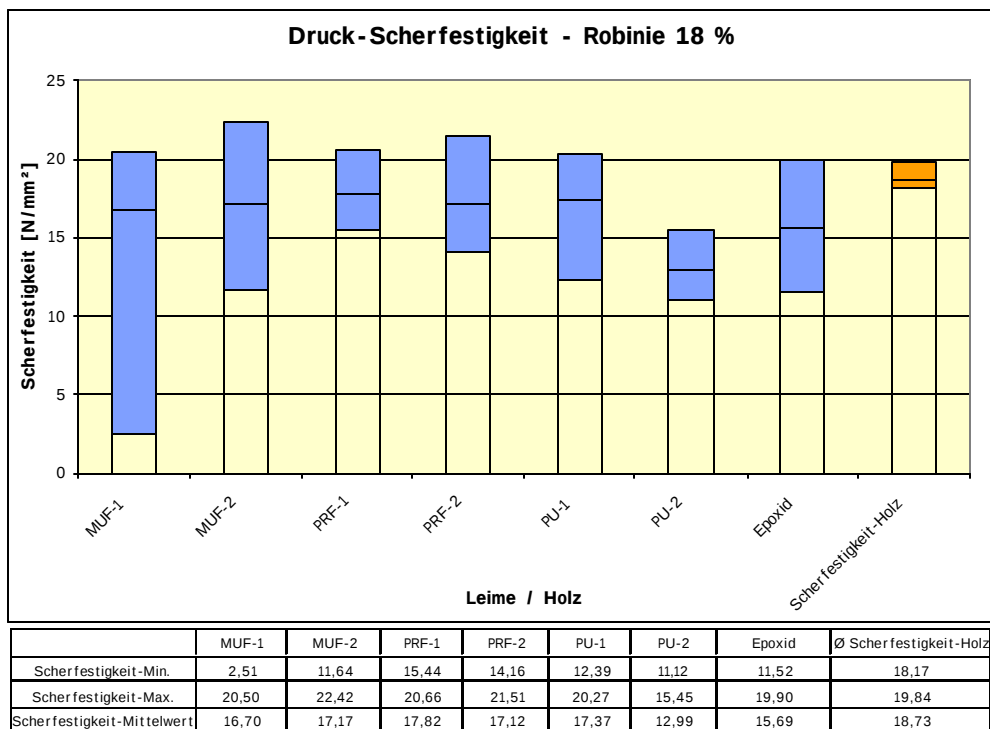
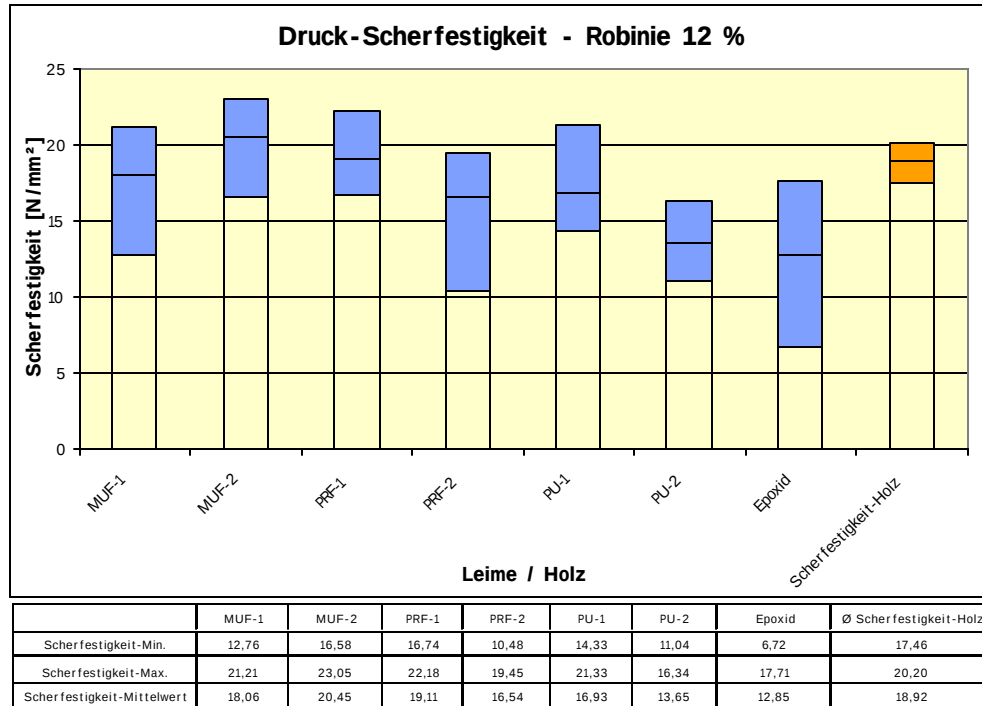
Bei der Verwendung von PU-Klebstoffen bei der höheren Holzfeuchte von 18 % ist die starke Reduktion der Werte zu beachten.

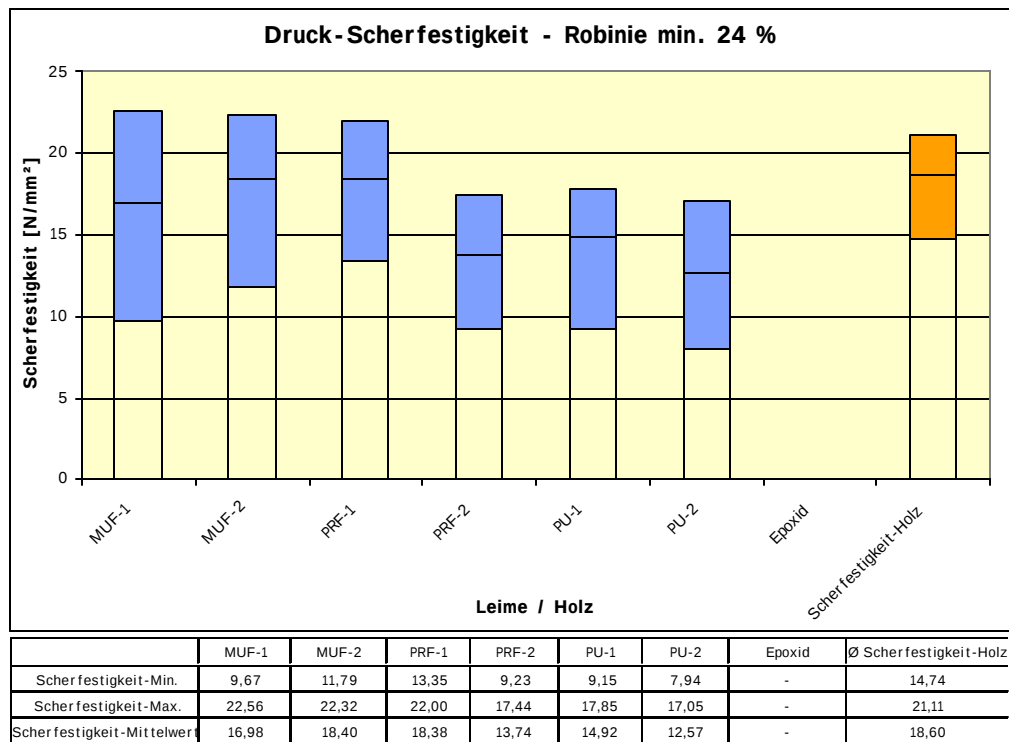
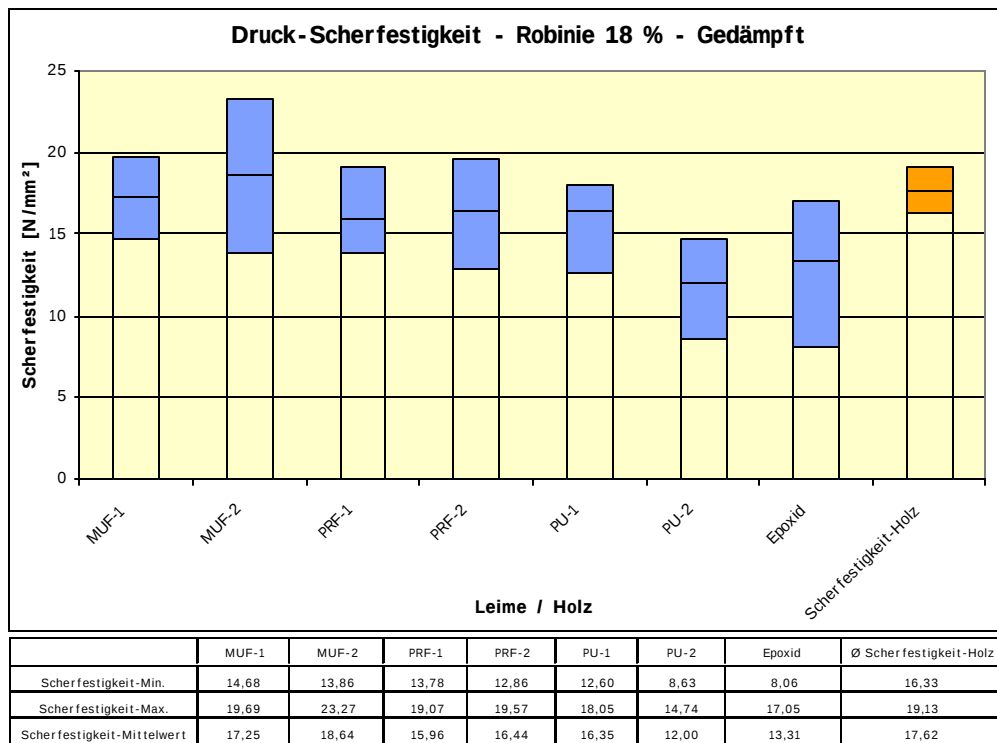
Durchweg positive Resultate konnten nur mit den Harzen PRF-1 und MUF-1 erzielt werden. In beiden Fällen ist eine korrekte Verleimung auch bei einer etwas erhöhten Holzfeuchte möglich. Die Vorbehandlung durch Dämpfung führte in der Regel zu keiner Reduktion der Verleimungsqualität.

3.1.4 Robinie

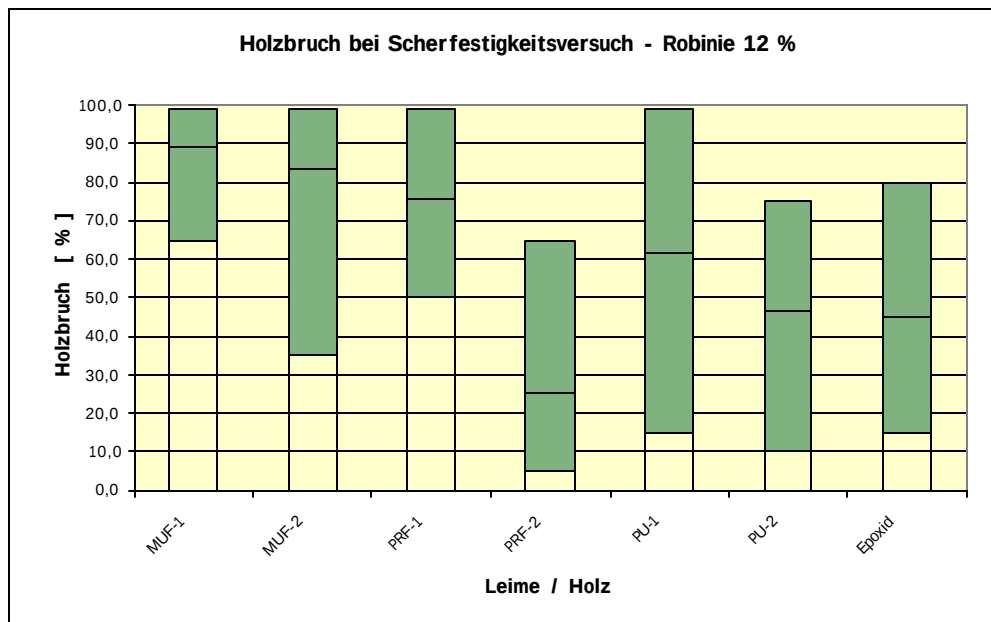
3.1.4.1 Scherproben

Druck-Scherfestigkeit

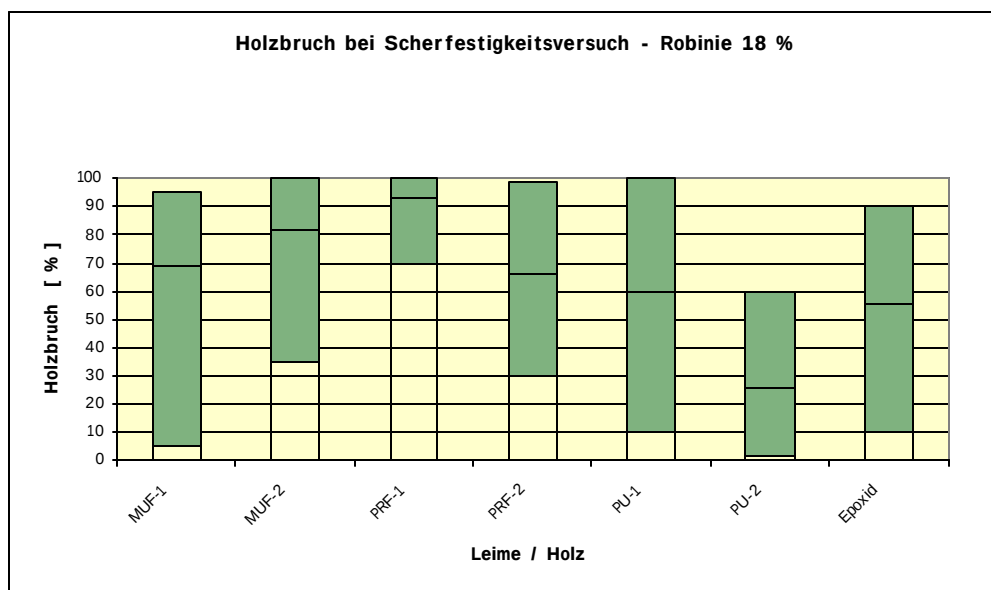




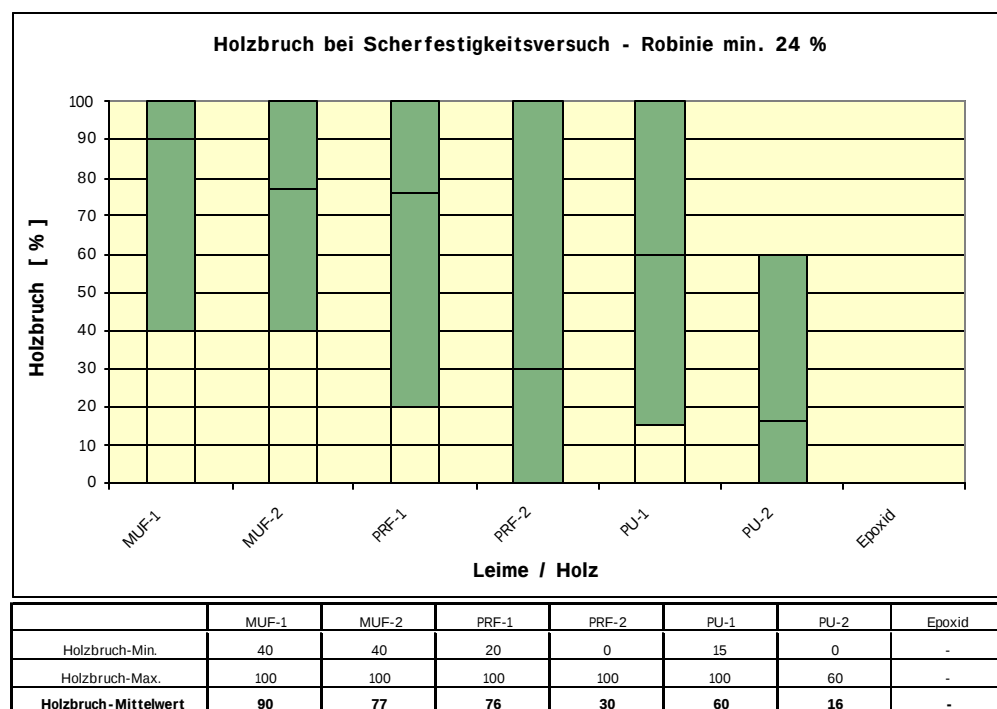
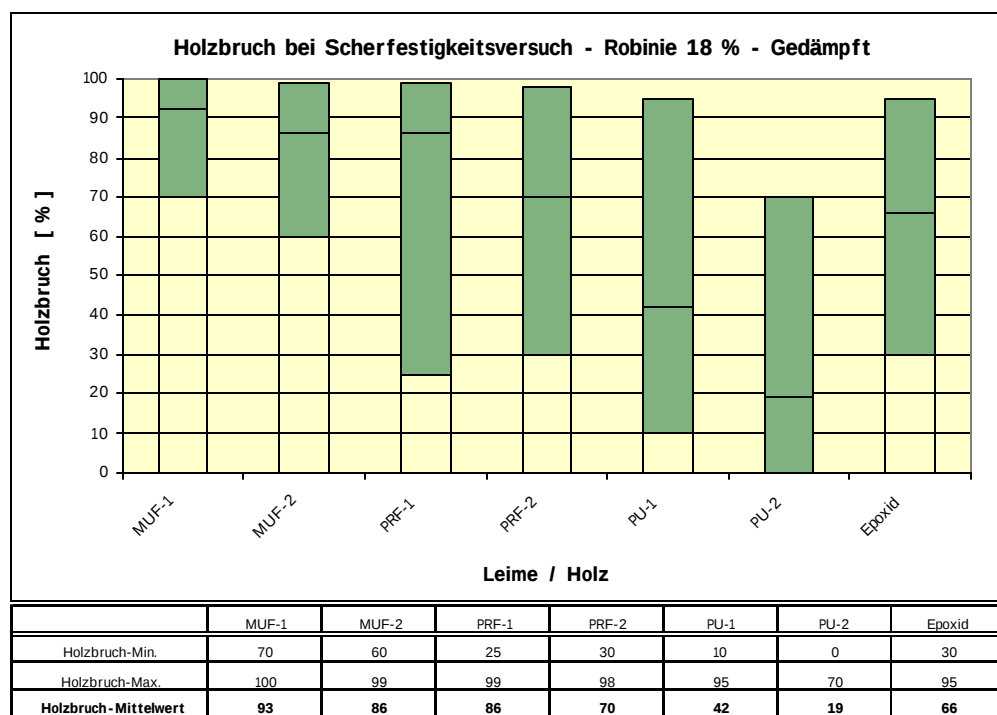
Holzbruchanteil



	MUF-1	MUF-2	PRF-1	PRF-2	PU-1	PU-2	Epoxid
Holzbruch-Min.	65	35	50	5	15	10	15
Holzbruch-Max.	99	99	99	65	99	75	80
Holzbruch - Mittelwert	89	84	76	25	61	46	45

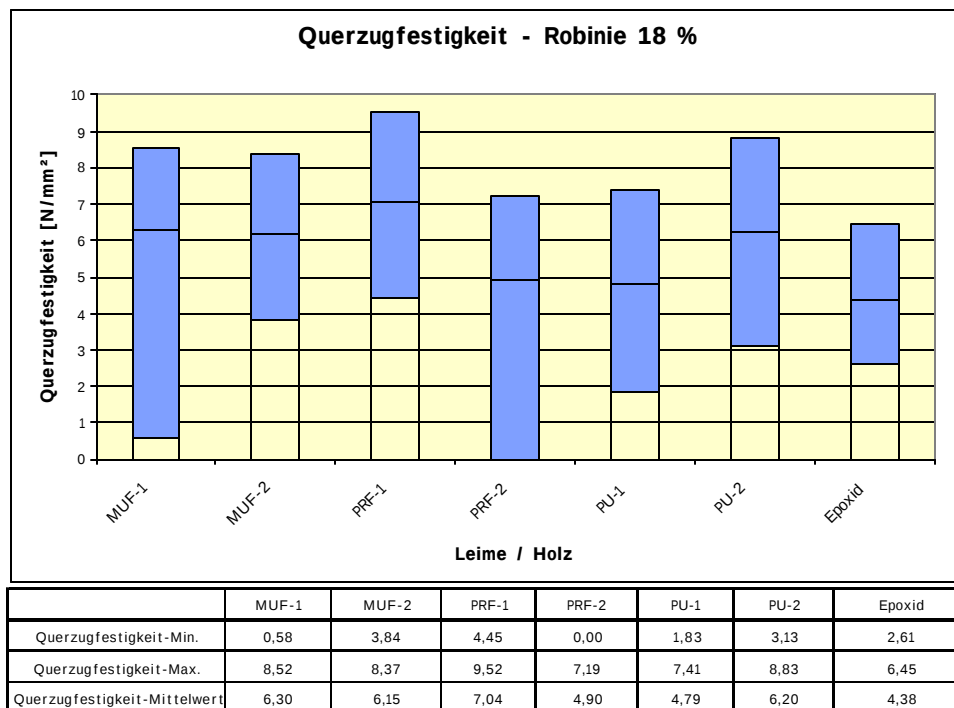
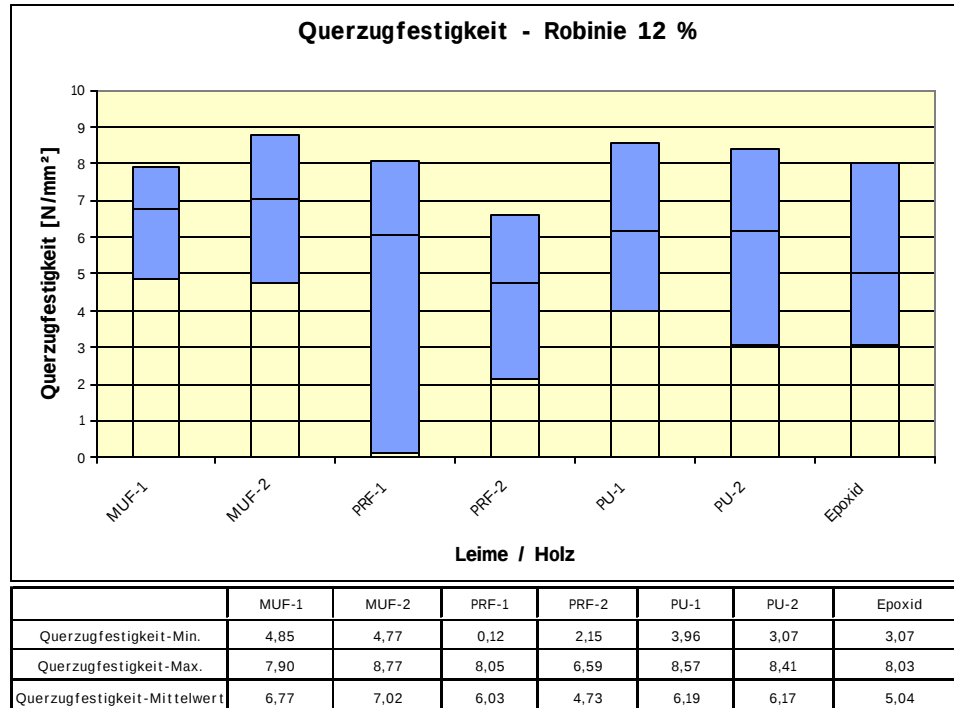


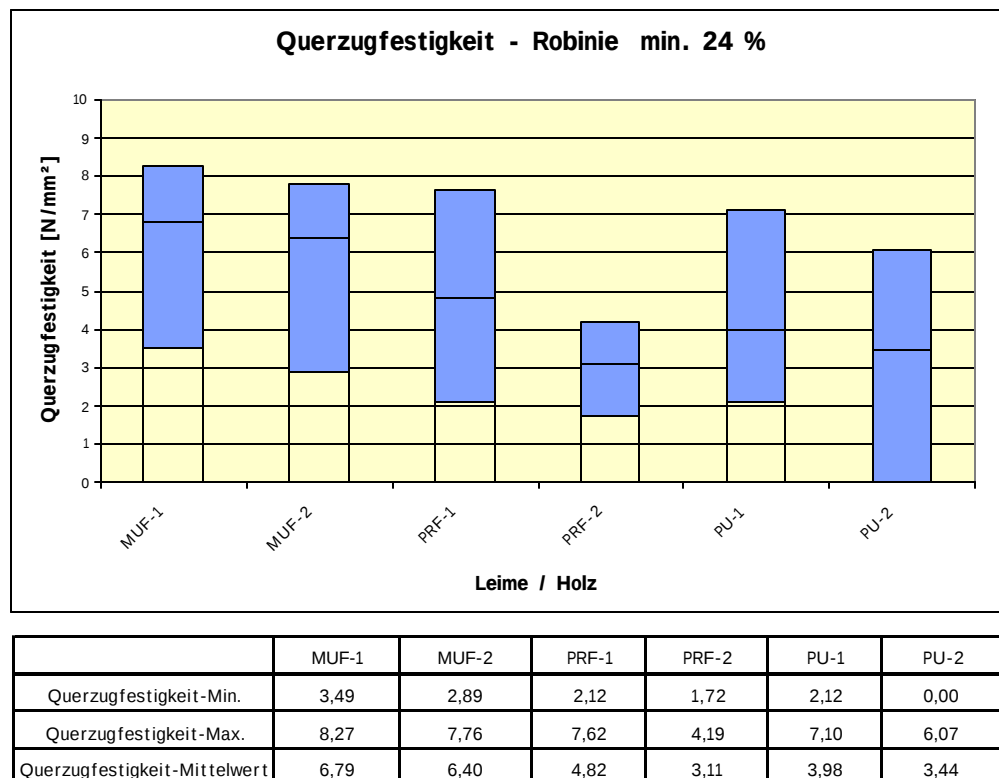
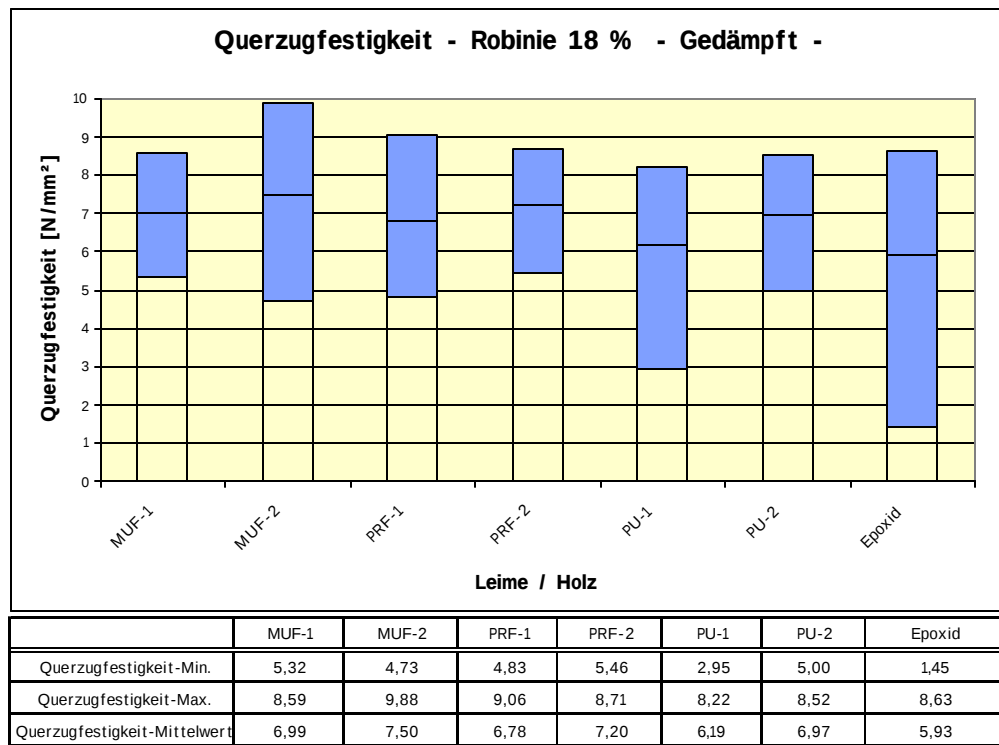
	MUF-1	MUF-2	PRF-1	PRF-2	PU-1	PU-2	Epoxid
Holzbruch-Min.	5	35	70	30	10	2	10
Holzbruch-Max.	95	100	100	99	100	60	90
Holzbruch - Mittelwert	69	82	93	66	60	26	55



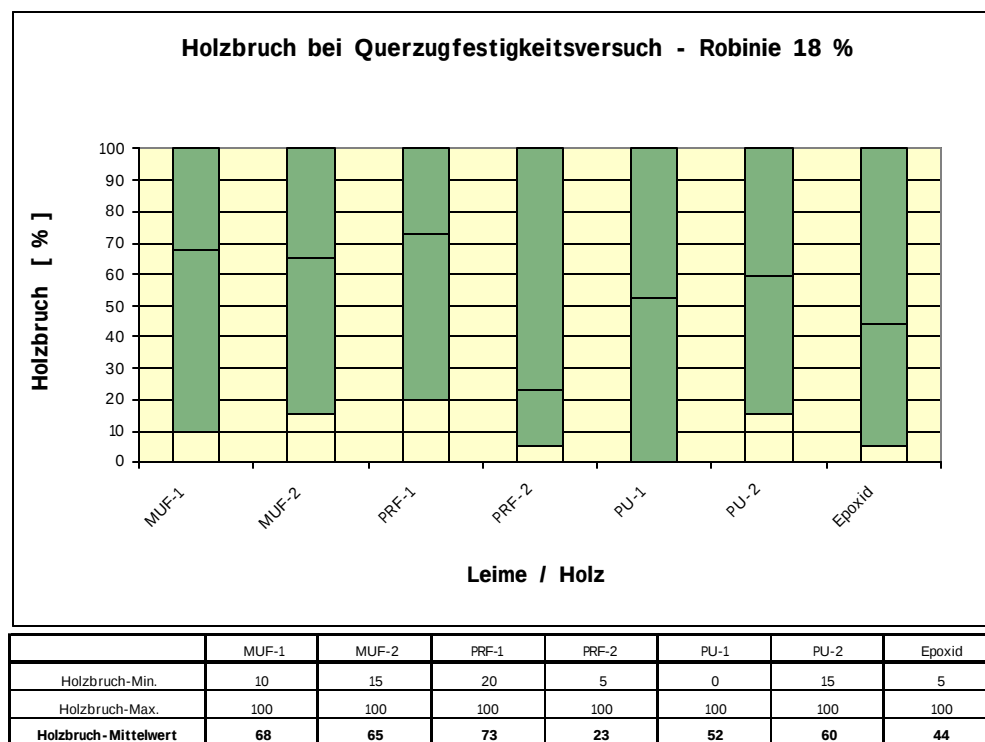
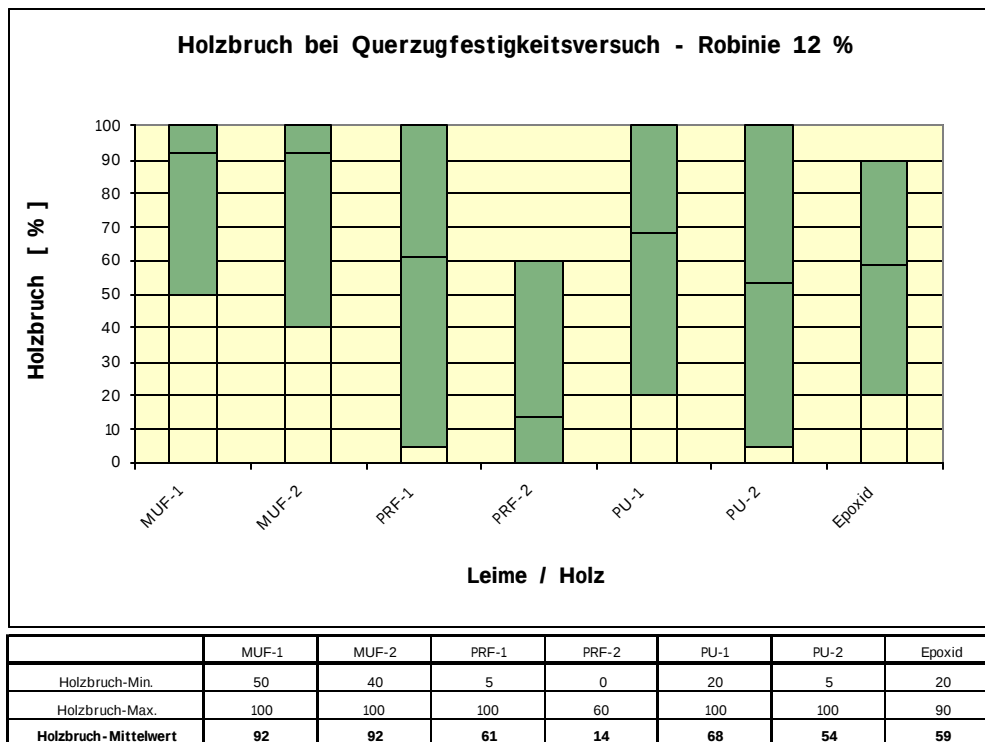
3.1.4.2 Querkzugproben

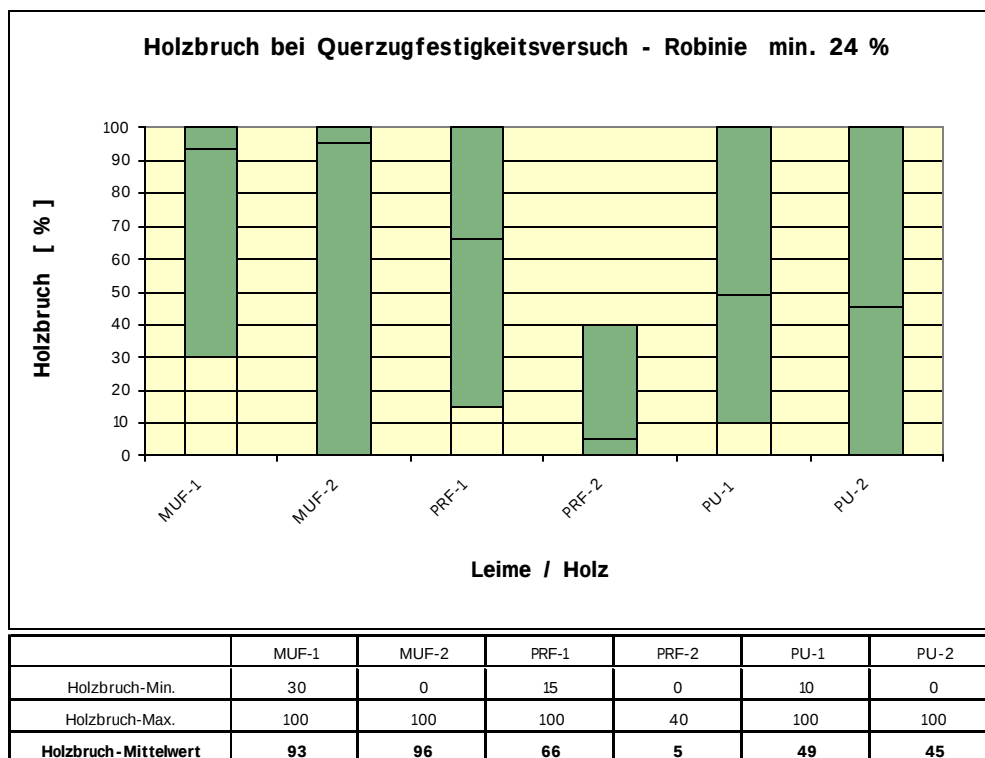
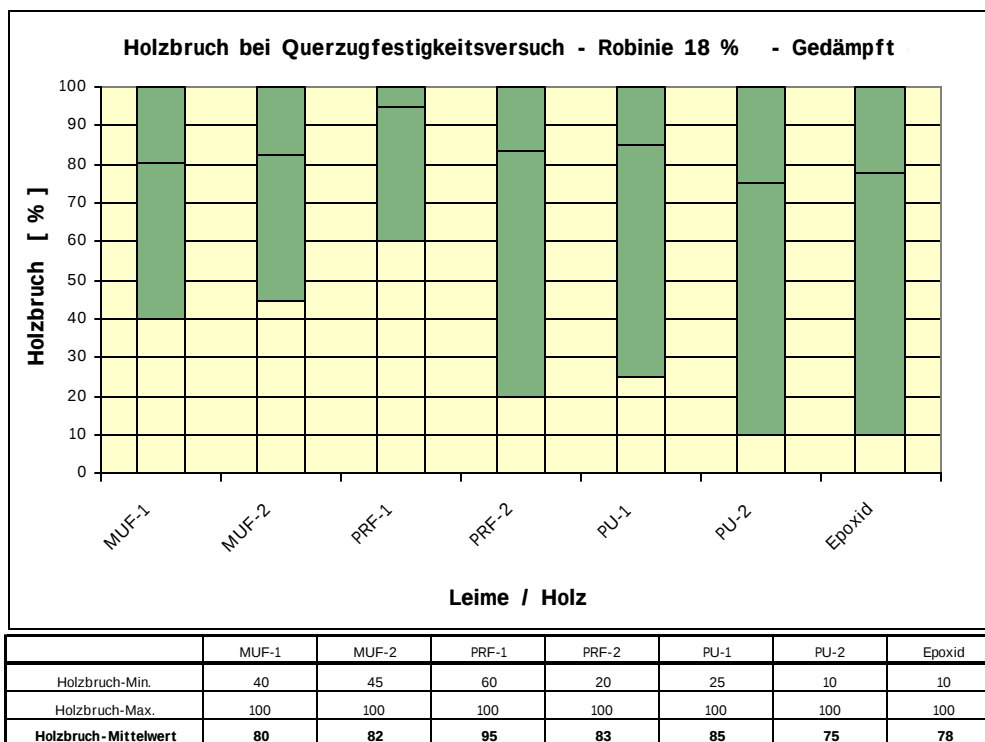
Querkzugfestigkeit





Holzbruchanteil





3.1.4.3 Ergebniszusammenfassung -Robinie-

MUF-Harze

Die verwendeten MUF-Harze führten grundsätzlich zu ähnlichen Resultaten, die auf eine korrekte Verleimung schließen lassen. Die nicht immer 100%igen Holzbruchanteile sollen das positive Gesamtbild nicht schmälern, da sie immer von sehr guten Festigkeitswerten begleitet werden. Die Differenzen zwischen den Mittel- und Maximalwerten der Festigkeiten sind mit einer Ausnahme bei 18 % Holzfeuchte (MUF-1) stets gering, bzw. die Mittelwerte sind stets als sehr hoch zu beurteilen. Insgesamt betrachtet ergibt sich ein allgemein positives Resultat. Besonders interessant ist die Tatsache, daß die Holzfeuchte keinen großen Einfluß auf das Gesamtergebnis zu haben scheint. So konnten ähnlich gute Verleimungsergebnisse sogar bei einer Holzfeuchte von über 24 % festgestellt werden.

PRF-Harze

Die zwei untersuchten PRF-Harze führten zu zum Teil stark unterschiedlichen Ergebnissen. Es zeigt sich, daß mit dem PRF-2-Harz kaum eine korrekte Verleimung von Robinienholz erreicht werden kann, da die Ergebnisse unter allen Randbedingungen als schlecht zu bezeichnen sind. Selbst bei der optimalen Bedingung, bei trockenem Robinienholz (12 % rel. Holzfeuchte), sind nur Holzbruchanteil-Mittelwerte von 14 % im Quersugversuch und von 25% im Druckscherversuch festzustellen. Bei der höchsten Holzfeuchte >24 % zeigte das niedrigste Ergebnis der Druckscherprüfung bei 9,23N/mm² einen reinen Bruch in der Leimfuge (0% Holzbruchanteil).

Der PRF-1-Harz hingegen zeigt unter sämtlichen Randbedingungen Eigenschaften, die mindestens auf eine zuverlässige Verleimung schließen lassen. Selbst die Verleimung im nassen Zustand (rel. Holzfeuchte > 24 %) im Vergleich zu den trockenen Proben (rel. Holzfeuchte 12 %) brachte keine Reduktion der Resultate. Die Spitzenwerte der Festigkeit liegen immer im Bereich der Holzfestigkeit. Die Verleimung von Robinienholz mit einer Holzfeuchte von 18% erzielte die besten Resultate.

PU-Klebstoffe

Auch die beiden verwendeten PU-Klebstoffe zeigen ein teilweise stark unterschiedliches Verhalten. Bei den Querkzugprüfungen wurden bei beiden Klebstoffen weitestgehend ähnliche Resultate festgestellt, die trotz relativ geringer Holzbruchanteile sehr gute absolute Festigkeitswerte erzielten. Die Holzbruchanteile liegen bei den Holzfeuchten von 12 % und 18 % im Mittelwert über 60 % und im Maximalwert bei 100 %. Die Querkzugfestigkeitsprüfung ergab Werte zwischen 6 N/mm² (Mittelwerte) und 8,6 N/mm² (Maximalwerte), die denen einer hochwertigen Verklebung entsprechen. Bei den Druckscherversuchen sind die Resultate jedoch deutlich schlechter, insbesondere beim PU-2-Klebstoff. Bei der höchsten Holzfeuchte (> 24 %) ist eine deutlich Reduktion der Verklebungsqualität festzustellen, die sich auch in den maximal erreichten Festigkeitswerten widerspiegelt.

Epoxidharz

Die Verklebung von Robinienholz mit dem hier verwendeten Epoxidharz führte bei keiner Holzfeuchte zu positiven Resultaten. Die Prüfungen des gedämpften Holzes erzielten im allgemeinen etwas bessere, aber immer noch unbefriedigende Resultate.

Einfluß der Holzfeuchte

Die Holzfeuchte zeigt unterschiedliche Einflüsse auf die Verklebungsqualität. Die zu erwartende Verschlechterung der Verklebungsqualität bei zunehmender Holzfeuchte kann bei den zwei MUF-Harzen nicht festgestellt werden. Andererseits jedoch ist diese Verschlechterung aufgrund einer höheren Holzfeuchte bei der Verklebung mit dem PRF-2-Harz deutlich erkennbar.

Bei den PU-Klebstoffen konnten keine besonderen Qualitätsunterschiede zwischen den Holzfeuchten 12 % und 18 % bemerkt werden. Bei der höchsten Holzfeuchte (> 24 %) ist eine Reduktion der Festigkeiten und der Holzbruchanteile festzustellen.

Einfluß der Holzdämpfung

Der Einfluß der Holzdämpfung konnte direkt beobachtet werden, da ungedämpfte und gedämpfte Proben mit einer Holzfeuchte von 18 % mit ansonsten gleichen Randbedingungen untersucht wurden. Teilweise ist bei den gedämpften Proben eine deutliche Verbesserung der Resultate festzustellen. Insbesondere ist dies bei den Querkzugproben mit den Klebstoffen PRF-2, PU-1 und PU-2 der Fall. Ein gleicher Effekt konnte bei den Scherproben nicht festgestellt werden, so daß daraus keine allgemeine Schlußfolgerung gezogen werden kann.

Zusammenfassung

Die Verklebung von Robinienholz bestätigt sich als nicht einfach. Von den untersuchten Klebstofftypen haben nur wenige zu einer guten Verleimungsqualität geführt. Besonders interessant sind die unterschiedlichen Ergebnisse mit Klebstoffen des gleichen Typs, aber von verschiedenen Herstellern. Es muß somit daraus geschlossen werden, daß die Qualität der Verleimung vom jeweils genutzten Klebstoff abhängig ist und dementsprechend keine generellen Angaben gemacht werden können.

Zu beachten ist ebenfalls die Feststellung, daß bei bestimmten Klebstoffen eine Verklebung mit höheren Holzfeuchten (18 % und >24 %) zu keiner Reduktion der Verklebungsqualität führt.

Die Holzbehandlung durch Dämpfen hat zu keiner Reduktion der Verklebungsqualität von Robinienholz geführt. In einzelnen Fällen konnte sogar eine Verbesserung erzielt werden.

Im Vergleich zur Untersuchung von verklebtem Eichenholz (s. Kap. 3.1.3) läßt sich feststellen, daß bei beiden Laubholzarten die Verklebung mit einer Holzfeuchte von 12 % teilweise gute Resultate zeigt. Dies ist ebenfalls bei der höheren Holzfeuchte von 18 % der Fall. Deutliche Unterschiede zeigen sich bei der höchsten Holzfeuchte (> 24 %), die Verklebung von Eiche führte zu keinen befriedigenden Ergebnissen, wogegen die Robinienproben teilweise sehr gute Resultate erzielten. Die Verklebung mit PRF-2-Harz zeigte bei beiden Holzarten starke Schwächen.

3.2 Keilgezinkte Stöße

	Douglasie			Eiche		
	MUF	PRF	PU	MUF	PRF	PU
Anzahl Proben	19	19	16	14	13	19
Festigkeit [N/mm ²]						
max	50,35	44,15	51,59	53,82	27,03	48,86
min	13,39	25,30	18,60	32,74	16,62	22,57
mittel	33,14	35,10	32,20	43,88	21,62	35,40
s	10,77	6,08	9,41	7,71	3,27	8,48
5%	15,42	25,10	16,72	31,20	16,24	21,44
v	0,32	0,17	0,29	0,18	0,15	0,24
Bruchart in %						
Holzbruch (B)	0	5	6	0	0	0
Zinkengrund (A, A+B)	37	5	6	0	0	0
Mischbruch Holz+Keilz. (MAM,M)	63	89	88	64	0	58
Zinkenflanke Leim (D)	0	0	0	36	100	42

Abbildung 3.1.4-1: Ergebnisse der Keilzinken zugprüfung

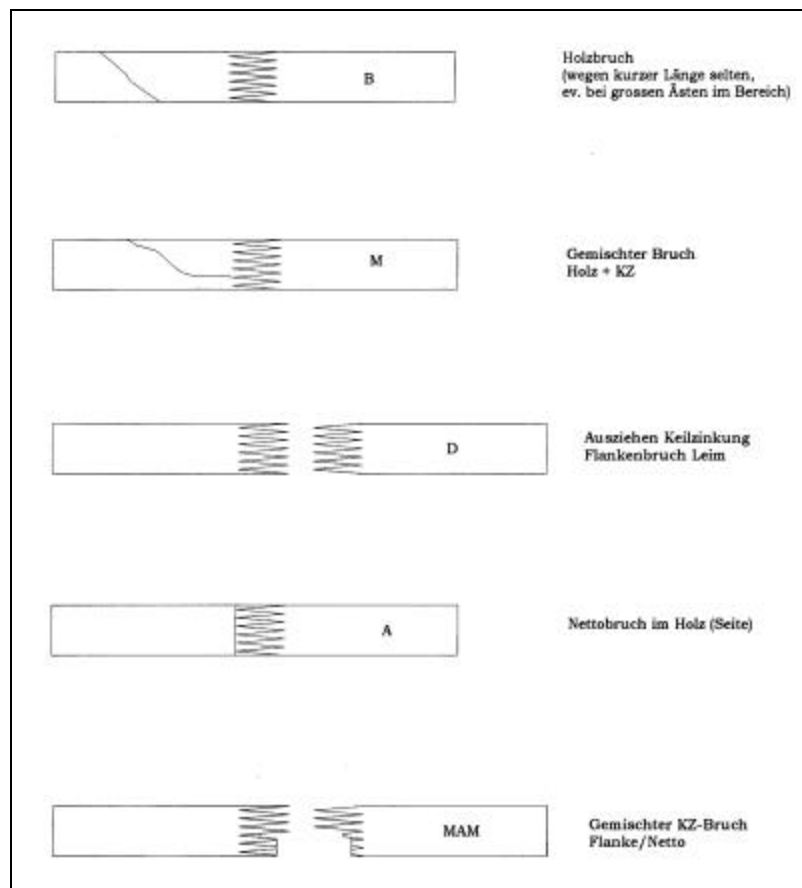


Abbildung 3.1.4-2: Brucharten von Keilzinkenstößen

3.2.1 Douglasie

Die Prüfung der Keilzinkenverbindungen aus Douglasienholz (18% rel. Holzfeuchte) ergaben keine reinen Leimbrüche. Dieses läßt auf eine korrekte Verklebung schließen. Bei allen Klebstoffen ergab sich ein ähnliches Bild. Die Ergebnisse der Versuche an Kleinproben spiegeln sich in diesem Versuch wider (vgl. Kap. 3.1.2).

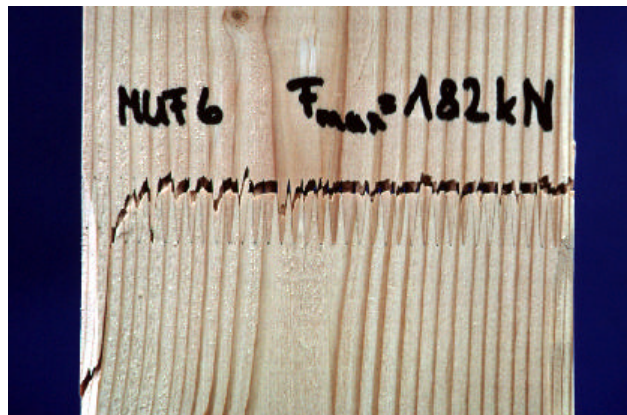


Abbildung 3.2.1-1: Bruchbild einer Douglasienkeilzinkenverbindung -MUF-
Holzbruch am Zinkengrund

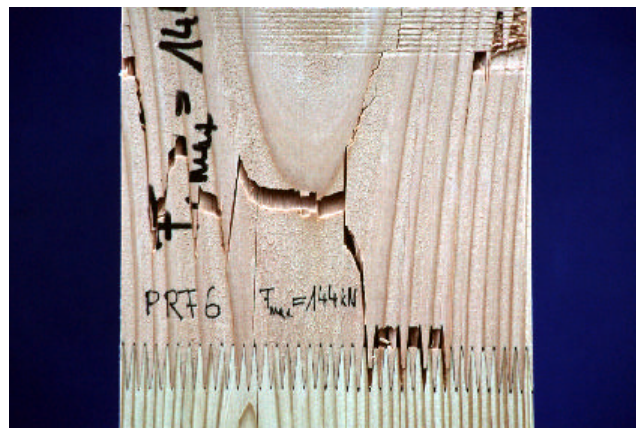
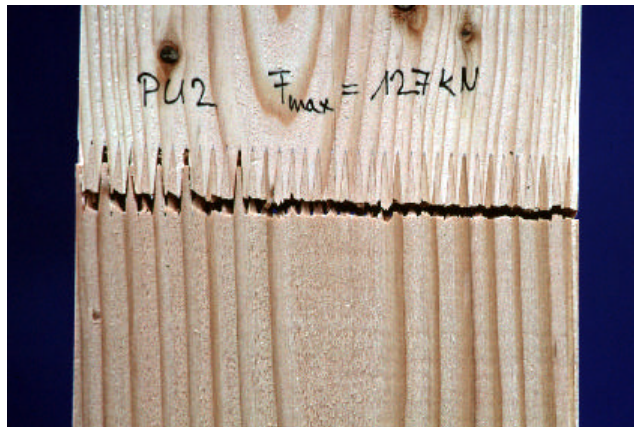


Abbildung 3.2.1-2: Bruchbild einer Douglasienkeilzinkenverbindung -PRF-
Holzbruch zum größten Teil außerhalb der Verbindung

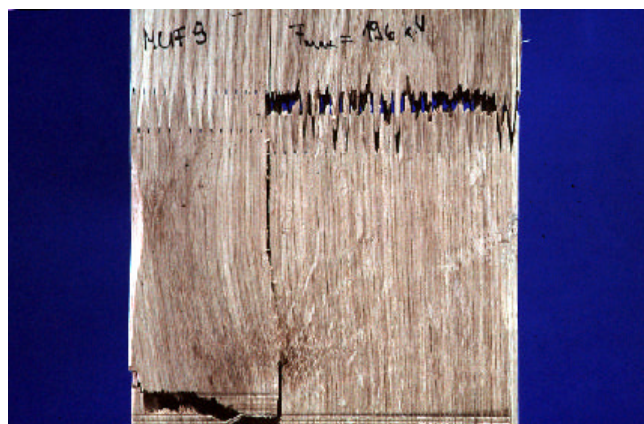


**Abbildung 3.2.1-3: Bruchbild einer Douglasienkeilzinkenverbindung -PU-
Reiner Holzbruch am Zinkengrund**

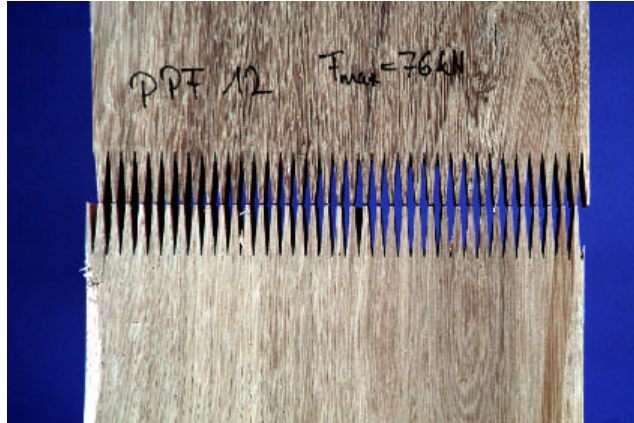
3.2.2 Eiche

Die Ergebnisse der mit PRF-Harz verleimten Keilzinkenprüfkörper fielen schlecht aus. Die maximalen Festigkeitswerte erreichten nur ca. 50 % der Werte der beiden anderen Klebstoffe. Die Bruchbilder zeigten zu 100 % reine Leimbrüche.

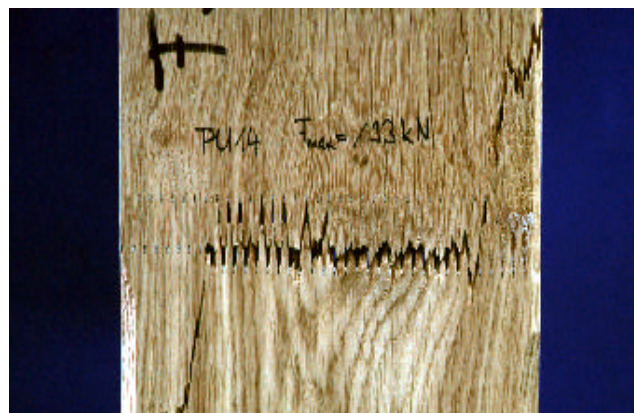
Die Ergebnisse der mit MUF-Harz und PU-Klebstoff verleimten Keilzinkenprüfkörper zeigten insgesamt ein besseres Verhalten als die der mit PRF-Harz verleimten Verbindungen. Jedoch lassen die doch hohen Anteile an reinen Leimbrüchen (36 % MUF-Harz und 42 % PU-Klebstoff) auf eine schwierige Verklebbarkeit der Eiche schließen. Dies bestätigt die Ergebnisse aus der systematischen Untersuchung der Kleinproben (vgl. Kap. 3.1.3).



**Abbildung 3.2.2-1: Bruchbild einer Eichenkeilzinkenverbindung -MUF-
Mischbruch (Holzbruch außerhalb und innerhalb der Verbindung)**



**Abbildung 3.2.2-2: Bruchbild einer Eichenkeilzinkenverbindung -PRF-
Leimbruch durch Auszug der Zinken**

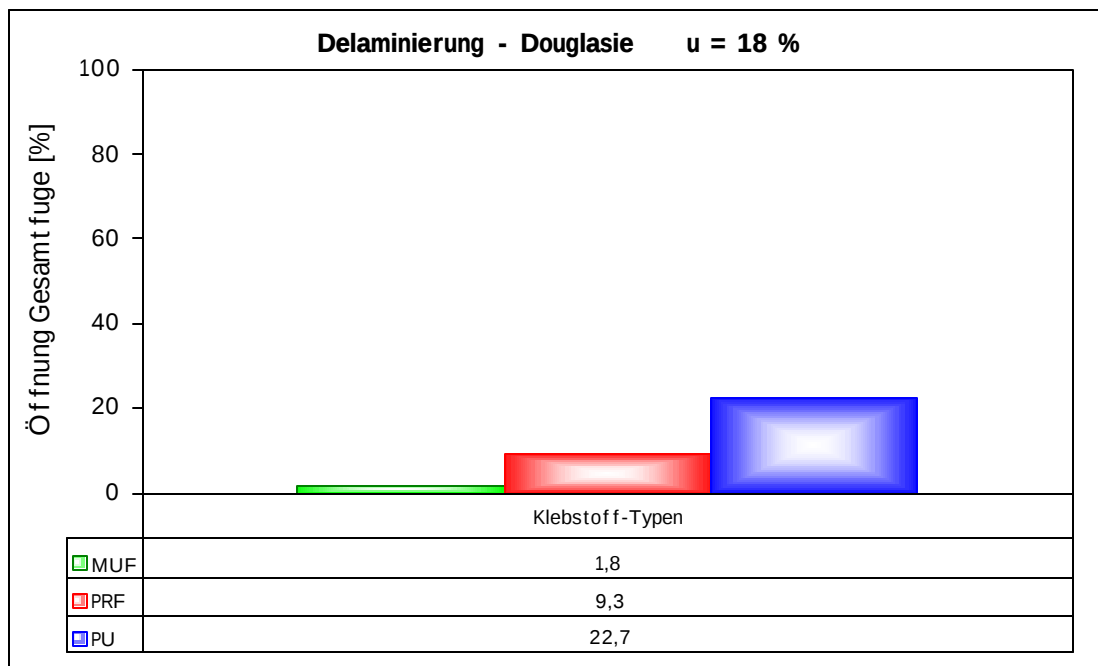


**Abbildung 3.2.2-3: Bruchbild einer Eichenkeilzinkenverbindung -PU-
Holzbruch**

3.3 Delaminierung

Bei den zwei verschiedenen Holzarten -Douglasie und Eiche- wurden große Unterschiede zwischen den Resultaten sichtbar.

3.3.1 Douglasie



Die Resultate der Delaminierungsprüfung lagen bei den mit MUF-Harz verleimten Prüfkörpern unter dem Grenzwert von 4% Gesamtdelaminierung.

Die mit PRF-Harz und PU-Klebstoff verleimten Balkenabschnitte ergaben weitaus schlechtere Ergebnisse. Sämtliche Werte der Gesamtdelaminierung liegen über dem laut DIN EN 386 vorgegebenen Grenzwert von 4% (die Mittelwerte liegen bei 9,3% bzw. 22,7%). Aufgrund der ermittelten Zahlen müßte eine mangelhafte Verklebung angenommen werden. Es wurde in früheren Untersuchungen (Pitzner, 1999) festgestellt, daß große Streuungen der Resultate der Delaminierungsprüfung auch unter optimalen Bedingungen zu erwarten sind.

Die relativ hohen Gesamtdelaminierungsprozentsätze bei dieser geringen Anzahl von Proben sind aufgrund der ansonsten guten Ergebnisse dieser Klebstoffe mit der Holzart Douglasie (mit einer rel. Holzfeuchte von 18%) nicht direkt als ein Hinweis für eine mangelhafte Verklebung zu werten.

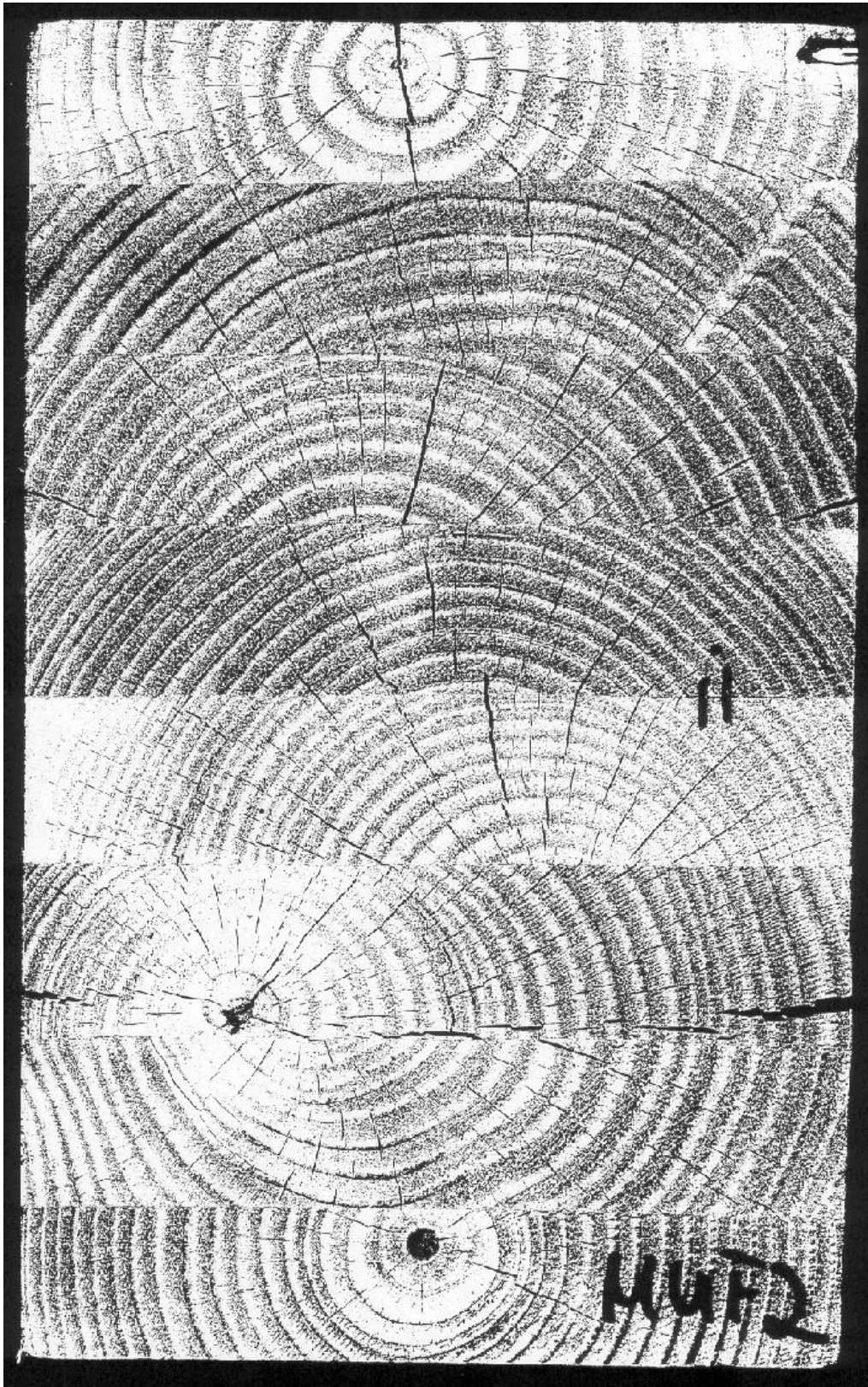
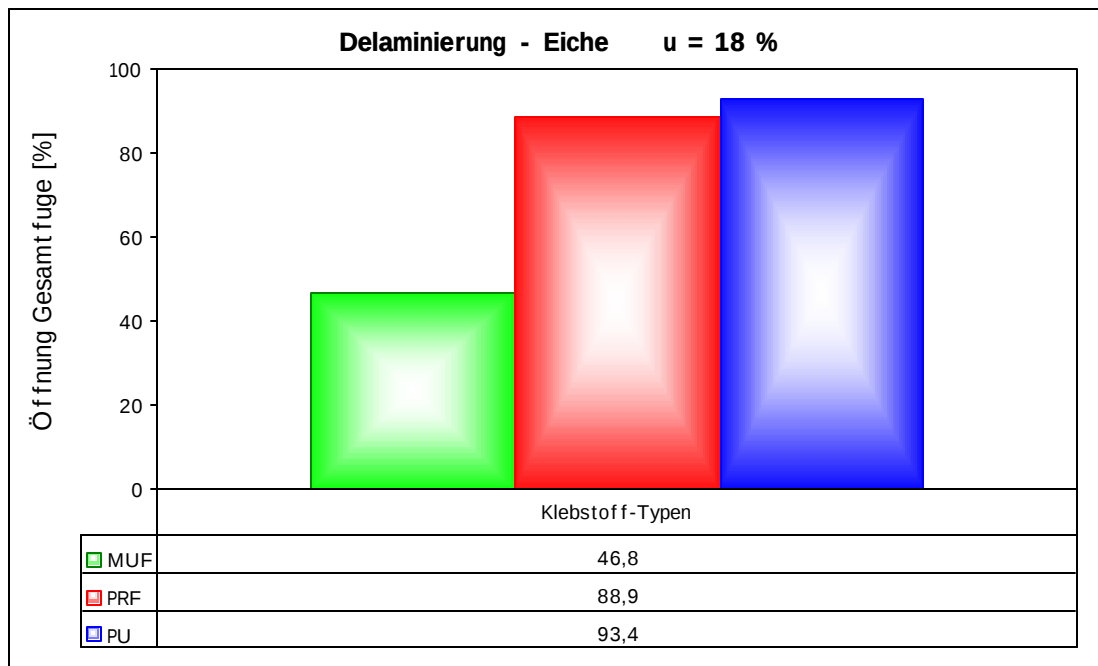


Abbildung 3.3.1-1: Bild einer Douglasienprobe nach der Delaminierungsprüfung
- Geringe Delaminierung in der 4. Leimfuge -

3.3.2 Eiche



Die mit MUF-Harz verleimten Proben ergaben trotz einer ansonsten relativ guten Verleimungsqualität (Druckscherfestigkeit, Querkzugfestigkeit) in den vorherigen Untersuchungen mit dieser Prüfmethode einen Mittelwert von 46,8% Gesamtdelaminierung. Der kleinste Wert betrug 23,4% und der höchste Wert 60,9%. Daraus ergibt sich zwar ein besseres Verhalten als bei den mit PRF-Harz und PU-Klebstoff verklebten Eichenproben, aber auf jeden Fall handelt es sich nicht um gute Ergebnisse.

Die mit PRF-Harz und PU-Klebstoff verklebten Proben bestätigen die großen Probleme bei der Verklebung von Eichenholz unter diesen Bedingungen (18 % rel. Holzfeuchte). Bei den mit PRF-Harz verleimten Balkenabschnitten liegen die Resultate zwischen 71,5% und 99,9% Gesamtdelaminierung, bei den mit PU-Klebstoff verklebten Proben zwischen 88,5 % und 99,2 %.

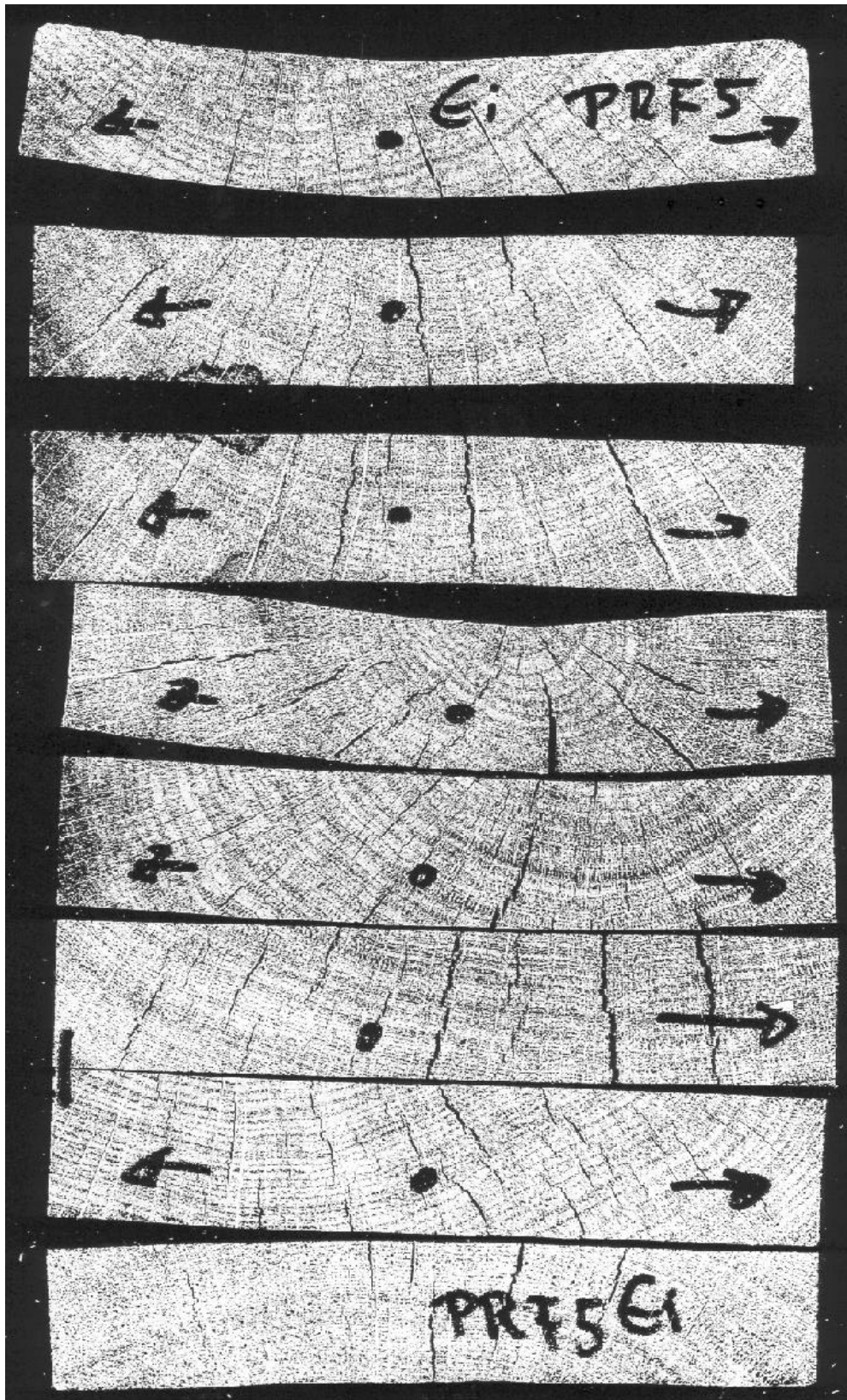


Abbildung 3.3.2-1: Fotokopie einer Eichenprobe nach der Delaminierungsprüfung
- Vollständige Delaminierung bis auf geringen Anteil in 2. Fuge von unten -

4 Zusammenfassung

Im Anbetracht der anhaltenden Diskussion um den chemischen Holzschutz sowie den Einsatz von Tropenholz für Anwendungen im Außenbereich, wird zunehmend einheimisches oder aus gemäßigten Zonen importiertes, natürlich dauerhaftes Holz eingesetzt.

Für diese Zwecke eignet sich unter anderem das Kernholz der Nadelhölzer Lärche und Douglasie sowie für besonders extreme Randbedingungen Laubhölzer Eiche, Kastanie und Robinie. Auf Grund nicht ausreichender Abmessungen, Qualitäten oder Mengen kommen die genannten Kernhölzer aber nicht oft zum Einsatz. Teilweise wird der Einsatz von massiven Querschnitten zusätzlich durch holzspezifische Eigenschaften, wie eine hohe innere Eigenspannung, erschwert bzw. unmöglich gemacht.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Verklebbarkeit von Lärchen-, Douglasien-, Eichen- und Robinienholz im Hinblick auf eine tragende Verwendung im Außenbereich untersucht. Insbesondere wurde die Verklebung bei verschiedenen Holzfeuchten betrachtet, da technisch getrocknetes Holz für eine weitere Verwendung im Außenbereich, wegen der dort herrschenden höheren Gleichgewichtsfeuchten, wenig sinnvoll erscheint, bzw. mit erheblichen Kosten verbunden ist.

Mit Hilfe verschiedener Prüfmethoden sollte die Verklebbarkeit der genannten Holzarten bei drei unterschiedlichen Holzfeuchten (12 %, 18 % und > 24 %) mit sieben handelsüblichen Klebstoffprodukten (zwei Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harze, zwei Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze, zwei Polyurethanklebstoffe sowie ein Epoxidharz) näher untersucht und verglichen werden.

Zunächst wurden im Labor Kleinproben verklebt und die Festigkeiten der Klebfugen sowie der Holzbruchanteile geprüft. Es wurden ca. 5.300 Druckscher- bzw. Querkzugversuche in Anlehnung an DIN 52187 und DIN 68141 durchgeführt.

Die Verklebung von Lärchenholz erwies sich als unproblematisch bei allen untersuchten Holzfeuchten, insbesondere mit beiden Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harzen und mit einem der beiden Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze. Ausnahmen finden sich bei der Verklebung mit beiden Polyurethanklebstoffen sowie mit dem zweiten der beiden Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze in Form einer leichten Qualitätsreduktion.

Die Verklebung von Douglasienholz erzielte bei allen Holzfeuchten und sämtlichen eingesetzten Klebstoffen ähnliche Ergebnisse. Diese lassen darauf schließen, daß Douglasienholz sowohl trocken als auch mit höheren Holzfeuchten verklebt werden kann.

Eichenholz gilt im allgemeinen als schwierig zu verkleben. Die hier vorliegenden Resultate zeigen, daß die Verklebung von getrocknetem Eichenholz (12 % rel. Holzfeuchte) grundsätzlich möglich ist, jedoch erscheinen nur manche Klebstoffe dafür geeignet. Wie bereits bei Lärche zeigte ein Produkt aus der Gruppe der Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harze Schwächen, bzw. war in diesem Fall nicht geeignet. Durchgehend positive Ergebnisse konnten nur mit einem Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz sowie mit einem Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz erreicht werden. Dies läßt darauf schließen, daß die Verklebungsqualität von Eichenholz nicht nur vom verwendeten Klebstofftyp, sondern auch vom jeweiligen Produkt abhängig ist. D.h. im Hinblick auf die praktische Anwendung in Spezialfällen (z.B. die Verleimung von Laubhölzern) können Klebstoffe des gleichen Typs nicht als gleichwertig angesehen werden.

Die Untersuchung bestätigt, daß die Verklebung von Robinie Probleme bereitet. Nur wenige der untersuchten Klebstofftypen führten zu einer guten Verklebungsqualität. Dabei zeigten sich wieder deutliche Unterschiede zwischen Produkten eines Klebstofftyps. Wie bei Eiche wird daraus geschlossen, daß die Verklebungsqualität vom jeweils genutzten Klebstoffprodukt abhängt und keine generelle Aussage gemacht werden kann.

Nach Abschluß der systematischen Untersuchung der Kleinproben wurden in einem Brettschichtholzwerk Keilzinkenverbindungen und größere Brettschichtholzelemente unter Produktionsbedingungen hergestellt. Diese Versuche wurden an Douglasien- und Eichenholz (18 % rel. Holzfeuchte) mit jeweils einem Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz, einem Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz sowie einem Polyurethanklebstoff durchgeführt. Die Keilzinkenverbindungen wurden anschließend auf Zug geprüft und die größeren Elemente wurden mittels Delaminierungsprüfung untersucht.

Die Prüfung der Keilzinkenverbindungen ergab bei den Douglasienproben stets Holzbrüche, d.h. kein Versagen der Leimfuge. Alle Klebstoffe führten bei dieser Holzart zu ähnlichen Ergebnissen. Daraus läßt sich -wie bei den Kleinproben- auf eine korrekte Verklebung schließen.

Die Eichenproben führten zu deutlich schlechteren Ergebnissen. Insbesondere die Keilzinkenverbindungen mit Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz erreichten nur etwa 50% der Festigkeitswerte der Proben mit den beiden anderen Klebstoffen. Die Zugbrüche erfolgten zu 100 % in den Klebfugen. Die beiden anderen Klebstoffe erreichten zwar höhere Festigkeiten, aber die geringen Holzbruchanteile bestätigen die schwierige Verklebbarkeit der Eiche.

Die Delaminierungsprüfung unterstreicht die bereits festgestellten Resultate. Die Balkenabschnitte von Douglasie, die mit Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz verleimt waren, lagen deutlich unter dem Grenzwert von 4 % Gesamtdelaminierung. Die beiden anderen Klebstoffe ergaben deutlich schlechtere Ergebnisse, nämlich Delaminierungen von 5% bis 14,7 % (Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz) bzw. 17,2 % bis 30,6 % (Polyurethanklebstoff). Diese hohen Gesamtdelaminierungssätze lassen aber im Anbetracht der geringen Probenanzahl und im Hinblick auf die ansonsten guten Ergebnisse nicht direkt auf eine schlechte Verklebung schließen.

Die Eichenholzproben, die mit Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz verleimt wurden, ergaben erneut bessere Ergebnisse als die mit den anderen Klebstoffen verklebten Proben.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die beiden Nadelhölzer Lärche und Douglasie grundsätzlich problemlos zu verkleben sind. Die Laubhölzer Eiche und Robinie erweisen sich als schwieriger zu verkleben.

Nur die Verklebung von Robinie mit beiden Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harzen und einem Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz ergab selbst bei der hohen Holzfeuchte positive Ergebnisse. Es zeigt sich also, daß Robinienholz grundsätzlich zu verkleben ist.

Die Ergebnisse der Eichenproben lassen darauf schließen, daß eine Verklebung von getrocknetem Eichenholz (12 % rel. Holzfeuchte) prinzipiell möglich ist, wenn eine passende Klebstoffauswahl getroffen wird. Bei beiden Laubhölzern hat sich gezeigt, daß nicht nur der Klebstofftyp, sondern auch die Art des einzelnen Produktes entscheidend ist.

5 Literatur

Normen

- DIN 4074-1: Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit. Beuth Verlag GmbH Berlin September 1989.
- DIN 52187: Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung. Beuth Verlag GmbH Berlin Mai 1979.
- DIN 68140-3 &: Vorlage: Keilzinkenverbindungen von Holz. Beuth Verlag GmbH Berlin Juni 1999.
- DIN EN 1193:1997: Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz. Beuth Verlag GmbH Berlin Juni 1998.
- DIN EN 1194:1999: Brettschichtholz. Beuth Verlag GmbH Berlin Mai 1999.
- DIN EN 204: 1991: Beurteilung von Klebstoffen für nichttragende Bauteile. Beuth Verlag GmbH Berlin Oktober 1991.
- DIN EN 205: 1991: Bestimmung der Klebfestigkeit von Längsklebung im Zugversuch. Beuth Verlag GmbH Berlin Oktober 1991.
- DIN EN 301 Entwurf: 1990: Leime für tragende Holzbauteile: Polykondensationsleime auf Phenol- und Aminoplast-Basis. Beuth Verlag GmbH Berlin April 1990.
- DIN EN 302 Teil 1: 1990: Leime für tragende Holzbauteile: Polykondensationsleime auf Phenol- und Aminoplast-Basis, Bestimmung der Scherfestigkeit im Längs-Schertest. Beuth Verlag GmbH Berlin April 1990.
- DIN EN 302 Teil 2: 1990: Leime für tragende Holzbauteile: Polykondensationsleime auf Phenol- und Aminoplast-Basis, Bestimmung der Beständigkeit gegen Delaminierung. Beuth Verlag GmbH Berlin April 1990.
- DIN EN 302 Teil 3: 1992: Klebstoffe für tragende Holzbauteile: Prüfverfahren: Bestimmung des Einflusses von Säureschädigung der Holzfasern durch Temperatur- und Feuchtezyklen auf die Querkzugfestigkeit. Beuth Verlag GmbH Berlin August 1992.
- DIN EN 302 Teil 4:1992: Klebstoffe für tragende Holzbauteile: Prüfverfahren: Bestimmung des Einflusses von Holzschwindung auf die Scherfestigkeit. Beuth Verlag GmbH Berlin August 1992.
- DIN EN 350-2:1994: Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz. Beuth Verlag GmbH Berlin Oktober 1994.

- DIN EN 385: 1995: Keilzinkenverbindungen in Bauholz. Beuth Verlag GmbH Berlin Juli 1996.
- DIN EN 386:1995: Brettschichtholz. Beuth Verlag GmbH Berlin Juli 1996.
- DIN EN 391:1995: Delaminierungsprüfung von Leimfugen. Beuth Verlag GmbH Berlin April 1996.
- DIN EN 392:1995: Brettschichtholz: Scherprüfung von Leimfugen. Beuth Verlag GmbH Berlin April 1996.
- DIN EN 408:1995: Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz. Beuth Verlag GmbH Berlin April 1996.
- DIN EN 518:1995: Bauholz für tragende Zwecke – Sortierung. Beuth Verlag GmbH Berlin Juli 1996.
- DIN EN 519:1995: Bauholz für tragende Zwecke – Sortierung. Beuth Verlag GmbH Berlin Juli 1996.
- DS 1111: Delamineringsprøvnng af limtræ Dansk Standardiseringsråd, København 1979.
- E DIN 1052: Juli 2000. Bauen mit Holz 9/2000.
- PrENV 387:1997: Brettschichtholz - Universal-Keilzinkenverbindungen - Leistungs - und Mindestanforderungen. CEN März 1997.

Datenblätter

- Sicherheitsdatenblatt: Dynomel L-435. Dyno Industrier ASA Lillestrøm 29.04.1999.
- Sicherheitsdatenblatt: Dynosol S-199. Dyno Industrier ASA Lillestrøm 22.11.1996.
- Sicherheitsdatenblatt: Härter H-469. Dyno Industrier ASA Lillestrøm 22.12.1999.
- Sicherheitsdatenblatt: Härter H-629. Dyno Industrier ASA Lillestrøm 28.08.1996.
- Sicherheitsdatenblatt: Kauramin Härter® 686 flüssig. BASF-AG Ludwigshafen 11.04.1996.
- Sicherheitsdatenblatt: Kauramin-Leim® 681 flüssig. BASF-AG Ludwigshafen 11.11.1999.
- Sicherheitsdatenblatt: Kauranat® CE 5591 flüssig. BASF-AG Ludwigshafen 26.11.1999.
- Sicherheitsdatenblatt: Kauresin® Härter 466 Pulver. BASF-AG Ludwigshafen 26.08.1997.
- Sicherheitsdatenblatt: Kauresin® Leim 460 flüssig. BASF-AG Ludwigshafen 11.05.1998.
- Sicherheitsdatenblatt: WEVO-Härter B 20/1. WEVO-Chemie GmbH & Co. Ostfildern-Kemnat Januar 1996.

- Sicherheitsdatenblatt: WEVO-Spezialharz EP 20 VP 1. WEVO-Chemie GmbH & Co. Ostfildern-Kemnat Januar 1996.
- Technische Information: Umwelt und Sicherheit. Collano Holzleimbau 11/1996.
- Technische Information: Wissenswertes über die Chemie der Kondensations-Harze. BASF-AG Ludwigshafen 4/1998.
- Technische Information: Wissenswertes über Klebstoffe für Holz. BASF-AG Ludwigshafen 2/1988.
- Technisches Merkblatt: Dynomel L-435. Dyno Industrier ASA Lillestrøm Dezember 1999.
- Technisches Merkblatt: Dynosol S-199. Dyno Industrier ASA Lillestrøm Januar 1992.
- Technisches Merkblatt: Kauramin[®] Leim 681 flüssig mit Kauramin Härter 686 flüssig im Holzleimbau. BASF-AG Ludwigshafen Juli 2000.
- Technisches Merkblatt: Kauranat CE 5591 flüssig. BASF-AG Ludwigshafen Januar 2000.
- Technisches Merkblatt: Kauresin[®] Leim 460 flüssig. BASF-AG Ludwigshafen Juni 1998.
- Technisches Merkblatt: Purbond HB 110, Collano Holzleimbau Januar 2000.
- Technisches Merkblatt: Purbond HB 530, Collano Holzleimbau Juni 2000.
- Technisches Merkblatt: WEVO-Spezialharz EP 20 VP 1. WEVO-Chemie GmbH & Co. Ostfildern-Kemnat.
- Türmerleim GmbH: Verarbeitungshinweise BASF Kauramin-Leim[®] 681 flüssig mit Kauramin Härter 686 flüssig im Holzleimbau 4/1997.
- Türmerleim GmbH: Verarbeitungshinweise BASF Kauresin-Leim[®] 460 flüssig mit Härter 466 Pulver oder Härter 469 Pulver im Holzleimbau. 8/1995.

Sonstiges

- Akman, H.: Untersuchungen über die Verklebbarkeit von Robinie zur Herstellung von Fensterkanteln. Diplomarbeit, Universität Hamburg 1994.
- Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.; Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.: Informationsdienst Holz: Bauen mit BS-Holz. 1996a.
- Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.; Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.: Informationsdienst Holz: Wohnen mit BS-Holz. 1996b
- Baumann, H.: Leime und Kontaktkleber. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1967

- Bayer-Polyurethane: Taschenbuch der Anwendungstechnik der Bayer AG Leverkusen Januar 1979
- Blomquist, R.F.; Christiansen, A.W.; Gillespie, R.H.; Myers, G.E.: Adhesive bonding of Wood and other structural materials. Pennsylvania State University August 1981.
- Cejchan, S. et al.: Die Robinie – eine zu unrecht vernachlässigte Holzart. Holzzentralblatt Nr. 131/132, Stuttgart 1996.
- Chugg, W.A.: Glulam. Ernest Benn Limited, London 1964.
- Côté, W. A.; Day, JR. and A. C.: Anatomy and Ultrastructure of Reaction Wood. State University College of Forestry at Syracuse University. Ohne Jahresangabe.
- Dokumentation Brettschichtholz: IP-Holz. Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern 1991.
- Dtv-Brockhaus-Lexikon in 20 Bänden. F.A. Brockhaus GmbH Mannheim und Deutscher Taschenbuch Verlag München 1989.
- Frühwald, A.: Einfluß der Oberflächenrauigkeit einzelner Lamellen auf die Klebfestigkeit im Brettschichtholz. Aus: Strukturelles Kleben und Leimen im Holzleimbau, Sonderdokumentationsreihe Seminar 9/1987, Klebstoff-Dokumentum, Hinterwaldner-Verlag München 1988.
- Gehri, E.: Verleimung. Das Holz der Robinie. Fortbildungskurs der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1993.
- Göhre, K.: Die Robinie und ihr Holz. Deutscher Bauernverlag, Berlin 1952.
- Hambach, W.: 30 Jahre Studiengemeinschaft Holzleimbau. Bauen mit Holz Nr.10, 656-657.
- Hedlund, B.: Accelerated Delamination Methods. SP-AR 1988:22, Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology, Borås 1988.
- Hennemann, O.-D., Brockmann, W., Kollek, H.: Handbuch Fertigungstechnologie Kleben. Carl Hanser Verlag München Wien 1992.
- Holz-Lexikon: Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft. DRW-Verlag Stuttgart 3. Auflage 1988.
- Jauernig, H.: Untersuchungen über die Verklebung von Robinie bei höheren Holzfeuchten. Diplomarbeit Universität Hamburg 1997.
- Jeremias, I.: Mechanische Eigenschaften von Konstruktionsschnittholz aus Robinie. Diplomarbeit Universität Hamburg 1999.

- Johansson, C.-J.; Buchter, J.; Lind, P.; Saarelainen, U.: Delamination Test of Glue Lines According to EN 391. SP Report 1994:67. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology – Wood Section, Borås 1994.
- Klemm, H. 1987: Holzleimbau - die Geschichte seiner Leime. Bauen mit Holz Nr.10, 658- 662.
- Köhler, R.; Skark, L.: Duroplastische Kunststoffe für die Holzverleimung und Holzveredlung. Sonderdruck aus: Kunststoff-Handbuch Band X, Hrsg.: Viehweg, R.; Becker, E.; Carl Hanser Verlag München 1968.
- Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1951.
- Kucera, L.J.: Forstliche und holzkundliche Eigenschaften der Robinie. Das Holz der Robinie. Fortbildungskurs der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1993.
- Marra, A.: Technology of Wood Bonding. Van Nostrand Reinhold New York 1992.
- Merkblatt M 044 der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie: Polyurethan-Herstellung und Verarbeitung/Isocyanate, Jedermann-Verlag, Heidelberg, April 1997.
- Molnar, S.: Die technischen Eigenschaften des Robinienholzes. Das Holz der Robinie. Fortbildungskurs der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 1993.
- Müller, C.: Schreiben über Buchveröffentlichung - Die Entwicklung des Holzleimbaues vom 4.5.1999
- Neuner, S.; Türmerleim GmbH, Ludwigshafen: mündliche Auskunft vom 8.4.1999.
- Ohnesorge, H.; Ohnesorge, S. 1999: Der moderne Holzleimbau begann vor hundert Jahren. Holz-Zentralblatt Nr. ¾ 22-23.
- Patentschrift: Verfahren zum Verleimen von Holz, insbesondere von Sperr- und Furnierholz. Reichspatentamt 1932.
- Petersen, H.: Grundzüge der Aminoplastchemie. Sonderdruck aus: Kunststoff-Jahrbuch 10. Folge, Wilhelm Pansegrau Verlag, Berlin ohne Jahresangabe.
- Pfütze, E.; BASF-AG, Ludwigshafen: mündliche Auskunft vom 9.4.1999.
- Pischl R. u. Wolf, E.: Holzleimbau – Bauen mit verleimten Elementen aus Holz. Schrift für den Österreichischen Leimbauverband. Graz und Wien 1984.
- Pitzner, B.: Delaminierung von Leimfugen in Brettschichtholz. Diplomarbeit Universität Hamburg 1999.
- Rug, W.: Innovationen im Holzbau - Die Hetzerbauweise (Teil 2). Bautechnik 72, Heft 4, 1995.

- Schickhofer, G; Obermayr, B; Hasewend, B.; Bernasconi, A.; Jeremias, Y.; Kernbichler, K.; Linder, J.; Gehri, E.: Entwicklung widerstandsfähiger Holzbauprodukte mit dem Hartholz Robinie – Forstwirtschaftliche Aspekte, Nutzungs - und Einsatzbereiche. Lignum Research Bericht Nr. LR 9801/1, Graz März 1999.
- Schickhofer, G; Obermayr, B; Hasewend, B.; Bernasconi, A.; Jeremias, Y.; Kernbichler, K.; Linder, J.; Gehri, E.: Entwicklung widerstandsfähiger Holzbauprodukte mit dem Hartholz Robinie – Mechanische und physikalische Kenngrößen von stabförmigen Robinienprodukten für den Einsatz im Baubereich (Bretter, KSH, BSH). Lignum Research Bericht Nr. LR 9801/2, Graz April 1999.
- Schulz, H.: Wald, Holz, Holzwerkstoffe, 41-58. Aus: Verbindungen, 50 Jahre [®] Kaurit-Leim, Hrsg.: BASF Aktiengesellschaft 1981
- Skark, L.: Aktuelle Klebstoffprobleme in der holzverarbeitenden Industrie. Sonderdruck aus Holz-Zentralblatt Nr. 113, Jahrgang 92, Seite 2013-2014, 1966.
- Skeist, I.: Handbook of Adhesives. Van Nostrand Reinhold Company New York 1977.
- Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.: BS-Holz. Was ist das? Internet: www.Brettschichtholz.de 6.4.1999a.
- Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.: Das Gütezeichen Holzleimbau. Internet: www.Brettschichtholz.de 6.4.1999b.
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition, Electronic Release 1998.
- Widok, W.: Lamellierte Fensterkanteln aus Eichenholz. Untersuchung der Verleimungsqualität. Diplomarbeit, Universität Hamburg 1995.

Anhang

Versuchsplan 1. Teil Anzahl der Proben

		<u>Robinie</u>						<u>Eiche</u>						<u>Lärche</u>			<u>Douglasie</u>		
		unbehandelt			gedämpft			unbehandelt			gedämpft			unbehandelt			unbehandelt		
Holz - Feuchte	⇒	12%	18%	24%	12%	18%	24%	12%	18%	24%	12%	18%	24%	12%	18%	25%	12%	18%	25%
Querzug- Proben 5 x 5 cm	MUF 1	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	30	30	30	30
	MUF 2	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	30	30	30	30
	PRF 1	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	x	30	30	x
	PRF 2	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	x	30	30	x
	PU 1	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	x	30	30	30
	PU 2	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	x	30	30	30
	Epoxid	30	30	x	x	30	x	30	30	x	x	30	x	30	30	x	30	30	x
Scher- Festigkeit 5 x 5 cm	MUF 1	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	30	30	30	30
	MUF 2	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	30	30	30	30
	PRF 1	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	x	30	30	x
	PRF 2	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	15	x	30	30	x	30	30	x
	PU 1	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	x	30	30	30
	PU 2	30	30	30	x	30	x	30	30	30	x	30	x	30	30	x	30	30	30
	Epoxid	30	30	x	x	30	x	30	30	x	x	30	x	30	30	x	30	30	x

Je Balken ca. 14 bis 17 Prüfkörper

Robinie / Eiche:

12%

Lärche / Douglasie:

12%

18%

18%

min. 24%

min. 24%

Versuchsplan 2. Teil Anzahl der Proben

		<u>Eiche</u>	<u>Douglasie</u>
		unbehandelt	unbehandelt
Holz - Feuchte	⇒	ca. 18 %	ca. 18 %
Delaminierung DIN EN 391 Verf.B	MUF	6	6
	PRF	6	6
	PU	6	6
Keilzinken- Prüfung an verleimten Brettern	MUF	ca. 15	ca. 15
	PRF	ca. 15	ca. 15
	PU	ca. 15	ca. 15