

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

**Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe
(Wood Veneer Composite, kurz: WVC)**

Zuwendungsempfänger:

**Technische Universität Chemnitz – Fakultät für Maschinenbau – Institut
für Fördertechnik und Kunststoffe – Professur Förder- und
Materialflusstechnik**

Förderkennzeichen:

2221HV008X

Laufzeit:

01.07.2022 bis 31.12.2024

Monat der Erstellung:

4/2025

Datum der Veröffentlichung:

17.07.2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Zuwendungsempfänger: TU Chemnitz, Professur Förder- und Materialflusstechnik, Forschungsgruppe Anwendungstechnik erneuerbarer Werkstoffe

Förderkennzeichen: FKZ: 2221HV008X

Vorhabenbezeichnung: Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (Wood Veneer Composite, kurz WVC)

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2022 – 31.12.2024

Bereichszeitraum 01.07.2022 – 31.12.2024

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Markus Golder

Projektkoordination: Dr.-Ing. Christine Schubert (christine.schubert@mb.tu-chemnitz.de)

Inhaltliche Bearbeitung: Dr.-Ing. Christine Schubert¹, Dr.-Ing. Eric Penno¹, Dipl.-Ing. Christoph Alt², Dr.-Ing. Patrick Kluge, Dr.-Ing. Sven Eichhorn¹, M. Sc. Sven Fiebig³

¹TU Chemnitz, Professur Förder- und Materialflusstechnik

²Ligenium GmbH, Chemnitz

³TU Chemnitz, Professur Fertigungsmesstechnik

Industriepartner Ligenium GmbH, Chemnitz

Bibliografische Angaben

Autoren: Schubert, Christine; Penno, Eric; Alt, Christoph; Kluge, Patrick; Eichhorn, Sven

TU Chemnitz, Professur Förder- und Materialflusstechnik

Titel:

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (Wood Veneer Composite, kurz WVC)

86 Seiten, 80 Abbildungen, 16 Tabellen

Schlagworte: Holzfurnierlagenverbundwerkstoff, Sperrholz, hochfeste Verbindungsstelle, lokale Verdichtung, Holz im Maschinenbau, vorgespannte Schraubverbindung

Keywords: Wood Veneer Composite, WVC, plywood, high-strength connection point, local compression, Wood in mechanical engineering, preloaded screw connection

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Projektbeschreibung:

Im Projekt wurde eine lokale Verdichtungstechnologie für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (Wood Veneer Composite, kurz: WVC) unter dem Aspekt der wirtschaftlichen Verfahrensführung weiterentwickelt und hinsichtlich ihrer Prozessparameter und resultierenden Eigenschaften in der Verdichtungs- und Verbindungsstelle erforscht. Die Technologie dient dem Zweck eine hochfeste Verbindungsstelle für vorgespannte Schraubverbindungen in WVC für das Anwendungsfeld im Maschinenbau unter wirtschaftlichen Bedingungen herzustellen. Damit wurden die Verbindungseigenschaften bei gleichzeitigem Erhalt des leichtbautechnischen Anwendungspotentials der Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe verbessert.

Es wurden die lokalen Verdichtungstechnologien axial, radial und deren Kombination auf vorgespannte Durchsteckschraubverbindungen (DSV) und relevante Einschraubverbindungen (ESV) angewendet. Zur Beurteilung der Verdichtungsparameter wurden makroskopische und mikroskopische Strukturanalysen durchgeführt, sowie die Rückverformung und die Prozesskräfte bewertet. Die Analyse der hochfesten Verbindungsstellen erfolgte anschließend hinsichtlich der Aspekte maximal übertragbarer Vorspannkraft, Vorspannkraftverlust, Reaktion gegenüber des Klimaeinflusses sowie statisch-/ dynamischer Tragfähigkeit.

Diese Grundlagenuntersuchungen bildeten die Voraussetzung für eine Verfahrensmodifikation, welche die axiale und radiale Verdichtung mit Hilfe eines entwickelten Werkzeuges in einem Prozess kombiniert und mit dem zweistufigen Pressprozess die Prozesszeit deutlich reduziert. Damit wurden die Voraussetzungen für die industriellen Fertigung geschaffen. Neben der abschließenden Performancebewertung lokal verdichteter Verbindungsstellen wurde eine Fertigungsrichtlinie der lokalen Verdichtungstechnologie erarbeitet.

Projektergebnisse:

1. Die vorteilhaften Parameter zur Herstellung einer lokalen Verdichtung sind für das radiale, axiale und der Kombination aus beiden Verfahren erarbeitet. Die Verfahren werden durch die Parameter Temperatur bzw. Drehzahl, Zeit und Druck bzw. Vorschub beschrieben. Die vorteilhaften Parameter sind in 2.8 dargelegt.
2. Der Direktvergleich der Eigenschaften in der jeweiligen Verbindungsstelle zeigte, dass die axiale Verdichtung sehr vorteilhaft für die Verbindungseigenschaften ist. Sie übertrifft in ihren Eigenschaften die anderen Verdichtungsarten. Die radiale Verdichtung verbessert nur die Lochleibungsfestigkeit in den Verbindungsstellen. Die kombinierte axiale-radiale Verdichtung liegt in ihrer Leistungsfähigkeit unterhalb der axialen Verdichtung. Die detaillierte Darstellung ist in 0 zusammengefasst.
3. Der Einsatz des entwickelten Kombiwerkzeuges ermöglicht die Herstellung einer axial-radial verdichteten Lasteinleitungsstelle in einem Prozess. Unter zusätzlicher Anwendung des mehrstufigen Verfahrenskonzeptes wurde eine Prozesszeiteinsparung von ca. 50% erreicht.
4. Die während der axialen Verdichtung auftretenden hohen Presskräften erfordern ein neues Anlagenkonzept um in den industriellen Fertigungsablauf integriert zu werden.
5. Mit der erarbeiteten Fertigungsrichtlinie ist es möglich lokal verdichtete Verbindungsstellen sicher und definiert herzustellen.

Fazit: Es ist mit der axialen Verdichtung gelungen, die Verbindungseigenschaften bei gleichzeitigem Erhalt des leichtbautechnischen Anwendungspotentials der Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe deutlich zu verbessern.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Project objective:

In this project, a local compression technology for wood veneer composites (WVC) was further developed from the perspective of economic process management and investigated with regard to its process parameters and resulting properties in the compression and connection area.

The technology serves the purpose of producing a high-strength connection point for preloaded bolted connections in WVC for application in mechanical engineering under economic conditions. This improved the connection properties while maintaining the lightweight construction application potential of the wood veneer composite.

Local axial and radial compression technologies, and their combinations, were applied for pre-tensioned push-through screw and relevant screw-in connections. Macroscopic and microscopic structural analyses were performed to assess the compression parameters, and recovery and process forces were evaluated. The high-strength screw connections were analyzed with regard to the maximum transferable preload force, preload force loss, response to climatic influences, and static/dynamic load-bearing capacity.

These fundamental studies laid the foundation for a process modification that combines axial and radial compression in a single process using a specially developed tool and significantly reduces processing time with the two-stage pressing process. This laid the foundation for using in industrial production. In addition to the performance evaluation of locally compressed connections, a production guideline for the local compression technology was aimed for.

Project results:

1 The advantageous parameters for achieving local compression have been developed for the radial, axial, and combined methods. The processes are described by the parameters temperature or rotational speed, time and pressure or feed rate. The advantageous parameters are presented in Section 2.8.

2 A direct comparison of the properties at each connection showed that axial compression is very beneficial for the connection properties. It outperforms other compression methods in terms of its properties. Radial compression only improves the hole bearing strength at the joints. Combined axial-radial compression is inferior in performance to axial compression. The detailed description is summarized in Section 2.9.

3 The use of the developed combination tool enables the production of an axially-radially compacted load introduction point in a single process. With the additional application of the multi-stage process concept, a process time saving of approximately 50% was achieved.

4. The high pressing forces occurring during axial compression require a new system concept in order to be integrated into the industrial production process.

5. It is possible to produce locally compacted joints safely and in a defined manner with using the developed manufacturing guideline

Conclusion: With axial compression, it has been possible to significantly improve the joining properties while at the same time maintaining the lightweight application potential of the wood veneer composite materials.

Inhaltsverzeichnis

1	Zielstellung	7
1.1	Aufgabenstellung	7
1.2	Stand der Technik	8
1.3	Lösungsweg	11
1.3.1	Theoretischer Ansatz	11
1.3.2	Projekttablauf und Umsetzung der Arbeitspakete	13
2	Ergebnisse	16
2.1	Anforderungsliste und Verbindungsgestaltung (AP1.)	16
2.1.1	Eingrenzung, Einschränkungen und Anforderungen	16
2.1.2	Testwerkstoffe, Verbindungsgestaltung, Verbindungsmittel	17
2.2	Werkstoffkennwerte zur Auslegung Presskräfte und Temperaturen (AP2.)	19
2.3	Prozessbeschreibung und Weiterentwicklung Anlagentechnik (AP2)	21
2.3.1	Prozessbeschreibung und Versuchsanlagentechnik radiale Verdichtung	21
2.3.2	Prozessbeschreibung und Versuchsanlagentechnik axiale Verdichtung	23
2.3.3	Versuchstechnik Kombinierte axiale-radiale Verdichtung	25
2.4	Prozessparameter – Eigenschaftsuntersuchungen (AP3)	26
2.4.1	Radiale Verdichtung	26
2.4.2	Axiale Verdichtung	40
2.5	Eigenschaften der hochfesten Verbindungsstellen (AP4)	50
2.5.1	Maßhaltigkeit der Verbindungsstelle	51
2.5.2	Maximal übertragbare Vorspannkraft und Überdrehmoment	53
2.5.3	Lochleibungsfestigkeit (radial verdichtete Materialien)	57
2.5.4	Statische Tragfähigkeit von Einschraubverbindungen (Auszugfestigkeit)	58
2.5.5	Dynamische Tragfähigkeit von Einschraubverbindungen	61
2.5.6	Vorspannkraftverlauf ohne klimatischen Einfluss	64
2.5.7	Vorspannkraftverlauf und Maßhaltigkeit unter Klimaschwankungen	66
2.6	Verfahrensmodifikation (AP5)	69
2.6.1	Axiale-radiale Kombinationsverdichtung mit Werkzeugmodifikation	69
2.6.2	Zweistufige Verfahrensführung axiale Verdichtung	73
2.7	Implementierung in industrielle Fertigung (AP5)	76
2.8	Fertigungsrichtlinie (AP6)	77

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

2.9	Performancebewertung (AP6)	78
3	Zusammenfassung, Zielabgleich und offene Punkte	80
4	Verwertung und Veröffentlichung	83
5	Erkenntnisse von Dritten	84
6	Literaturverzeichnis	85

1 Zielstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Zielstellung des Projektes ist die Weiterentwicklung einer lokalen Verdichtungstechnologie und die Erforschung der Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung zur Herstellung einer lokal verdichteten, hochfesten Verbindungsstelle für die Montage vorgespannter Schraubverbindungen in Holzfurnierlagenverbundwerkstoffen (engl. Wood Veneer Composite, kurz: WVC). Die lokal verdichtete Verbindungsstelle soll im Vergleich zu konventionell spanend hergestellten Verbindungsstellen folgende Zielparameter in der Schraubverbindung erfüllen:

1. Steigerung der maximal übertragbaren Vorspannkraft und des maximalen Anzugmomentes
2. Steigerung der statischen und dynamischen Tragfähigkeit und Verbindungssteifigkeit
3. Reduzierung des Vorspannkraftabfalls
4. Dimensionsfixierung der Verbindungsstelle (Reduzierung der klimainduzierten Dimensionsänderung und resultierenden Vorspannkraftänderung)

Die Technologie dient dem Zweck eine hochfeste Verbindungsstelle für vorgespannte Schraubverbindungen in Holzfurnierlagenverbundwerkstoffen unter wirtschaftlichen Bedingungen herzustellen. Der fokussierte Einsatzbereich der Verbindungsstelle ist in wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaften Leichtbauanwendungen des Maschinenbaus zu finden. Dort sind Maschinenbauteile mit hohen spezifisch mechanischen Werkstoffeigenschaften (mechanische Eigenschaften bezogen auf die Dichte) gefordert. Vorzugsweise wird dies mit hohen absoluten mechanischen Eigenschaften bei vergleichsweise geringer Dichte umgesetzt. Dadurch wird ein geringes Bauteilgewicht bei hoher Belastbarkeit erreicht. Die Verbindungsstelle verlangt:

- eine geringe Nachgiebigkeit und damit eine absolut hohe Druckfestigkeit und Drucksteifigkeit,
- eine geringe Eigenschaftsschwankung über die Zeit und unter klimatischen Einflüssen, um folgende Verbindungseigenschaften zu gewährleisten:
 - hohe übertragbare Montagevorspannkraft
 - geringer Vorspannkraftverlust
 - hohe statische und dynamische Tragfähigkeit
 - geringe Dimensionsänderung

Daraus resultiert bei Holzwerkstoffen die Anforderung an eine hohe Dichte, welche bei Belastung unverändert bleibt.

Aus den Anforderungen an die Verbindungsstelle und den bauteilbezogenen Leichtbauanforderungen resultiert ein Zielkonflikt. Die Verbindungsstelle erfordert eine hohe Dichte, der Leichtbauaspekt bedingt eine niedrige Dichte des Holzwerkstoffes. Konventionelle plattenförmige Materialien aus Furnier bieten jedoch nur eine einheitliche Dichte innerhalb des Plattenwerkstoffes. Dieser Zielkonflikt wird im Rahmen des Projektes gelöst, indem die Verdichtung auf den lokal wirksamen Bereich der Schraubverbindung reduziert wird. Dadurch steigen die mechanischen Eigenschaften in der Verbindungsstelle. Gleichzeitig bleiben die spezifischen mechanischen Eigenschaften im Bauteil bzw. Plattenwerkstoff nahezu gleich.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Durch die Lösung des geschilderten Zielkonfliktes generiert das Vorhaben eine hohe wissenschaftliche und technische Bedeutung. Weiterhin wird der technisch-wirtschaftliche Nutzen durch die Erschließung neuer Anwendungsbereiche für die Furnierwerkstoffe und die Reduzierung der Schraubstellen in leichtbautechnischen Anwendungen des Maschinenbaus gesteigert.

Zum Erreichen des Gesamtziels des Vorhabens werden folgende wirtschaftliche und technische Teilziele erarbeitet:

Tabelle 1: Teilziele im Projekt

Phase	Nr.	Ziel
I	1	Definition der Anforderungsliste und der Verbindungsgestaltung der Schraubstelle (einschnittige bzw. zweischnittige Schraubverbindung, Anbauteil, Randabstände, Einschraublänge, Durchmesser, ...)
II	2	Weiterentwicklung der Anlagentechnik und Verdichtungswerkzeuge zur Erfüllung einer wirtschaftlichen Prozessführungsstrategie
III	3	Erforschung der Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung
	4	Finden technisch- wirtschaftlicher Verdichtungsparameter
IV	5	Analyse der Lochgeometrie unter Berücksichtigung der thermischen Fixierung, der Rückverformung und des klimatischen Einflusses Finden der Geometrieabweichung zur Ableitung eines Toleranzfensters
	6	Beurteilung des Klimaeinflusses und der langzeitmechanischen Eigenschaften
V	7	Umsetzung der Verfahrensmodifikation, d.h. Kombination der radialer-axialer Verdichtung
	8	Übertragung des lokalen Verdichtungsprozesses auf industrielle Fertigungsstandards
VI	9	Ableitung einer Fertigungsrichtlinie
	10	Erstellen einer Performanceübersicht im Vergleich zu unverdichteten Schraubstellen

1.2 Stand der Technik

Die Natur liefert im holzzellulären Aufbau z.B. in Astansätzen, den bionischen Ansatz für hochbeanspruchbare Verbindungsstellen bei gleichzeitig leichtbauoptimierten Bereichen der Lasteinleitung und -übertragung. Dem bionischen Axiom der konstanten mechanischen Spannung folgend, werden in Bereichen hoher Beanspruchung mehr Zellen aufgebaut und damit die Rohdichte erhöht – in Bereichen geringer Beanspruchung hingegen reduziert. Dadurch entsteht eine beanspruchungsgerechte Leichtbaustruktur [Mai15]. Die Übertragung dieses bionischen Ansatzes auf Verbindungsstellen in Maschinenbauteilen erfolgte aktuell noch nicht.

Die kontinuierliche Verdichtung von Holzwerkstoffen ist ein standardisierter Herstellungs- und Modifizierungsprozess, um u.a. die mechanischen Eigenschaften von plattenförmigen Holzwerkstoffen einzustellen. Das basiert auf der Grundlage, dass die mechanischen Eigenschaften mit der Rohdichte des Holzwerkstoffes korrelieren [Nie93]. Die maximale Reindichte des Holzes liegt bei 1,5 g/cm³ [Wag08, S.86]. Dies stellt den maximal möglichen Verdichtungsgrad dar. Je höher die Rohdichte des Holzes an der Reindichte, dem Masse-

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Volumen-Verhältnis ohne Porenstruktur, liegt, umso geringer fällt der potentiell mögliche Verdichtungsgrad aus.

Bild 1 stellt den Porenanteil des Holzes in Bezug zur Rohdichte verschiedener Holzarten dar. Daraus wird ersichtlich, dass Holzlagenfurnierwerkstoffe aus Buchen- und Birkenfurniere ein deutliches Verdichtungspotential besitzen. Ganz im Gegenteil zu Pockholz, dessen Rohdichte nahe der Reindichte des Holzes liegt.

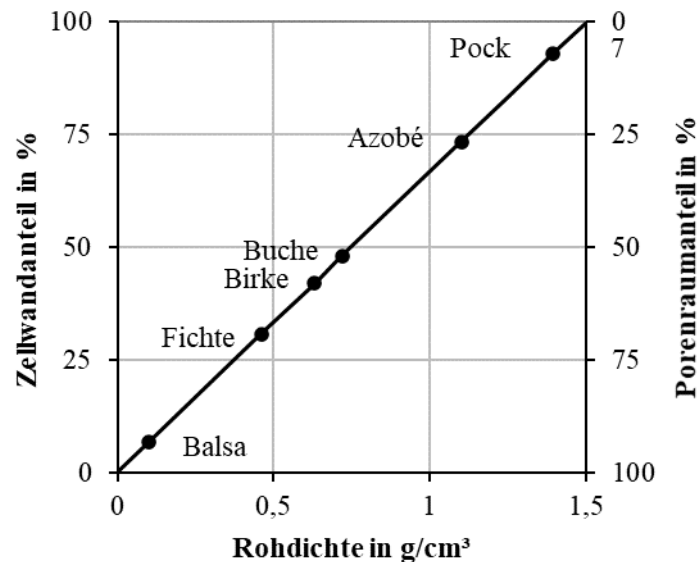


Bild 1: Zellwand- und Porenanteil in Bezug auf die Rohdichte unterschiedlicher Holzarten [geändert, nach Neu17, S.5]

Der Mechanismus des Verdichtens von Holz- und Holzwerkstoffen findet sowohl im Urformen (bei der Plattenherstellung) als auch beim Umformen (z.B. Formbiegen, Formpressen) statt. Während der Spanplattenherstellung wird bewusst ein charakteristischer Dichtegradient über die Spanplattendicke eingestellt [Wag08]. Das sogenannte Rohdichteprofil ist gekennzeichnet durch eine Mittellage geringer Dichte und zweier Decklagen hoher Dichte. Damit wird der Kompromiss aus den geforderten mechanischen Eigenschaften (realisiert über die dichtere Decklagen) und dem geringen Plattengewicht (Mittellage geringer Dichte) über die gesamte Platte erfüllt. Die Verdichtung als standardisierter Modifizierungsprozess wird bewusst bei der Herstellung von Holzfurnierlagenverbundwerkstoffen eingesetzt. Die Dichte dieser Werkstoffe liegt in Abhängigkeit der verwendeten Furniere zwischen $0,3 \text{ g/cm}^3$ (unverdichtetes WVC z.B. Albasiasperrholz [Alb21]) und $1,4 \text{ g/cm}^3$ (hochverdichtetes Kunstharzpressholz aus Buche) [Eic17, S. 63]. Unter Zugabe von Phenolharzen resultieren hochverdichtete Kunstharzpresshölzer, die den Effekt der höheren Dichte (bis $1,4 \text{ g/cm}^3$) auf das gesamte Halbzeug übertragen. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften sind im ganzen Halbzeug weitgehend vergleichbar. Sie sind als homogen verdichtete, meist plattenförmige Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe am Markt verfügbar [NN21]. Wird ein Bauteil aus diesen Werkstoffen gefertigt, so werden die benötigten Bauteileigenschaften durch die Anforderungen der Verbindungsstelle (z. B.: hohe Druckfestigkeit) bestimmt. Das hat ein erhöhtes Bauteilgewicht zur Folge und mindert das leichtbautechnische Anwendungspotential.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Die TU Chemnitz, Professur Förder- und Materialflusstechnik, Arbeitsgruppe: Anwendungstechnik Erneuerbarer Werkstoffe (AEW) hat ein Verfahren entwickelt, welches lokal verdichtete Verbindungsstellen per thermisch-physikalischer Verdichtung in Holzfurnierlagenplatten erzeugt. Bei dieser lokalen Verdichtung wird nur der Materialbereich in der Verbindungsstelle verdrängt und dabei ein Fließloch bzw. eine Kegelvertiefung erzeugt. Die umliegenden Platteneigenschaften bleiben unverändert. Es unterscheidet sich in die radiale lokale Verdichtung (sog. Fließlochformen) und in die axiale lokale Verdichtung. In einem vorgelagertem Forschungsprojekt wurde das Verfahren zum Fließlochformen von Holzwerkstoffen konzeptionell entwickelt und die Machbarkeit nachgewiesen. Darauf ausbauend wurde diese Technologie per Forschungstransfer in die Industrie überführt. Unter Industriebedingungen wurde festgestellt, dass sowohl die Verbindungsstelle als auch deren Herstellungsprozess verbessert werden müssen, um eine technisch und wirtschaftlich vorteilhafte Lösung zu erhalten [Lig]. Zur axialen Verdichtung wurden eigene Vorversuche mittels Verdichtungskegel durchgeführt. Eine Erforschung der Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung mit dem Ziel eine Prozessoptimierung vorzunehmen erfolgte bisher noch nicht.

Aus den eigenen Vorarbeiten wird deutlich, dass sowohl die Herstellungstechnologie als auch die Verbindungsstelle für den industriellen Maßstab hin zu einer wirtschaftlichen Fertigung und einem technisch vorteilhaften Eigenschaftsspektrum weiterentwickelt und detailliert in der Tiefe erforscht werden müssen.

Die grundlegenden Ansätze hierfür liefern das Formpressen und Formbiegen von Vollholz (sog. Thonet-Verfahren) [Hei94]. Die Umformverfahren von Holz setzen deren Plastifizieren voraus, welches unter Temperaturzuführung und wahlweise mit Wasserdampf erfolgt. Die Plastifizierung ist im Wesentlichen auf das Holzbestandteil Lignin, als natürliches Polymer, zurückzuführen, dessen Schmelzpunkt im unbehandelten normalkonditionierten Zustand bei $T = 80 - 130^\circ\text{C}$ liegt [Aug88a]. Die Plastifizierung ist abhängig von dem Zusammenspiel aus Feuchtegehalt und Temperatur [Kol51, S. 783, Sal90], sodass ein geringerer Feuchtegehalt im Holz höhere Temperaturen für den Umformprozess verlangen.

Die für den Verdichtungsprozess relevanten temperaturbasierten Effekte im Holz wurden in [Pen23] zusammengefasst und sind in Bild 2 dargelegt. Daraus ist der Beginn der Zersetzung der Hauptbestandteile ab $T = 200^\circ\text{C}$ ersichtlich. Aus diesem Grund liegen die Prozesstemperaturen sowohl bei der Plattenherstellung als auch beim Umformen stets unterhalb dieser Zersetzungstemperatur.

Übliche Prozessparameter beim Pressen sind Temperaturen zwischen $T = 165^\circ\text{C} - 170^\circ\text{C}$ bei einem Feuchtegehalt von $\omega = 9 - 12\%$. Die Erwärmung erfolgt unter Druck bei $\sigma = 10 - 14\text{ N/mm}^2$ [Bac84, S26]. Dies stellen ersten Ansatzpunkte für die lokale Verdichtungstechnologie dar.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

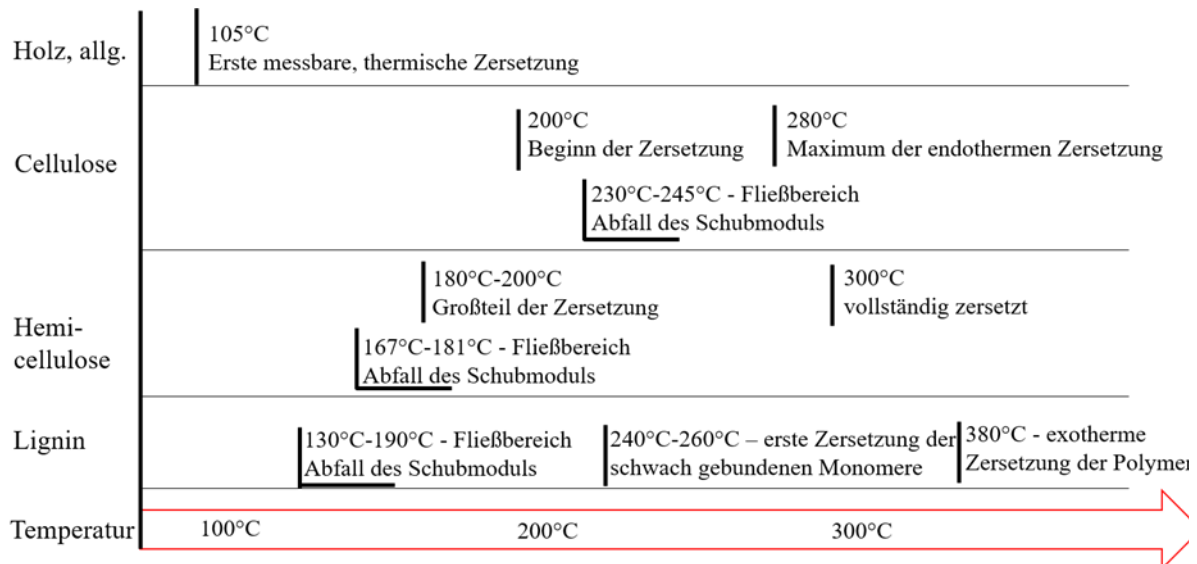


Bild 2: Relevante temperaturbasierte Effekte im Holz für den Verdichtungsprozess [Pen23]

1.3 Lösungsweg

1.3.1 Theoretischer Ansatz

Hochfeste Verbindungsstellen sind durch den Einsatz von hochfesten Verbindungsmitteln und Bauteilen geringer Nachgiebigkeit gekennzeichnet, um vorgespannte Schraubverbindungen auszuführen. Diese lösbar verbundenen, vorgespannten Schraubstellen müssen hohe statische und dynamische Betriebskräfte aufnehmen, wie sie häufig im Maschinenbau auftreten. Die Höhe der übertragbaren Betriebskräfte werden von der aufbringbaren Montagevorspannkraft in der Schraubverbindung und der Festigkeit der Verbindungsmittel bestimmt. Die Montagevorspannkraft (F_V) und resultierende Schraubenzusatzkraft (F_{SA}) ist wiederum abhängig vom Nachgiebigkeitsverhältnis der Schraube zu den verspannenden Bauteilen.

Indem die Nachgiebigkeit der zu verspannenden Teile (größerer Anstieg der verspannten Platte in Bild 3) reduziert wird, können bei gleicher Verformung höhere Montagevorspannkraft erreicht werden (Bild 3). Die Wirkung der geringeren Nachgiebigkeit des Plattenwerkstoffes auf die Schraubenzusatzkraft ist in den Verspannungsschaubildern gegenübergestellt (Bild 3). Zusätzlich bewirkt die höhere Montagevorspannkraft eine höhere Restklemmkraft, sodass die Trennfuge infolge der Vorspannkraftrelaxation später anfängt zu klaffen. Dies ist besonders bei senkrecht zur Schraubachse wirkenden Betriebskräften (Querkräften F_Q) relevant. Je höher die Montagevorspannkraft F_V , umso größere Klemmkraft F_K wirken den Betriebskräften senkrecht zur Schraubachse entgegen (Bild 4).

Bei einer Zugbeanspruchung der Verbindung (F_A) hat die reduzierte Nachgiebigkeit des Plattenwerkstoffes zusätzlich eine geringere Schraubenzusatzkraft (F_{SA}) zur Folge, sodass höhere Betriebskräfte bei gleicher Montagevorspannkraft aufgenommen werden können. Für die prinzipielle Darstellung ist es zunächst irrelevant, welche Schraubverbindungsart ausgeführt und welche Verbindungsmittel verwendet werden.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holz furnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

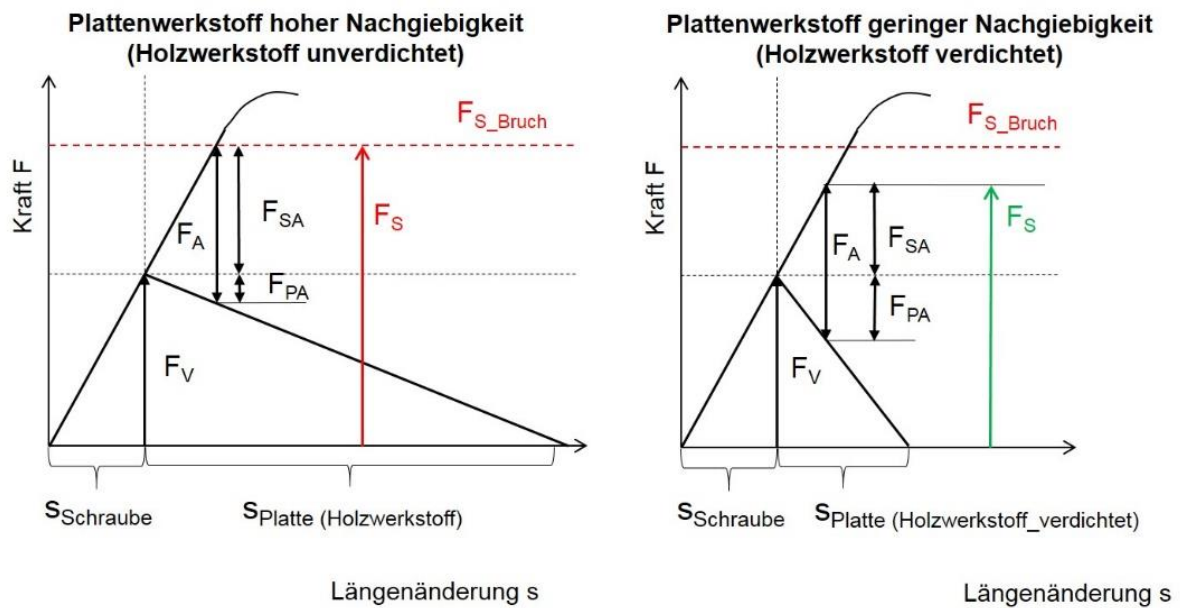


Bild 3: Verspannungsschaubild mit wirkender Zugbetriebskraft (F_A) auf Plattenwerkstoff hoher Nachgiebigkeit (links) und geringer Nachgiebigkeit (rechts)

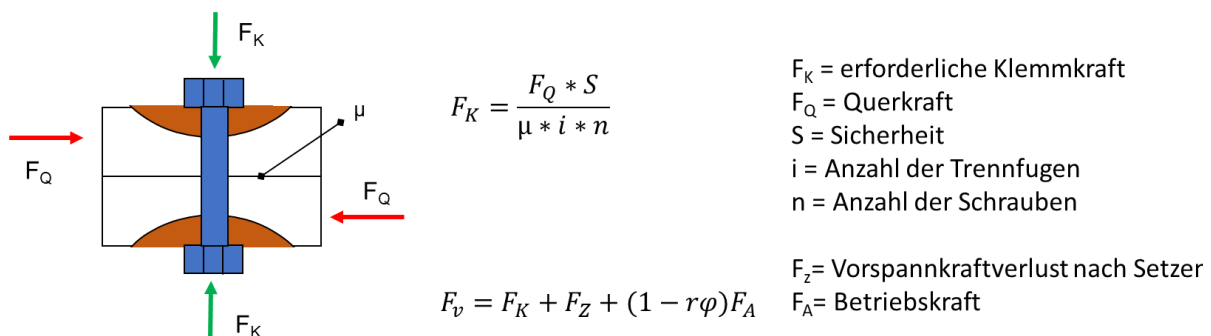


Bild 4: Zusammenhang Klemmkraft und Montagevorspannkraft bei auftretender Querkraft in der Schraubverbindung, F_v = Vorspannkraft

Die Reduzierung der Nachgiebigkeit wird durch die Steigerung der Druckfestigkeit und Drucksteifigkeit des Plattenwerkstoffes erreicht. Da die Druckfestigkeit und -steifigkeit des Holzes direkt mit seiner Rohdichte korrelieren, wird der Holzwerkstoff ausschließlich im Bereich der lokalen Verbindungsstelle verdichtet. Im restlichen Plattenbereich bleiben die spezifischen mechanischen Eigenschaften unverändert.

Daraus resultieren die Verbesserung der verbindungsrelevanten mechanischen Eigenschaften (Auszugfestigkeit, Lochleibungsfestigkeit, Druckfestigkeit, Drucksteifigkeit) und die Verbindungseigenschaften (Montagevorspannkraft, stat. und dynamische Tragfähigkeit, Verbindungssteifigkeit, reduzierter Vorspannkraftverlust) in maschinenbaurelevanten Schraubverbindungen bei Erhalt des leichtbautechnischen Anwendungspotentials des Holzwerkstoffes.

Die dafür notwendige lokale Verdichtungstechnologie stellt sowohl hinsichtlich ihrer Verfahrensweiterentwicklung, deren Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung, als auch ihres Nutzens im Vergleich zu unverdichteten Schraubstellen den wesentlichen Untersuchungsgegenstand in diesem Projekt dar.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Die lokale Verdichtung ist ein Modifizierungsprozess welcher der Schraubmontage vorgelagert ist.

Aufbauend auf den eigenen Vorarbeiten (siehe Stand der Technik) werden zunächst die radiale Verdichtung (Erzeugen eines Fließlochs, Bild 5a) und die axiale Verdichtung (lokale Verdichtung in Richtung der Plattendicke, Bild 5b) vorgesehen.

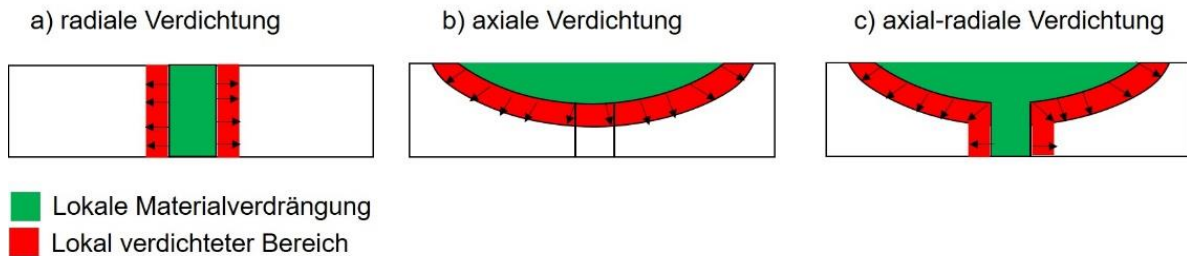


Bild 5: lokale Verdichtungsarten (schematisch dargestellt)

Bei der radialen Verdichtung wird ein rotierender Dorn in das Werkstück gedrückt. Dieser verdrängt durch eine rotative Vorschubbewegung das Material in radialer Richtung um seinen Dorn Durchmesser. Das verdrängte Material liegt als verdichtetes Material im Leibungsbereich des erzeugten Loches vor. Durch die Reibung des Dorns wird das Holz im Verdichtungsbereich erwärmt, sodass das Lignin plastifiziert und während des Abkühlens wieder erstarrt. Hier wird eine thermische Fixierung der Verdichtungsstelle vermutet. Bei dem axialen Verdichtungsverfahren wird unter Druck und Temperatur ein warmer Verdichtungskegel in das Plattenmaterial eingedrückt und formt dabei die Verdichtungsstelle aus. Bei diesem Verfahren muss anschließend die Bohrung spanend erzeugt werden. Mit zunehmendem Kenntnisstand wird die Kombination aus beiden Verfahren, der axial- radialen Verdichtung (Bild 5c) als Verfahrensmodifikation angestrebt.

1.3.2 Projektablauf und Umsetzung der Arbeitspakete

Das Projekt beinhaltet die Erforschung der Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung mit dem Ziel die lokale Verdichtungstechnologie hin zu einer wirtschaftlichen Prozessführung weiterzuentwickeln und hochfeste Verbindungsstellen aus Holzfurnierlagenverbundwerkstoffen für das Anwendungsfeld im Maschinenbau herzustellen. Voraussetzung für die reproduzierbare Versuchsdurchführung war die Weiterentwicklung der Anlagenlagentechnik und diverse Verdichtungswerkzeuge für die radiale, axiale und kombinierte axial-radiale Verdichtung (Bild 5).

Mittels der Untersuchung der Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung werden die Zusammenhänge zwischen Verdichtungsparameter, Holz- und Bauteilstruktur und Verbindungseigenschaften erarbeitet. Unter Einbeziehung des Optimierungskriteriums „minimale Prozesszeit“ wurde darauf aufbauen die Prozessoptimierung vorgenommen. Je nach Verbindungsart, technischer Relevanz und Machbarkeit wurde die radiale bzw. axiale Verdichtung angewendet. Die Kombinationsverdichtung erfolgte aufbauend auf den Ergebnisstand zur radialen Verdichtung. Sofern diese keine nennenswerte Verbesserung der Verbindungseigenschaften erzielte, wurde auf die Kombinationsverdichtung im Bearbeitungsschwerpunkt III verzichtet.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Das Schema in Bild 6 fasst die untersuchten und für den Maschinenbau relevante Schraubverbindungen und darauf angewendete Verdichtungstechnologien zusammen. Zur Beurteilung der Verdichtungsparameter wurden sowohl mikroskopische Strukturanalysen als auch Geometriemessungen an verdichteten Probekörpern durchgeführt und ausgewählte Verbindungseigenschaften an gefügten Schraubverbindungen ermittelt.

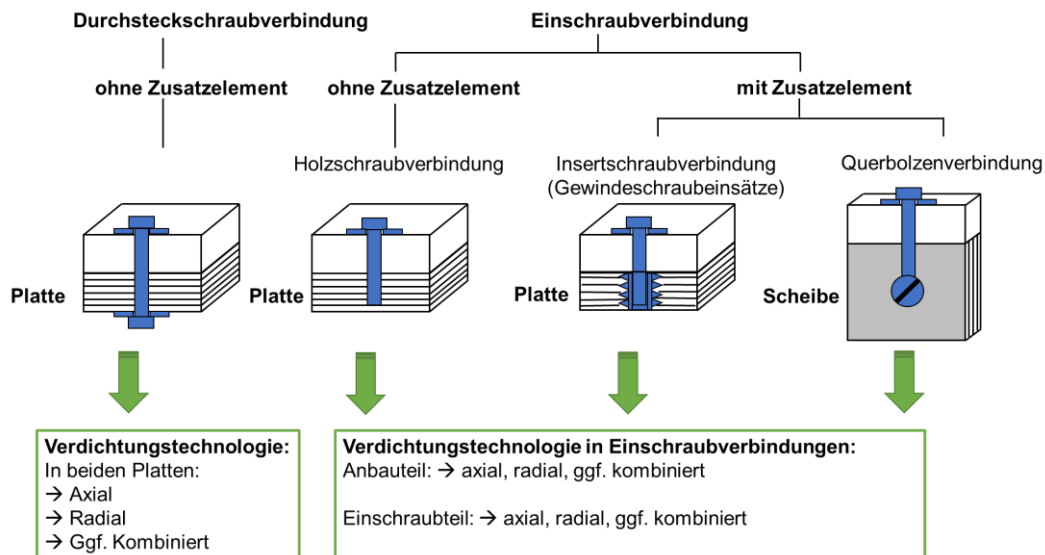


Bild 6: maschinenbaurelevante Schraubverbindungen und angewendete lokale Verdichtungstechnologie

Auf Basis der erarbeiteten Vorzugsparameter wurden lokale Verdichtungsstellen hergestellt, zu Schraubverbindungen gefügt und hinsichtlich der Aspekte Vorspannkraftverlust, Klimaeinfluss und statisch-/ dynamische Tragfähigkeit untersucht. Der Direktvergleich zu spanend hergestellten Referenzproben erlaubt die Bewertung der technischen Leistungsfähigkeit lokal verdichteter Verbindungsstellen.

Zur Umsetzung einer wirtschaftlichen Prozessführungsstrategie wurde neben der Weiterentwicklung der Anlagentechnik die Verfahrenskombination aus radialer und axialer Verdichtung konzeptioniert und Ansätze für einen mehrstufigen Verdichtungsprozess erarbeitet. Diese Konzepte zur Verfahrensmodifikationen wurden so konzipiert, dass sie in einen prinzipiell wirtschaftlichen herstellbaren Industriestandard überführt werden können.

Auf Basis der Parameterstudien sowie Untersuchung der Maßhaltigkeit und Verbindungseigenschaften wurde der Vorschlag einer Fertigungsrichtlinie erarbeitet.

Daraus resultiert folgende chronologische Projektstruktur mit den Arbeitspaketen in Tabelle 2

- I. Grundlagen und Verbindungsgestaltung
- II. Weiterentwicklung der Anlagentechnik und Werkzeuge
- III. Prozessparameter- Eigenschaftsstudien für die Schraubverbindungen aus Bild 6
- IV. Analyse der hochfesten Verbindungsstellen hinsichtlich der Aspekte
 - a. Maßhaltigkeit
 - b. Vorspannkraftverlust
 - c. Klimaeinfluss
 - d. Statisch-/ dynamische Tragfähigkeit
- V. Verfahrensmodifikation und Implementierung in industrielle Fertigung
- VI. Fertigungsrichtlinie und Performancebewertung

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Tabelle 2: Umsetzung und Abgleich der Arbeitspakete

I Grundlagen der Verbindungsgestaltung				
Arbeitspunkt	Realisierung			Ergebnis in Kapitel
	ja	teilweise	nein	
AP1.1. Grundlagen, Recherche, Anforderungen	x			1.2, 2.1.1
AP I.2 Verbindungsgestaltung, Verbindungsmittel, Testwerkstoffe	x			2.1.2
II Weiterentwicklung Anlagentechnik				
Arbeitspunkt	Realisierung			Ergebnis in Kapitel
	ja	teilweise	nein	
AP II.1 Ermittlung Werkstoffkennwerte	x			2.2
AP II.2 Konzeptionelle Weiterentwicklung lokaler Verdichtungstechnologien (radial, axial)	x			2.3
AP II.3 Analyse IST-Zustand bestehender Anlagentechnik des Versuchsstandes	x			2.3
AP II.4 Technologische Weiterentwicklung des Versuchsstandes; Konstruktion, Bau, Steuerung	x			2.3
AP II.5 Weiter- und Neuentwicklung der Verdichtungswerkzeuge Konstruktion, Bau	x			2.2, 2.6.1
AP II.6 Testversuche	x			2.2, 2.6.1
III Prozessparameter- Eigenschaftsuntersuchungen				
Arbeitspunkt	Realisierung			Ergebnis in Kapitel
	ja	teilweise	nein	
AP III.1 Verdichtungsversuche für die maschinenbaurelevanten Schraubverbindungen	x			2.4
AP III.2 mechanische, strukturelle Analyse der hergestellten lokalen Verdichtungsstellen	x			2.4 2.5
AP III.3 Parameteroptimierung hin zu kurzen Prozesszeiten	x			2.4, 2.6.2
IV Analyse der hochfesten Verbindungsstellen				
Arbeitspunkt	Realisierung			Ergebnis in Kapitel
	ja	teilweise	nein	
AP IV.1 Maßhaltigkeit der lokalen Verbindungsstelle	x			2.5.1
AP IV.2 Fertigung passgenauer Unterlegscheiben	x			2.1.2
AP IV.3 Langzeituntersuchung Vorspannkraftverlauf in abh. klimatischer Bedingungen	x			2.5.6 2.5.7
AP IV.4 Dynamische Kurzzeitversuche		x		2.5.5
V Verfahrensmodifikation und Integration in industrielle Fertigung				
Arbeitspunkt	Realisierung			Ergebnis in Kapitel
	ja	teilweise	nein	
AP V.1 Verfahrensmodifikation mit Kombination der axial-radialen Verdichtung und der Schraubmontage		x		2.6.1

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

AP V.2 Implementierung der lokalen Verdichtungstechnologie in einen prinzipiell wirtschaftlich herstellbaren Industriestandard			x	2.7
Fertigungsrichtlinie und Performancebewertung				
Arbeitspunkt	Realisierung			Ergebnis in Kapitel
	ja	teilweise	nein	
AP VI.1 Konzeptionelle Erarbeitung Fertigungsrichtlinie	x			2.8
AP VI.2 Performancebewertung und Dokumentation	x			0 Bericht

2 Ergebnisse

2.1 Anforderungsliste und Verbindungsgestaltung (AP1)

2.1.1 Eingrenzung, Einschränkungen und Anforderungen

Für maschinenbautechnische Anwendungen in Holzbauweise kommen vorgespannte Durchsteckschraubverbindungen (DSV), anders benannt als gleitfest vorgespannte Schraubverbindungen, und Einschraubverbindungen mit und ohne Zusatzelement zum Einsatz. Bild 6 in Kapitel 1.3.2 gibt den Überblick zu vorspannbaren Schraubverbindungen für den Einsatz in Holzwerkstoffen im Anwendungsfeld des Maschinenbaus wieder. Alle aufgeführten Schraubverbindungsarten können theoretisch durch die lokale Verdichtung eine Verbesserung ihrer Verbindungseigenschaften erfahren und sind untersuchungsrelevant.

Die Anforderungen und Einschränkungen an die Verbindungsstelle, der lokalen Verdichtung und den resultierenden Verbindungseigenschaften wurden mit der projektbegleitenden Firma abgestimmt und sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Anforderungen und Einschränkungen an den Prozess, Verbindungsstelle und Verbindungseigenschaften

Anforderung an	Beschreibung, Merkmal, Kennwerte
Werkstoffe	<p>Maschinenbaurelevante Werkstoffe mit Verdichtungspotential in der üblichen Lagerungsfeuchte mit $\omega = 7 - 10 \%$</p> <ul style="list-style-type: none"> • WVC (Wood Veneer Composite, Holzfurnierlagenverbundwerkstoff) Beispiel von phenolharzbeschichtetem Birkenperrholz (= WVC-BSH) verschiedener Hersteller • 21 mm Platte • Scheiben und Plattenrichtung
Schraubstelle	<ul style="list-style-type: none"> • Schraubenanzahl 1 • einschnittige Verbindung • Anbauteil aus gleichem Holzwerkstoff • Rückverformung der Verdichtungsstelle weniger als 3% (ohne Klimaeinfluss) • relevante Vorspannkräfte bis 9 kN
Verbindungsmittel	<ul style="list-style-type: none"> • Genormte Maschinenbauschrauben und holzwerkstoffübliche Verbindungsmittel • Schraubengrößen ab M 6 • Festigkeitsklassen 8.8 bis 12.9

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

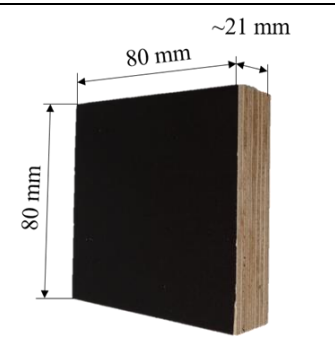
	<ul style="list-style-type: none"> • Ausnahme stellen Holzschraube, Gewindeeinsätze und Rundmuttern dar, da diese nur bis zu einer Festigkeitsklasse von 4.8 auf dem Markt verfügbar sind.
Verbindungseigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Steigerung der maximal übertragbaren Vorspannkraft um mind. 30 % • Steigerung der statischen Tragfähigkeit um mind. 30 % • Steigerung der dynamischen Tragfähigkeit um mind. 30 % • Vorspannkraftabfalls auf dem Niveau wie Kunstharzpressholz (5 % nach 10 Minuten [Eic17]) • Größere Trägheit der Vorspannkraft ggü. Klimaschwankungen
Verdichtungsprozess	<ul style="list-style-type: none"> • Prozesszeit unterhalb 10 Minuten • Temperaturen maximal im Bereich der Zersetzungstemperatur $T = 200^{\circ}\text{C}$ • Pressdruck gering wie möglich • Keine integrierte Dampfplastifizierung
Verdichtungsstelle	<ul style="list-style-type: none"> • Verdichtung auf maximal $1,5 \text{ g/cm}^3$ • Durchmesser Verdichtungskegel kleiner 80 mm • Mikroskopische Strukturschäden zulässig • Makroskopische Schäden unzulässig • Vorkonditionierung als Befeuchtung unzulässig
Klimaszenarien zur Überprüfung der Verbindungseigenschaften und Maßhaltigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsrelevante Klimaszenarien in Produktionsstätten [Mue15] • Darrtrocknung • Szenarien zum Test des Spring-Back-Effektes • Holznormklima $20^{\circ}\text{C} / 65\% \text{ rel. LF}$ • maschinenbaurelevantes Klima $20^{\circ}\text{C} / 50\% \text{ rel. LF}$ [Klu21] • Worst-Case Szenarien (Kombination aus Darrtrocknung und Feucht/ Warmem Klima)

2.1.2 Testwerkstoffe, Verbindungsgestaltung, Verbindungsmittel

Für die Versuche wurden handelsübliche Holzlagenfurnierlagenwerkstoffe aus phenolharzbeschichtetem Birkensperrholz zweier Werkstofflieferanten verwendet. Die plattenförmigen Halbzeuge sind phenolharzbeschichtet. Sofern der Einfluss der Beschichtung ausgeschlossen werden sollte, wurde die Deckschicht spanend entfernt. Der Plattenwerkstoff besteht aus einem wechselseitigen $0^{\circ}/90^{\circ}$ Aufbau von 15 Furnierlagen. Die Gesamtdicke beträgt ca. $h_P = 21 \text{ mm}$. In ausgewählten Versuchen wurden Plattenhalbzeuge in einer Dicke von $h_P = 40 \text{ mm}$ hinzugezogen. Die Rohdichte des Probenmaterials wurde bei jedem Verdichtungsversuch ermittelt und beträgt zwischen $\rho = 0,68$ bis $0,73 \text{ g/cm}^3$. Es wurde in die Probenkörperrichtungen – Scheibe und Platte unterschieden. Aus den Plattenwerkstoffen wurden je nach Versuchsart Probekörper unterschiedlicher Dimensionen gesägt. Eine definierte Vorkonditionierung erfolgte in ausgewählten Testreihen bei 20°C und $65\% \text{ rel. LF}$. Es wurden vorrangig die Lieferzustände und Laborzustände bei 20°C und $50\% \text{ rel. LF}$ genutzt. Der resultierende Feuchteanteil nach [DIN322] ist in den jeweiligen Ergebnissen mit beziffert.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Tabelle 4: Probenzuschnitte

Versuche	Probekörperdimension (B x L) in mm	
Radiale Verdichtung	80 x 80, Plattendicke 21 mm, 40 mm	
Axiale Verdichtung	80 x 80; 100 x 100, 110 x 110, 120 x 120, 130 x 130, 140 x 140	
Werkstoffversuche	20 x 20 x h _P	

Die Untersuchung der Verbindungseigenschaften mit lokal verdichteten Testwerkstoffen erfolgte an den in Bild 7 dargestellten Schraubverbindungen. Die eingesetzten Verbindungsmittel sind in Tabelle 5 ergänzt. Die Verbindungseigenschaften wurden je nach Versuchsart am Einschraubteil und wahlweise an einer einschraubigen Schraubverbindung untersucht. Die Schraube wurde stets mittig in die Testprobe montiert, sodass eine symmetrische Verbindung mit einer Trennfuge bestand.

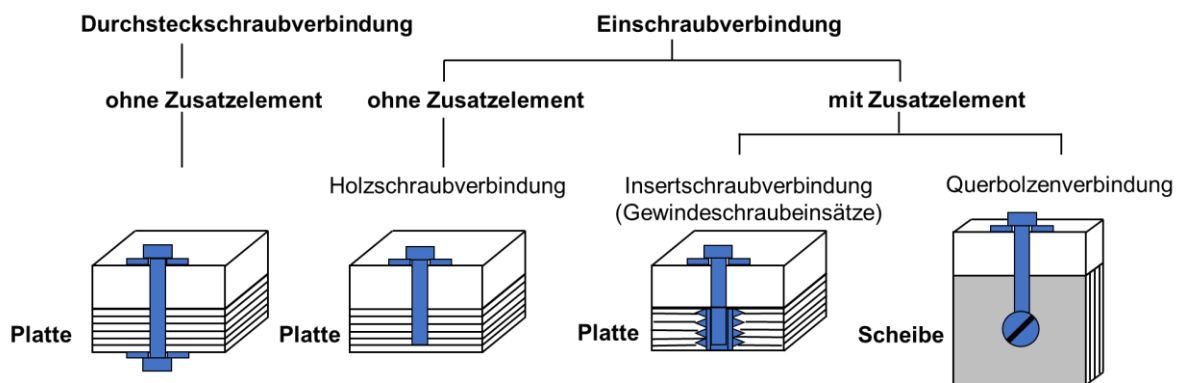


Bild 7: Untersuchungsrelevante Schraubverbindung

Tabelle 5: Eingesetzte Verbindungsmittel

Schraubverbindung	Verbindungsmittel	Verdichtung
Durchsteckschraubverbindung (DSV)	Voll- und Teilgewinde-schrauben M 6 10.9 Scheiben nach DIN EN ISO 7093 und DIN 440 R sowie Spezialscheiben aus eigener Fertigung	Radial Axial Kombiniert
Einschraubverbindung (ESV) ESV – Holzschraubverbindung	Holzschrauben	Radial Axial kombiniert
ESV – Inserterschraubverbindung	Rampa Muffen Typ SKD, SKD 330, E	Radial Axial kombiniert
ESV – Querbolzenverbindung	Rampa Rundmuttern D10 M6	Radial

Um den sicheren Kraftfluss an axial verdichteten Verbindungsstellen zu ermöglichen, wurden dem Vertiefungskegel angepasste Spezialscheiben aus Stahl und Kunstharzpressholz

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

gefertigt. Diese bilden die Geometrie des Verdichtungswerkzeuges, beschrieben in Kapitel 2.3.2 ab. Sie wurden für die Vorspannkraftrelaxationsversuche eingesetzt.

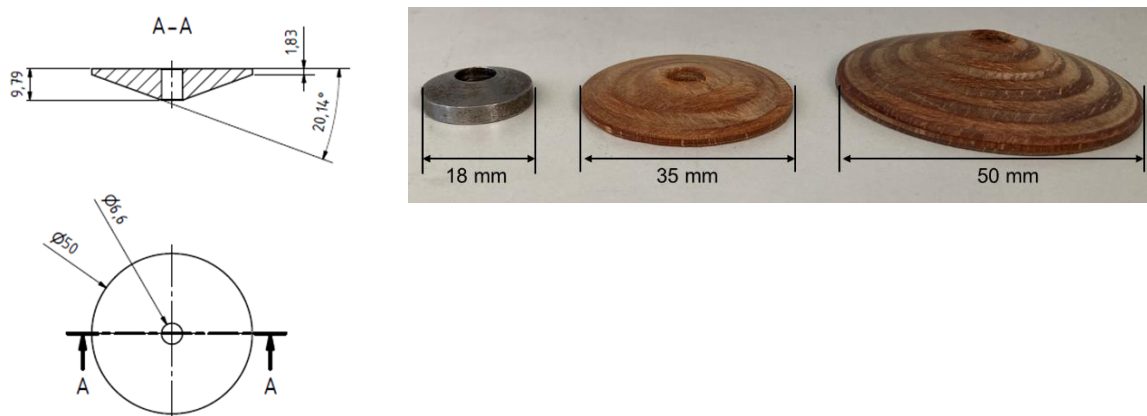


Bild 8: Spezialscheiben für axial verdichtete Verbindungsstellen, Kontur entsprechend des Verdichtungswerkzeuges aus Kapitel 2.3.2

2.2 Werkstoffkennwerte zur Auslegung Presskräfte und Temperaturen (AP2)

Zur Abschätzung der zu erwartenden Prozesskräfte für die axiale und die radiale Verdichtung wurden an den Testwerkstoffen die Druckfestigkeit bzw. Druckkraft für die Zielverdichtung auf ca. $1,5 \text{ g/cm}^3$ in den Belastungsrichtungen Scheibe und Platte ohne Temperaturzuführung ermittelt. Werkstoffspezifische Druckfestigkeiten konnten aus den zugänglichen Werkstoffdatenblättern nur bedingt entnommen werden. Die Kennwertermittlung an Würfelprouben der Abmessung $20 \times 20 \times 20,5 \text{ mm}$ erfolgte mit $v = 2 \text{ mm/min}$ auf der Universalprüfmaschine ZWICK ROELL Z 250 bis zur Endverformung der halben Plattenstärke von $10,25 \text{ mm}$.

Bei einer Ausgangswerkstoffdichte von $\rho_{12\%} = 0,7 \text{ g/cm}^3$ bedeutet eine Halbierung der Materialhöhe eine Verdichtung auf eine Dichte von $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$. Somit sollten nahezu alle Poren im Holzwerkstoff gequetscht und kein Hohlraum mehr vorhanden sein. In Plattenrichtung traten mit überschreiten der Proportionalitätsgrenze (Knickpunkt in Kurve) zudem mikroskopische Strukturschäden (Gefügezerstörung, Quetschungen, Fasergleiten und Scherrisse) auf. Bei der Zielverformung auf $10,25 \text{ mm}$ wurden Presskräfte von bis zu 17 kN gemessen, das entspricht einem Pressdruck von $42,5 \text{ MPa}$.

In Scheibenrichtung konnte keine Verdichtung auf die Zielverformung erfolgen. Die Proben knickten aus und wiesen erhebliche Strukturschäden auf. Das lässt bereits den Schluss zu, dass eine axiale Verdichtung in Scheibenrichtung aus werkstofftechnischen Gründen nicht möglich ist und in Plattenrichtung mit mikroskopischen Strukturschäden einher gehen wird.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

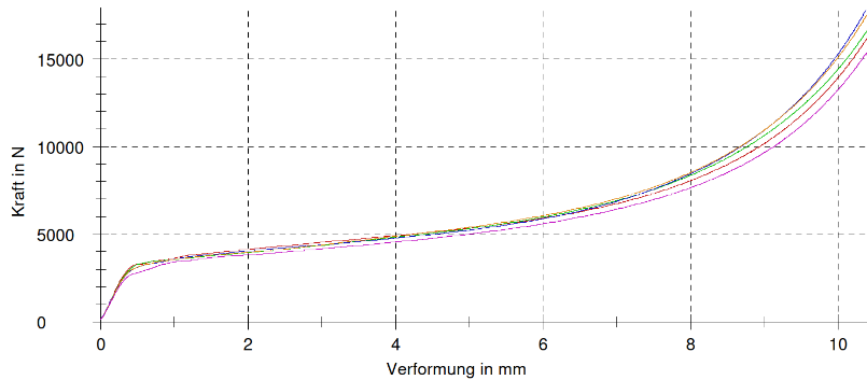


Bild 9: Kraft-Verformungsdiagramm einer verdichteten Würfelprobe in Plattenrichtung

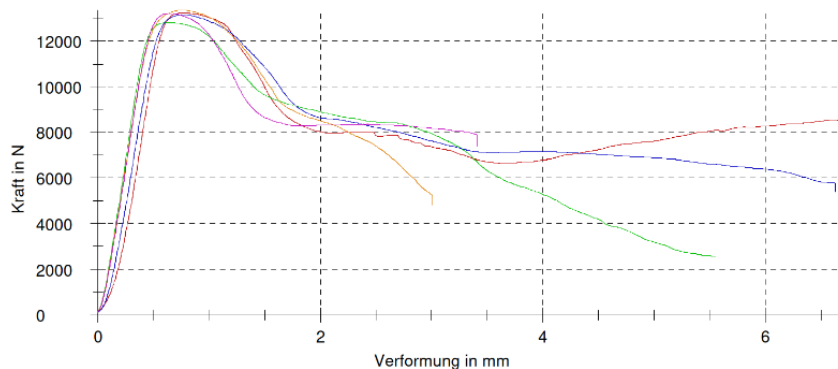


Bild 10: Kraft-Verformungsdiagramm einer verdichteten Würfelprobe in Scheibenrichtung

Zur Bestimmung der Druckeigenschaften in Scheibenrichtung, mit Relevanz für das radiale Verdichtungsverfahren, wurde der Kugeldruckversuch an gleichnamigem Probenmaterial durchgeführt. Es handelt sich hierbei um einen erweiterten Ansatz, der es erlaubt aus der Holzhärte die Druckfestigkeit abzuleiten. Das Härteprüfverfahren, angelehnt an JANKA und BRINELL, ist in seiner umfassenden Form in [Pen23] geschildert, auf welche an dieser Stelle verwiesen wird. Aus diesem Versuch wurden die Druckfestigkeiten bei 1 %-Stauchung des Birkenspertholzes berechnet. Die Werte sind in Tabelle 6 zusammengefasst und dienen zur Auslegung der Fließlochformanlage. Direkte Prozesskräfte lassen sich jedoch nicht daraus ableiten. Sie wurden in statischen Dorndurchstoßversuchen in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen ermittelt [Pen23].

Tabelle 6: Druckfestigkeiten ermittelt im Kugeldruckversuch nach [Pen23]

Werkstoff	Druckfestigkeit bei 1% Stauchung in N/mm ²	Druckfestigkeit in N/mm ²
WVC-BSH Hersteller A	4,8	44,5
WVC-BSH Hersteller C	9,88 (0°), 9,42 (90°)	32,91 (0°), 32,75 (90°)

Zur Beurteilung der oberen Temperaturgrenze für die Verfahren wurde an einer kleinen Holzprobe eine TGA-Messung durchgeführt. Diese ist in Bild 11 dargestellt und stellt den gravimetrischen Masseverlust in Abhängigkeit der Temperatur dar. Daraus wird ersichtlich, dass die wesentliche Zersetzung einzelner Holzbestandteile ab 200 °C bis 250 °C abläuft. Kurze Temperaturspitzen bis 250 °C scheinen demnach noch keine deutliche Auswirkung auf

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

den Masseverlust zu haben. Das bedeutet für den Prozess, dass kurzzeitig auch höhere Prozesstemperaturen tolerierbar scheinen.

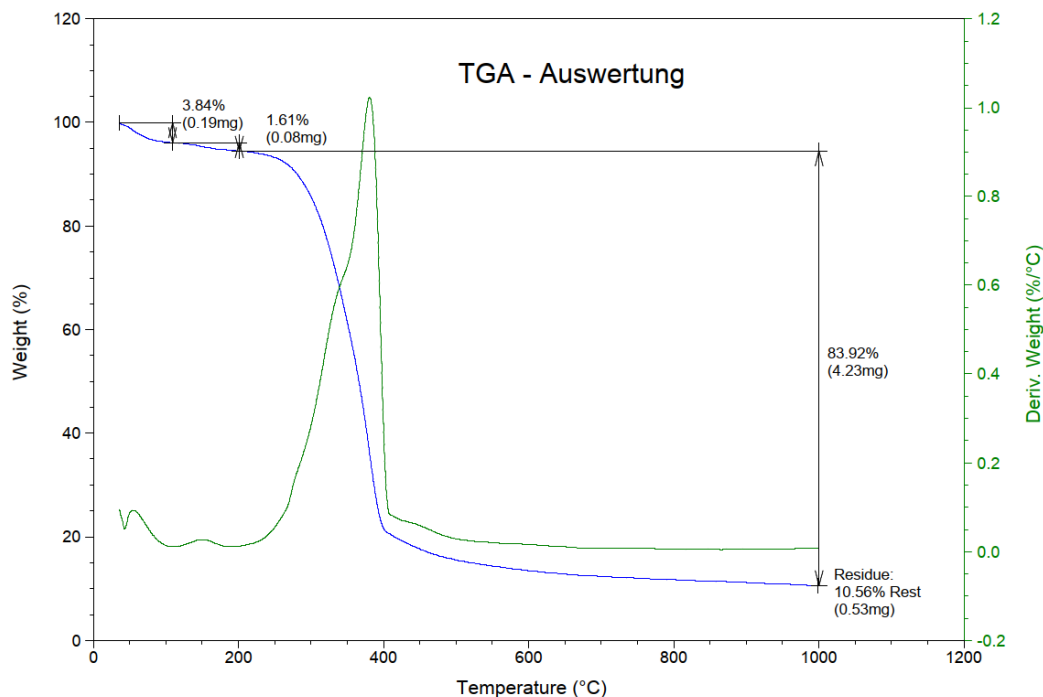


Bild 11: TGA-Analyse einer Holzprobe

2.3 Prozessbeschreibung und Weiterentwicklung Anlagentechnik (AP2)

Die Herstellung einer lokalen Verdichtung erfolgt unter Druck und Temperatur, mit dem Ziel die Porenstruktur im Holzwerkstoff auf ein Minimum zu reduzieren und diese Form zu fixieren. Unabhängig von der Verdichtungsart ist der Prozess durch die temperaturabhängigen mechanischen Kennwerte und durch die Temperatur selbst begrenzt. Bei dem Prozess müssen Temperaturen zwischen dem Erweichungspunkt des Laubholzes ($T = 65 - 82 \text{ °C}$) [Wag12, S. 63] und der Zersetzungstemperatur der Holzbestandteile bei ca. 200 °C eingehalten werden (umfassendere Beschreibung erfolgte im Kapitel Stand der Technik 1.2). Neben der Temperatur hat die Dauer der Temperatureinwirkung einen maßgeblichen Effekt auf das Verdichtungsergebnis. Sofern keine weiteren Strukturschäden infolge der Werkstoffverformung unter Druck erfolgen soll, ist die 1 %- bis 2%-Dehnung bzw. Stauchung der Furnierwerkstoffe zu berücksichtigen.

Die Kombination der Parameter aus Kraft, Temperatur und Zeit beschreiben beide Verdichtungsverfahren und bedingen sich gegenseitig. Die allgemeinen Prozessphasen sind Verdichtung unter Wärmeeintrag und anschließender Haltephase mit thermischer Fixierung. Die konkretere Prozessbeschreibung ist für das jeweilige Verdichtungsverfahren in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

2.3.1 Prozessbeschreibung und Versuchsanlagentechnik radiale Verdichtung

Die radiale Verdichtungstechnologie (auch Fließlochformen genannt) beschreibt das Eindringen eines Dornes, welcher den Holzwerkstoff durchdringt, dabei Material verdrängt und in radialer Dornrichtung eine verdichtete Fließlochbohrung im Holzwerkstoff erzeugt. Beim

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Zurückziehen des Dornes bleibt die Strukturverdichtung erhalten, sodass ein spanloses Loch geformt wurde. Es wird in das statische Verfahren (ohne Dornrotation) und das dynamische Verfahren (mit Dornrotation) unterschieden. Theoretisch lassen sich sowohl die einseitige als auch die beidseitige Bearbeitung realisieren. Beim einseitigen Verfahren in Bild 12 dringt nur von einer Seite der Dorn in das Werkstück ein. Aufgrund gravierender Strukturschäden und unzuverlässigere Verfahrensführung beim einseitigen Verfahren wurde die beidseitige radiale Verdichtungstechnologie fokussiert und hinsichtlich seiner Prozessparameter untersucht.

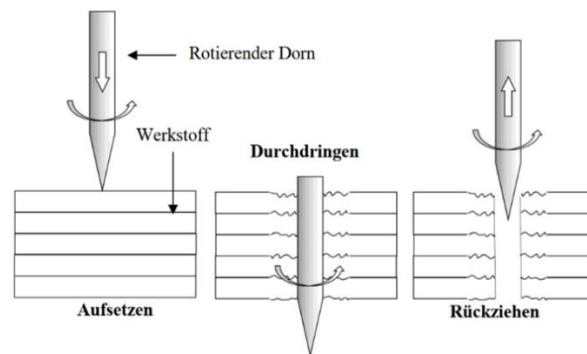


Bild 12: Prinzip des einseitigen Fließlochformens [Pen23]

Das beidseitige Verfahren ist gekennzeichnet durch den gegenseitigen Wechsel der Dorne, die von beiden Seiten in den Testwerkstoff eindringen und das Fließloch ausformen. Der grundlegende Prozessablauf der Dornbewegung ist in Bild 13 dargestellt. In der linken Darstellung fährt der obere, rotierende Dorn in den Holzwerkstoff ein. Durch die beidseitige Bearbeitung wird das fließlochgeformte Durchgangsloch in der rechten Darstellung erzeugt.

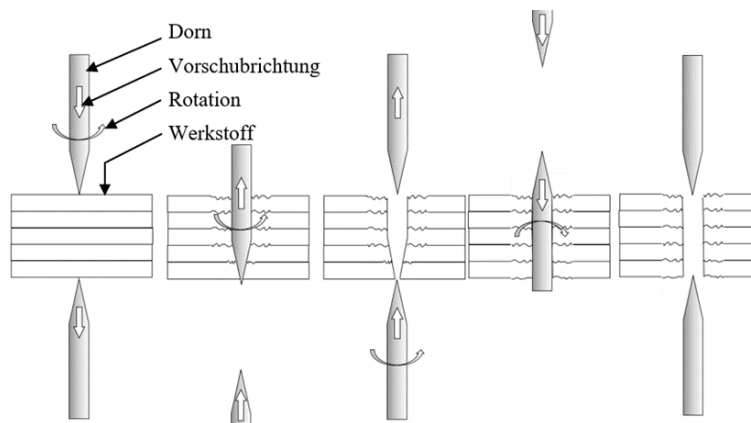


Bild 13: Prinzip des beidseitigen Fließlochformens [Pen23]

Bild 14 stellt die für das beidseitige Fließlochformen antriebs- und steuerungsseitig weiterentwickelte Versuchsanlage, den sog. „Fließlochformer“ dar. Mit den durchgeführten konstruktiven Anpassungen können Parameterbereiche bis 20 kN axialer Prozesskraft und 300 U/min gefahren werden. Der Fließlochformer ist in Abhängigkeit der Kraft und Temperatur geregelt. Die Temperaturregelung resultiert aus der Reibungswärme während der Dornrotation am Werkstoff und ist direkt von der Drehzahl abhängig. Eine aktive Temperierung der Dorne erfolgt nicht. Es wurde lediglich eine Luftkühlung vorgesehen. Der Vorschub und die daraus

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

resultierende Druckkraft werden durch den Spindelmotor und den Schlitten realisiert. Durch die Vorschubbewegung des Schlittens dringt der Dorn in die eingespannte Probe ein. Durch eine Kraftmessdose für Zug- und Druckkräfte wird die freie Bewegung der Probenhalterung unterbunden und die Messdose nimmt indirekt die auf die Probe wirkende Kraft auf. In Tabelle 7 sind die eingesetzten Dorne und deren Zielschraubengröße aufgelistet. Die Dorne besitzen im inneren eine tiefe Sacklochbohrung, die den Temperaturfühler aufnehmen. Daher wurden sie als Spezialteile gefertigt. Mit Anpassung des Fertigungsverfahrens können zukünftig Fertigungskosten um Faktor 10 eingespart werden.

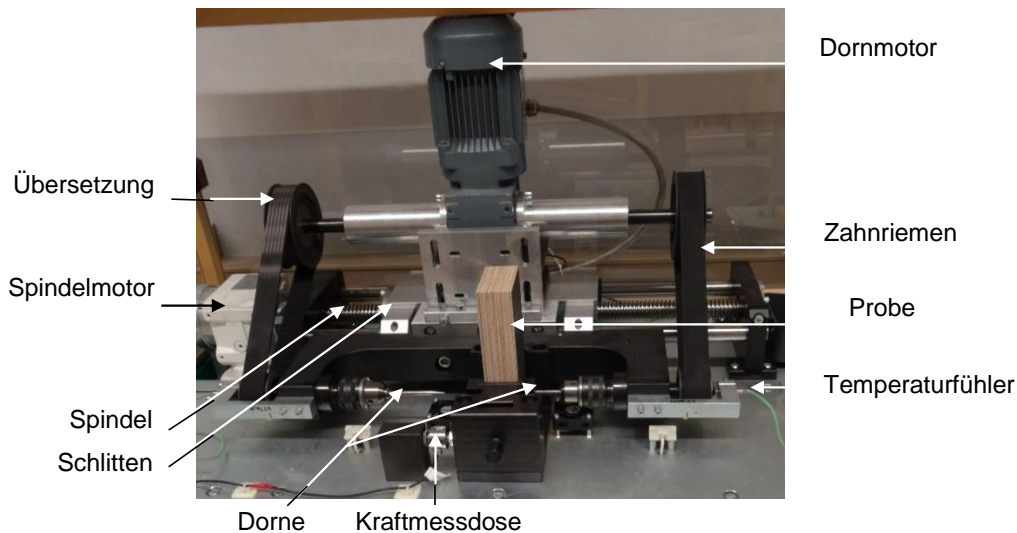


Bild 14: Fließlochformer

Tabelle 7: Eingesetzten Fließlochdorne für das dynamische Verfahren

Werkstoff	Schraubengröße	Dorndurchmesser [mm]	Spitzenwinkel [°]	Rauheit [μm]
Stahl S235JR	M10	11	20°	3,2
	M6	6,6	20°	3,2
	M6	6,6	20°	10
	M6	6,6	20°	15
Edelstahl	M6	6,6	20°	
	M6	6,6	30°	
	M8	9	20°	
	M8	9	30°	

2.3.2 Prozessbeschreibung und Versuchsanlagentechnik axiale Verdichtung

Bei der axialen Verdichtung wird ein Heizstempel in der Form eines Kegels in den Plattenwerkstoff gepresst und unter bestehender Strukturverdichtung eine Vertiefung im Werkstoff erzeugt. Nach einer definierten Haltezeit in definierter Wegposition (Relaxation) und beginnender Abkühlung des Stempels findet die thermische Fixierung und der Spannungsabbau statt. Die verdichtete Vertiefung bleibt als Geometrieabformung des Stempels im Werkstück zurück. Die grundlegenden Prozessphasen sind in Bild 15 dargestellt.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

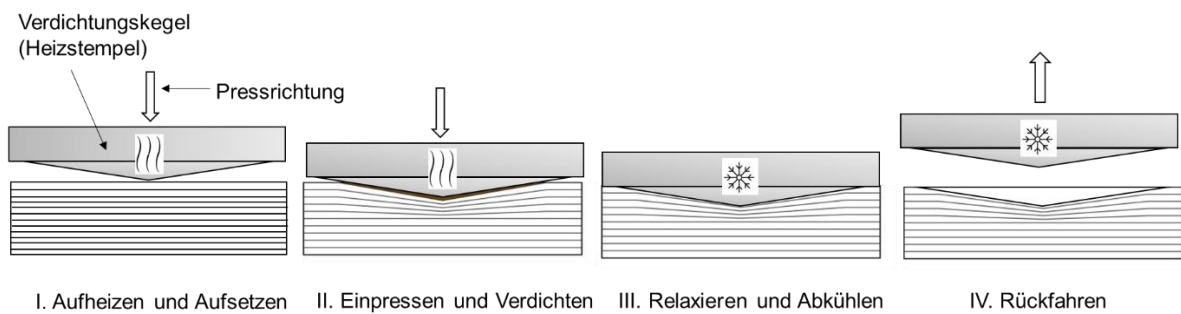


Bild 15: Prozessphasen axiale Verdichtung

Der Prozess wird mit der Versuchsanlagentechnik aus temperierbaren Heizstempel auf einer Universalprüfmaschine mit Prüflasten von bis zu 250 kN durchgeführt. Mit der in der Universalprüfmaschine integrierten Versuchstechnik in Bild 17 wurden die Parameter-Eigenschaftsuntersuchungen durchgeführt. Der Prozess wurde als weggeregeltes Verfahren umgesetzt. Die Presstiefe wurde entsprechend des Zielverdichtungsgrades festgelegt und die resultierende Kraft aufgezeichnet. Die Technik zur Temperaturkontrolle ermöglichte Stempelheiztemperaturen bis 340°C, wobei Temperaturabweichungen von +/- 10 °C toleriert werden mussten. Zur Kühlung des Stempels wurde Druckluft eingesetzt. Prüfmaschinenseitig erfolgte die Einstellung und Regulierung des Heizstempels hinsichtlich Vorschubgeschwindigkeit, Positionierung und Haltezeit. Es wurden Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 1 mm/min und 600 mm/min variiert. Die Haltezeit in definierter Wegposition variierte von wenigen Minuten bis mehrere Stunden.

Die Stempelgeometrie resultiert aus der 1% bzw. 2%-Dehngrenze der Furniere mit der Zielvorgabe, dass eine lokale Verdichtung von 1,5 g/cm³ erreicht werden soll. Aus der Hypotenuse des Verdichtungskeils (entspricht der Hälfte des Verdichtungskegels), der Eindringtiefe des Werkzeuges und der 1 % bzw. 2% Dehngrenze der Furnierlagen resultierte ein Spitzenwinkel von ca. 140 °. Bild 16 stellt die eingesetzten Werkzeuge dar. Aus der Plattendicke und Plattendichte wurde die Einpresstiefe des Kegels berechnet, die notwendig ist, um die geforderte Zieldichte zu erreichen. Dies erfolgte für jeden separaten Probekörper. Die Parametereinstellung ist in den jeweiligen Verdichtungsversuchen mit beschrieben.

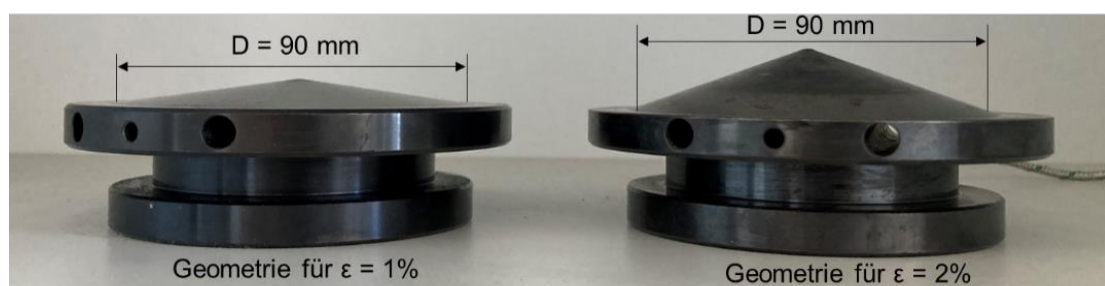


Bild 16: Verdichtungskegel axiale Verdichtung mit Grenzdehnung von 1% und 2%

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

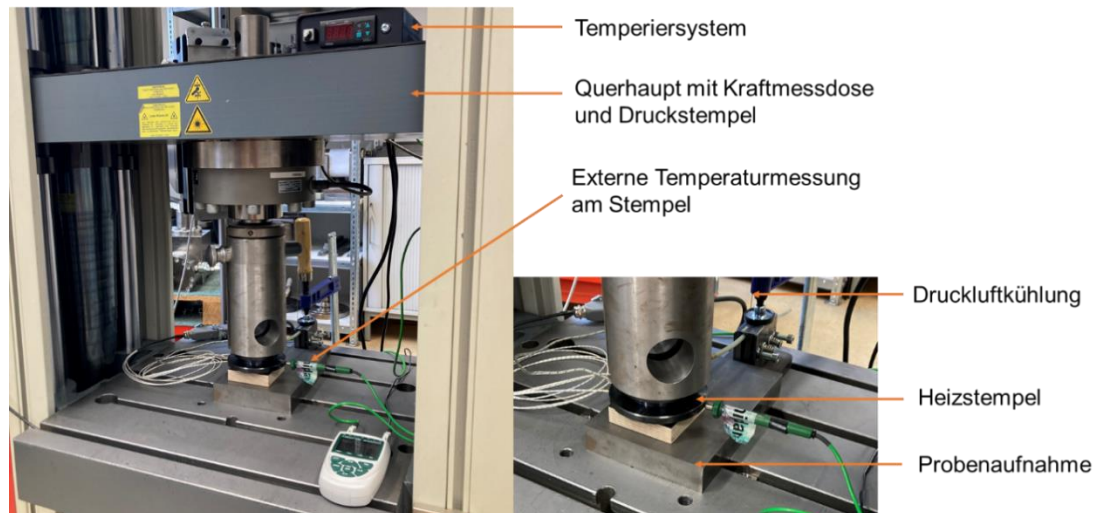


Bild 17: Versuchsaufbau für die axiale Verdichtung

2.3.3 Versuchstechnik Kombinierte axiale-radiale Verdichtung

Die durchgeführten Versuche zur axialen Verdichtung zeigten, dass eine Kombinationsverdichtung auf der Versuchsanlage „Fließlochformer“, aufgrund zu hoher Presskräfte von bis zu 40 kN nicht möglich ist. Trotz thermischer und hygrischer Plastifizierung des Holzes konnten die Presskräfte nicht auf unter 20 kN gesenkt werden. Aus diesem Grund wurden die Versuche zur Kombinationsverdichtung ebenfalls auf der Universalprüfmaschine mit vorheriger Fließlochformung durchgeführt. Die alternative Verfahrensführung ist in Bild 18 schematisch dargestellt. Es ist gekennzeichnet durch die vorgelagerte radiale Verdichtung auf dem Fließlochformer und der anschließenden axialen Verdichtung auf der Universalprüfmaschine. Damit sich dabei das zuvor hergestellte radiale Fließloch nicht verdrückt, wurde ein Hilfsbolzen eingesetzt. Dieser wird mit dem Einpressen des Heizstempels durch die Probe in die Durchgangsbohrung der Probenaufnahme gedrückt. Die radial verdichtete Fließlochbohrung bleibt damit erhalten.

Schritt 1: Radiale Verdichtung mittels Fließlochformung herstellen

Schritt 2: axiale Verdichtung mit fixiertem Fließloch herstellen

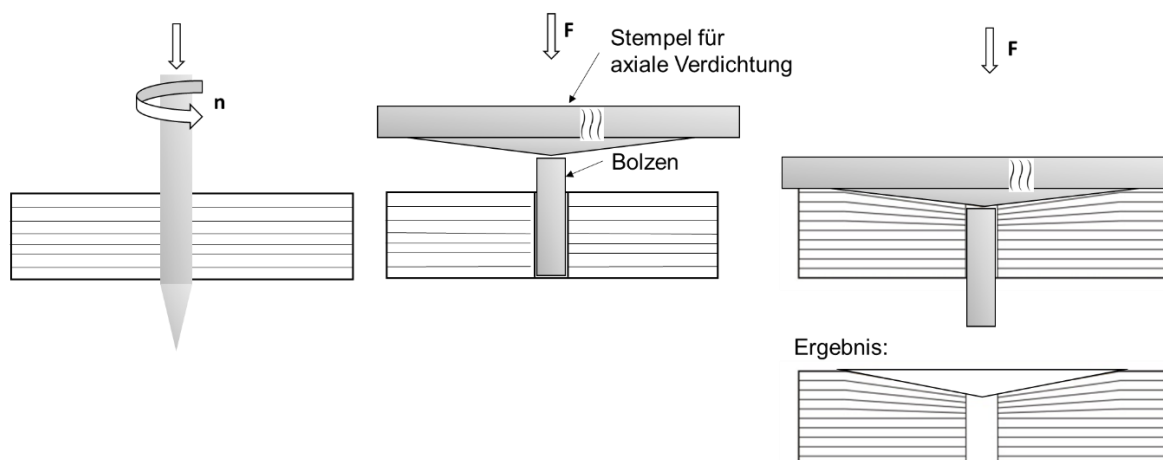


Bild 18: Versuchsaufbau zur Herstellung axial-radial verdichtete Proben

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Der Versuchsaufbau ist entsprechend der axialen Verdichtung in Bild 17 dargestellt und unterscheidet sich zur axialen Verdichtung lediglich durch eine Bohrung in der Probenaufnahme, in welche der Hilfsbolzen versenkt wird. Die Weiterentwicklung der Kombinationsverdichtung und des dafür notwendigen Werkzeuges sind im Kapitel 2.6.1 Verfahrensmodifikation beschrieben.

2.4 Prozessparameter – Eigenschaftsuntersuchungen (AP3)

Die Untersuchung des Zusammengangs aus Prozessparametern und resultierenden Eigenschaften der Verdichtungsstelle diente sowohl der Prozessentwicklung als auch dem Prozessverständnis. Auf Basis der Ergebnisse zum radialen und axialen Verdichten erfolgte die Verfahrensmodifikation in Kapitel 0. Die Prozessoptimierung hin zu kürzeren Prozesszeiten war bereits als Zielkriterium mit vorgegeben. Weitere Maßnahmen, die bei einer industriellen Neukonzeption zu berücksichtigen sind, sind in den jeweiligen Kapiteln mit benannt. Die mechanischen Eigenschaften der Verbindungsstelle sind in Abhängigkeit der Schraubverbindung in Kapitel 2.5 aufgeführt.

2.4.1 Radiale Verdichtung

Für die radiale Verdichtung wurden die Parameteruntersuchungen zur Herstellung radial verdichteter Schraubstellen durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten sowohl in einem statischen Verfahren, ohne Dornrotation, als auch in dem dynamischen Verfahren, mit Dornrotation. Es konnten mit der Variation der Parameter Dornwerkzeug, Kraft, Zeit, Drehzahl, Feuchtigkeit, verdrängtes Volumen und Werkstoff die vorteilhaften Parameter zur Prozessführung erarbeitet werden. Diese Einflussparameter sind in Bild 19 zusammengefasst und die Ergebnisse werden folgend kurz erläutert. Die Strukturelle Untersuchung der radial verdichteten Fließlöcher erfolgte an ausgewählten Proben und Prozessparameterkombinationen. Zusätzlich wurde der konstruktive Parameter des Randabstandes zwischen Bauteilaußenseite und Dornachse, sowie der Abstand einzelner Fließlöcher untereinander untersucht.

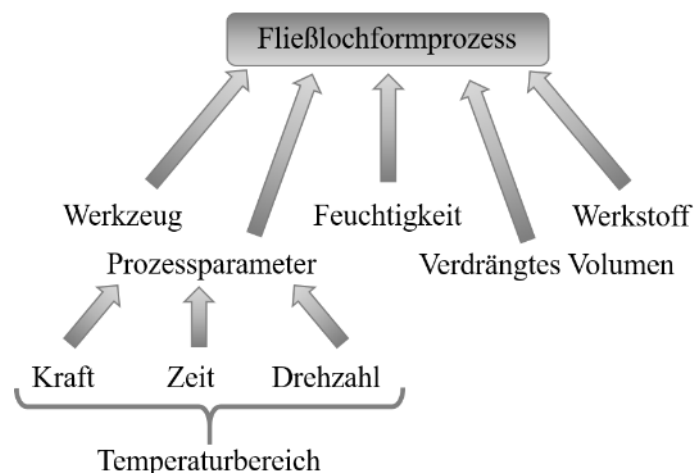


Bild 19: Relevante Einflussfaktoren auf den Fließlochformprozess [Pen23]

Werkzeug:

Aus dem Oberbegriff Werkzeug lassen sich Eigenschaften, wie Geometrie, Werkzeugmaterial und Oberflächenbeschaffenheit definieren. Aus einer Modellberechnung ließ sich vorab theoretisch ableiten, dass bei der Geometrie der Dornspitzenwinkel möglichst spitz sein sollte. Damit wird eine möglichst große Kraft in Scheibenrichtung und damit die umformende Kraft erzielt. Die Axialkraft fallen im Verhältnis dazu möglichst gering aus. Ebenso wirkt ein spitzer Dorn einem Spalten entgegen, denn würde der Spaltgrund gegenüber dem Spaltkeil vorseilen, würde die Spaltbarkeit begünstigt werden. In der Kastengrafik der Bild 20 sind die in den Untersuchungen aufgetretenen Axialkräfte in Abhängigkeit der Spitzenwinkel bei einem Dorn mit 6 mm Durchmesser dargestellt. Nach der Prüfung der statistischen Plausibilität kann jedoch nicht von einem relevanten Merkmalsunterschied gesprochen werden. Dem Bild 20 ist zu entnehmen, dass der Dorn mit der Dornspitze von $\gamma = 30^\circ$ einen, wenn auch nicht signifikanten, geringeren, maschinenseitigen Axialkraftaufwand, jedoch mit der größten Streuung zur Durchdringung der Probe aufweist. Parametervariation überschaubar zu halten wurde der Dornspitzenwinkel von $\gamma = 30^\circ$ für das weitere sukzessive Vorgehen ausgewählt.

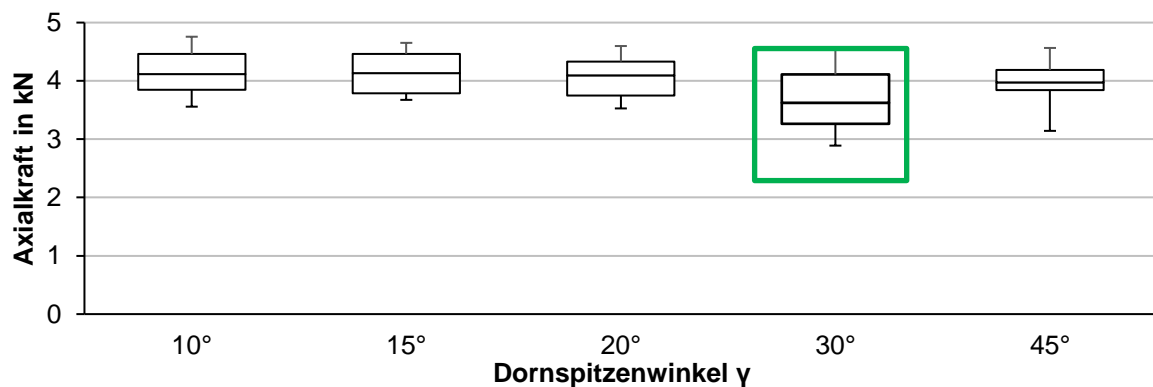


Bild 20: Axialkraft-Winkel-Abhängigkeit bei 6 mm Dorndurchmesser [Pen23]

Ähnlich verhielt sich das Ergebnis bei der Oberflächenbeschaffenheit. So wurden Dorne mit gleichbleibendem Durchmesser, aber mit der Rauheit R_z von $3 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ und $16 \mu\text{m}$ untersucht. Theoretisch verringert sich der Auszieh Widerstand umso glatter der Dorn ist. Der Auswertung aus der maximalen Axialkräfte in Bild 21 ist zu entnehmen, dass die Rauheit des Dorns die prozessrelevanten Axialkräfte nicht signifikant beeinflusst. Es ist zu erkennen, dass die Streubreite der Messreihe mit der Rauheit zunimmt. Somit ist ein glatter Dorn mit geringerer Rauheit für die Wiederholgenauigkeit bei auftretenden Prozesskräften zu bevorzugen. Die gewählte Rauheit $R_z = 3 \mu\text{m}$ wurde für die fortgeführten Versuche übernommen.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

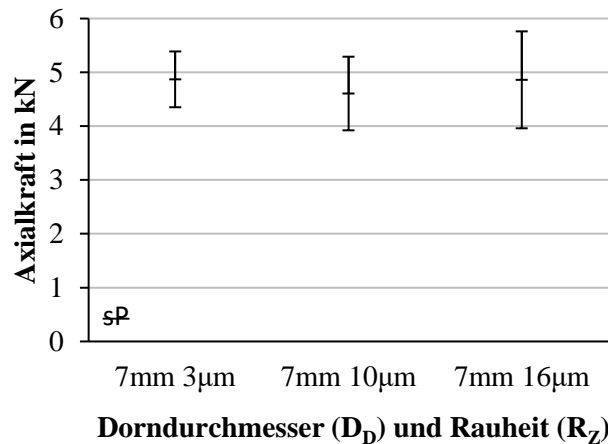


Bild 21: Kraftaufwand eines 7 mm Dorns bei unterschiedlicher Oberflächenrauheit des Dorns [Pen23]

Ein rotationssymmetrischer Dorn begünstigt in den statischen und dynamischen Versuchen die gleichmäßige Verteilung der aus der Maschine wirkenden Druckkraft. Hinterschneidungen in der Dorngeometrie sollten durch den Rückzug und die werkstoffseitige Rückverformung im Loch vermieden werden.

Des Weiteren konnte der Parameter des Dorndurchmessers anhand der auftretenden Axialkraft, vorab mit der Modellberechnung und in Versuchen ermittelt werden. So besteht die Abhängigkeit vom Dorndurchmesser und dem damit verdrängten Volumen. Die drei Dorndurchmesser mit 6 mm, 7 mm und 10 mm mit dem Dornspitzenwinkel von $\gamma = 30^\circ$ und einer Oberflächenrauheit von $R_z = 3 \mu\text{m}$ weisen in der aufzubringenden Axialkraft einen signifikanten Unterschied auf (vgl. Bild 22). Wird das Verhältnis zwischen Axialkraft und Dorndurchmesser gebildet (vgl. Bild 22 re.), so ergibt sich kein signifikanter Merkmalsunterschied. Der Mittelwert aus den Verhältnissen der Axialkräfte zu den Durchmessern beträgt $F = 648 \pm 91,5 \text{ N}$. So kann dieser Wert überschlägig für abweichende Dorndurchmesser zur Abschätzung der notwendigen Kraft herangezogen werden. Für eine hohe Standzeit sollte als Material ein metallischer Werkstoff verwendet werden. Dieser ermöglicht eine gute Bearbeitung vorzugsweise durch Drehen, eine gute Wärmeleitung der auftretenden Prozesswärme und eine Variation der Oberflächenrauheit.

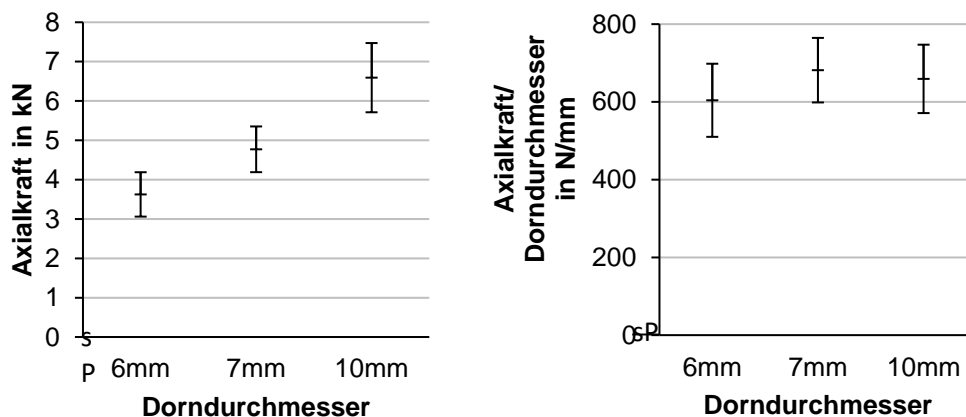


Bild 22: Abhängigkeit Axialkraft-Dorndurchmesser (li.) und Verhältnis Axialkraft zu Dorndurchmesser (re.) [Pen23]

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Temperatur des Testwerkstoffes:

Für die Beurteilung des Temperatureinflusses wurden Proben kurzzeitig im Darrschrank bei $T = 103 \text{ °C}$ gelagert und mit einem 6 mm Dorndurchmesser verschiedener Dornspitzen und der Oberflächenrauheit von $R_z = 3 \text{ }\mu\text{m}$ untersucht. Wie dem Bild 23 zu entnehmen ist, kann kein signifikanter Merkmalsunterschied in Abhängigkeit vom Spitzenwinkel zur Temperatur abgebildet werden.

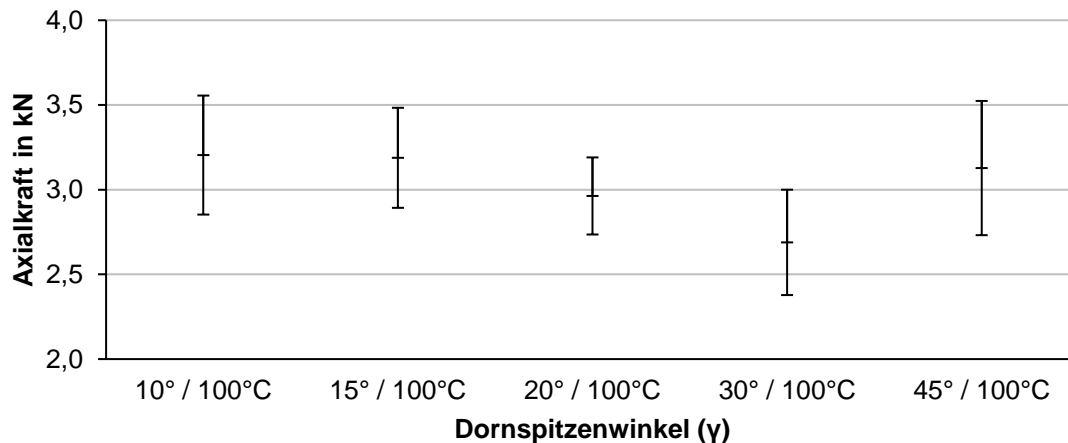


Bild 23: Abhängigkeit Axialkraft-Werkstofftemperatur und Dornspitzenwinkel [Pen]

Werden die fließlochgeformten Proben der Probenausgangstemperatur von $T = 20 \text{ °C}$ und $T = 100 \text{ °C}$ mit verschiedenen Dornspitzenwinkeln bei gleichem Durchmesser an der notwendigen Axialkraft für die Durchdringung verglichen, so ist zu erkennen, dass die Temperatur einen Einfluss auf den Prozess hat, aber nicht in abhängig vom Dornspitzenwinkel ist. (vgl. Bild 24) Ein arithmetischer Vergleich ergibt eine Reduktion der notwendigen Axialkraft zwischen den Proben von $T = 20 \text{ °C}$ und $T = 100 \text{ °C}$ von 21-28 %.

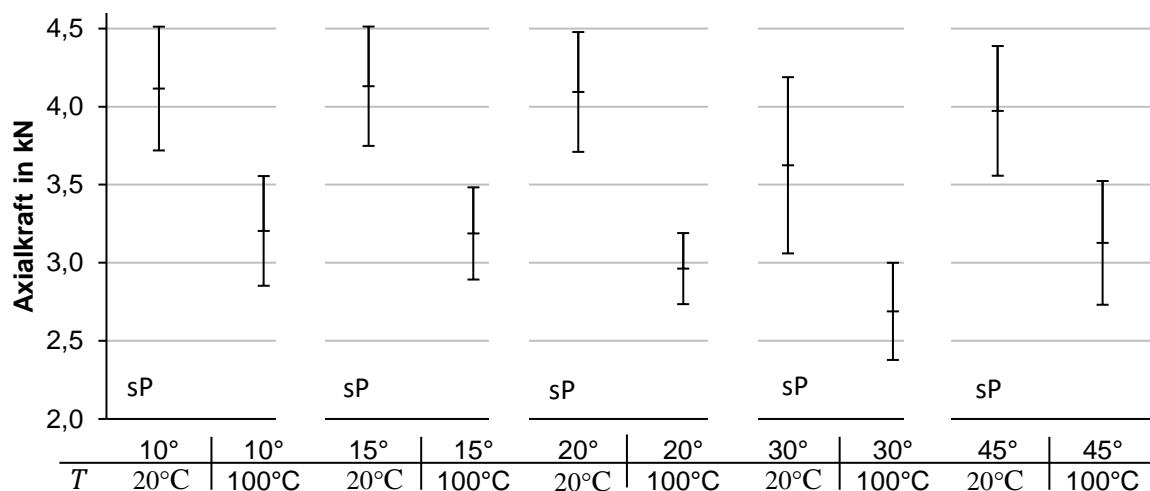


Bild 24: Axialkraft-Winkel-Abhängigkeit von 20°C und 100°C Proben [Pen23]

Dorndrehzahl:

Für die Untersuchung des Drehzahleinflusses wird ein definierter Dorn mit gleichbleibendem Durchmesser, Spitzenwinkel und Rauheit verwendet und die Dorndrehzahl variiert. Diese wurden in ein 20 mm Birkenfurnierwerkstoff bis zum vollständigen Austreten der Dornspitze

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

auf der gegenüberliegenden Seite mit konstantem Vorschub von $v = 80 \text{ mm/min}$ hindurchgefahren. Prozessbedingt resultieren die Axialkraft und die Temperatur. Bild 25 gibt einen grafischen Überblick über die Ergebnisse wieder.

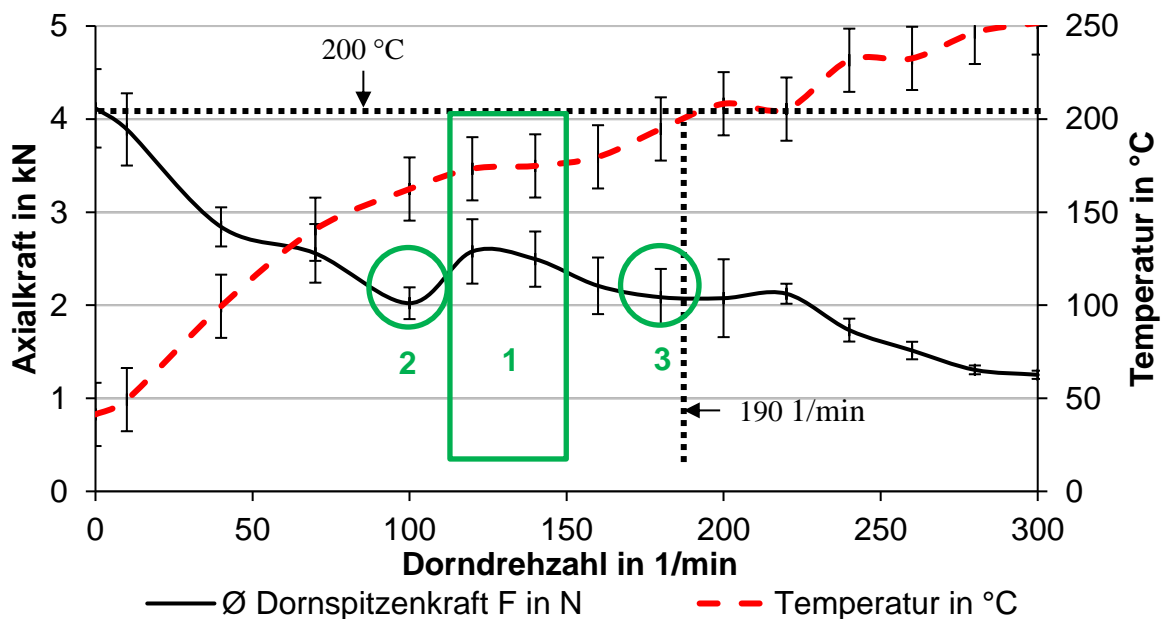


Bild 25: Axialkraft-Temperatur-Drehzahl-Zusammenhang [Pen23]

Es ist zu erkennen, dass ohne Dornrotation (Drehzahl $n = 0 \text{ 1/min}$) die größte Axialkraft mit $F = 4115 \pm 422 \text{ N}$ auftritt. Aus dem Diagramm ist weiterhin festzustellen, dass die Temperatur mit zunehmender Drehzahl vorwiegend steigt und die Axialkraft vorwiegend sinkt. Der in der Abbildung als Rechteck mit der Nummer 1 markierte Bereich liegt in dem für den Prozess angestrebten Temperaturbereich von $T = 130\text{-}190 \text{ °C}$, in welchem theoretisch der Abfall des Schubmoduls von Lignin liegen sollte. In dem Bereich des Rechtecks der Nummer 1 ist ein Stagnieren des Temperaturanstiegs und ein Anstieg der Axialkraft festzustellen. Dieser Effekt kann womöglich auf die Erweichungstemperatur vom Lignin zurückgeführt werden. Das Ziel des Fließlochformens im Holzwerkstoff ist die Locherzeugung mit möglichst geringem Axialkraftaufwand. Der auftretende Effekt und die Auswirkung ist jedoch kein Untersuchungsgegenstand und hätte den Projektumfang des Vorhabens deutlich überstiegen. Als Gedankenexperiment kann dennoch zusammengefasst werden, dass durch das Erweichen des Holzwerkstoffs im Dorneingriff die viskoelastischen Eigenschaften sich ändern und diese zäher werden kann. Resultierend kann dadurch die Reibung und damit die notwendige Axialkraft steigen.

Als obere Grenze für die drehzahlabhängige Durchdringung des Holzwerkstoffs kann der maximale Temperaturwert bei 200 °C als Grenze für die Schädigung durch Zersetzung der Cellulose gesetzt und somit die maximale Drehzahl bei 90 1/min abgeleitet werden. (vgl. Bild 25) Dies gilt im Umfang der Versuche unter den gewählten Parametern der Dorne, des Werkstoffs und des vorhandenen konstanten Vorschubs.

Es leiten sich unter der Nebenbedingung eines möglichst geringen Axialkraftaufwands zwei Arbeitsbereiche ab. Diese sind in der Bild 25 eingekreist und mit 2 und 3 markiert. Der Bereich

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

2 wird als **schnelles Verfahren** definiert. Dort, bei einer Dorndrehzahl von $n= 100$ 1/min, liegt die Axialkraft bei $F= 2022\pm 171$ N und die Temperatur bei $T= 162\pm 25$ °C. Der Bereich 3 wird als **thermisches Verfahren** definiert. Dieser liegt bei einer Dorndrehzahl von $n= 180$ 1/min. Die Axialkraft beträgt $F= 2086\pm 304$ N bei einer Temperatur von $T= 195\pm 19$ °C. Die Benennung wurde gewählt, weil das thermische Verfahren in einem höheren Temperaturbereich stattfindet und das schnelle Verfahren eine etwas kürzere Prozesszeit aufweist. Werden maximal zulässige Axialkräfte unterhalb der Axialkraftkurve gewählt, so zeigen Versuche, dass sich steuerungsseitig die Prozesszeit verlängert bzw. dringt der Dorn nicht durch die Probe hindurch.

Ausgehend von einer Dorndrehzahl von $n= 100$ 1/min im schnellen Verfahren wurden die minimalen Axialkräfte bestimmt, die erforderlich sind, um eine Probe aus Birkenfurnierwerkstoff mit einer Plattenstärke von $h_p= 20$ mm mit einem Dorn ($D = 6,6$ mm, $\gamma = 20^\circ$) zu durchdringen. Die Drehzahl des thermischen Verfahrens mit $n= 180$ 1/min erweist sich in diesem Versuch als ungeeignet, da sie sich bereits an der oberen Temperaturgrenze des Fließlochformprozesses befindet. Eine nur geringfügige Reduzierung der Axialkraft würde dazu führen, dass die maximale Prozesstemperatur von $T = 200^\circ\text{C}$ überschritten wird. Der Versuch dient somit der Bestimmung der unteren Verfahrensgrenze. Die Grenzbedingung besteht darin, dass die Probe durchdrungen wird, sodass die Dornspitze, wie in Bild 26 dargestellt, auf der gegenüberliegenden Seite sichtbar wird. Sobald dies geschieht, verringert sich die erforderliche Axialkraft, und der Dorn kann die Probe vollständig durchfahren. Gleichzeitig stellt das vollständige Durchdringen eine Grundvoraussetzung für ein zweiseitiges Verfahren dar, da sich der in der zweiten Stufe von der Gegenseite eintretende Dorn im erzeugten Durchstoßpunkt zentriert.



Bild 26: Durchdringung der Dornspitze als Voraussetzung der Prozessführung

Feuchtigkeit des Testwerkstoffes und Axialkraft:

Die Prozesstemperatur wurde bei der Untersuchung variabel als resultierender Kennwert aufgezeichnet. Die Drehzahl ist mit $n=100$ 1/min konstant. Die grafische Auswertung ist in Bild 27 dargestellt. Es wurden zwei Materialkonditionierungen untersucht. ($T=20\text{ °C}$; 65 % rLF und $T=19,3\text{ °C}$; 40 % rLF).

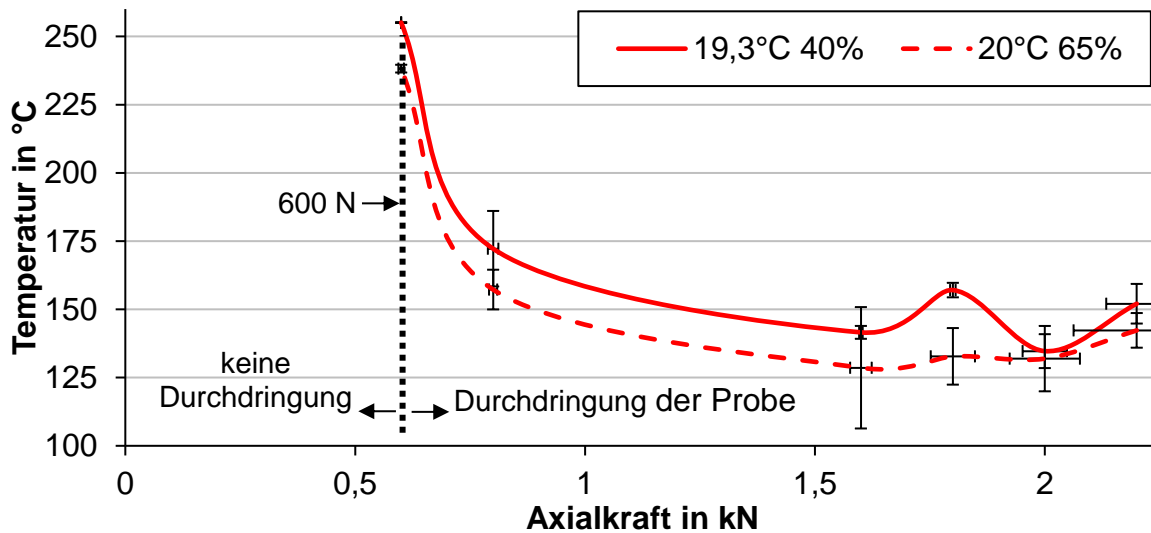


Bild 27: Temperatur-Axialkraft-Verlauf als Funktionsgrenze des Fließlochformverfahrens [Pen23]

Prozessparameterkombinationen aus Axialkraft und Temperatur unterhalb der Kurven führen bei der Kombination mit einem $D_D=6,6$ mm Dorndurchmesser und einer $\gamma=20^\circ$ Dornspitze zu sehr langen Prozesszeiten bzw. wird die Probe nicht durchdrungen. Die Konditionierungszustände unterscheiden sich in der Temperatur. Die Temperatur-Axialkraftkurve der Laborproben ist im Mittel um $\Delta\bar{T}=15\text{ °C}$ in den höheren Temperaturbereich verschoben. Wird der Prozessparameter der Axialkraft auf $F=2000$ N angehoben, so durchdringt der Dorn mit dem maximalen Vorschub die Probe. Das ist der Zustand des schnellen Verfahrens aus dem Versuch der variablen Drehzahl. An dieser Stelle schneiden sich die untere und obere Verfahrensgrenze. Die Bearbeitungszeit definiert sich im Versuch vom Beginn des Eindringens, über den Austritt und das Zurückfahren in die vordefinierte Endlage. Somit ist die Zeit nicht mit der Prozesszeit gleichzusetzen. Die Zeit nimmt mit abnehmender vordefinierter Axialkraft zu. Die kürzeste Zeit mit $t=53$ s und die geringste Temperatur mit $T=132-135\text{ °C}$ ist bei der Axialkraft von $F=2000$ N für beide Probenkonditionierungen. Aus diesem Zusammenhang wurde die Begrifflichkeit des schnellen Verfahrens definiert.

Über die gemessenen Werte lässt sich ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Axialkraft ableiten (vgl. Bild 27). Aus der Grafik ist zu erkennen, dass eine Dornkraft unter $F=600$ N nicht ausreichend ist, da die Dornspitze den Probekörper nicht durchdringt und die Temperatur die Prozessgrenze von $T=200\text{ °C}$ überschreitet. Versuche über $T=250\text{ °C}$ wurden abgebrochen. Niedrigere Axialkraft-Temperatur-Kombinationen führen zu langen Prozesszeiten oder verhindern die Durchdringung. Die Temperatur-Axialkraftkurve der feuchteren Proben ist im Mittel um $\Delta\bar{T}=15\text{ °C}$ in den höheren Temperaturbereich verschoben. Wird der Prozessparameter der Axialkraft auf $F=2000$ N angehoben, durchdringt der Dorn

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

mit maximalem Vorschub die Probe. Das ist der Zustand des schnellen Verfahrens aus dem Versuch der variablen Drehzahl. Hier treffen untere und obere Verfahrensgrenze aufeinander. Die Bearbeitungszeit umfasst das Eindringen, den Austritt und das Zurückfahren, unterscheidet sich aber von der eigentlichen Prozesszeit. Sie steigt mit abnehmender Axialkraft. Die kürzeste Zeit von $t = 53$ s und niedrigste Temperatur von $T = 132-135$ °C treten bei $F = 2000$ N auf, womit das schnelle Verfahren definiert wurde.

Verdrängtes Volumen

Diese Parameteruntersuchung wurde mit den Dorndurchmessern von 6 mm und 10 mm, einen Dornspitzenwinkel von $\gamma = 30$ und der Oberflächenrauheit $R_z = 3$ μm an variabel vorgebohrten Proben durchgeführt. Bild 28 stellt die Axialkräfte in Abhängigkeit des Dorndurchmessers und Vorbohrung dar. Daraus wird ersichtlich, dass die Vorbohrung bei dem $D_D = 6$ mm Dorn keinen Einfluss auf die Axialkraft hat. Bei Verwendung eines $D_D = 10$ mm Dorns hingegen ein signifikanter Unterschied besteht. Um die Axialkraft möglichst gering zu halten, sollte für die Fließlochformung eines 10 mm großen Fließlochs eine Vorbohrung von 8 mm bestehen. Zudem ist festzuhalten, dass bei größeren Dorndurchmessern der Einfluss der Vorbohrung zunimmt. **Dadurch ist zu empfehlen alle Fließlöcher größer 6 mm vor der Fertigung vorzubohren.**

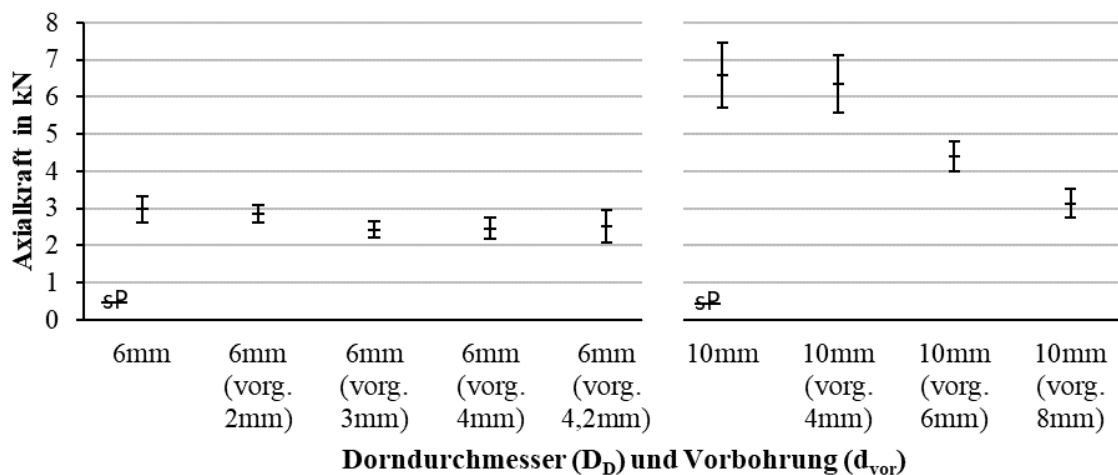


Bild 28: Axialkräfte in Abhängigkeit verschiedener Vorbohrdurchmesser und Dorndurchmesser [Pen23]

Strukturanalyse fließlochgeformter Verdichtungsstellen

Die Strukturanalyse wurde mittels diverser Auflichtmikroskopietechniken durchgeführt und verfolgte das Ziel das Aussehen der erzeugten Fließlöcher zu analysieren. Bild 29 zeigt eine 50-fache Auflichtmikroskopieaufnahme eines in Harz eingebetteten Schiffs mit mittig getrenntem Durchgangsloch. Dieses wurde mit einem Dorn ($D_D = 6,6$ mm, $\gamma = 20^\circ$, $R_z = 3$ μm) im schnellen Verfahren ($n = 80$ 1/min, $v = 80$ mm/min) erzeugt. Aufgrund der unklar definierten Lochleibung lässt sich kein homogener Durchgangslochdurchmesser über die gesamte Tiefe bestimmen. Der Schaftdurchmesser einer M6-Schraube ($D = 6$ mm) ist eingezeichnet. Der berechnete Einflusszonendurchmesser für eine Probe mit $\rho_{8,4\%} = 0,64 \pm 0,03$ g/cm³ beträgt $d_2 = 8,7$ mm, wobei bis maximal $d = 9$ mm Veränderungen erkennbar sind. Es ist der lokale

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Verdichtungsbereich anhand der komprimierten Holzstruktur wandungsseitig erkennbar. Zugleich ist in Bild 30 ersichtlich, dass die Furnierlagen im Verdichtungsbereich ausknicken. Quetschungen und dauerhaft verdichtete Poren sind im Randbereich erkennbar. Während im rechten Bereich intakte Zellwände mit erkennbaren Hohlräumen sichtbar sind, erscheint der linke Bereich dunkler und verdichtet, ohne erkennbare Hohlräume.

Anhand der ausgeknickten Furnierlagen ist die Hubbewegung der Dorne in Bild 29 erkennbar. Sie zeigt, dass der erste rotierende Dorn eindrang, bis seine Spitze austrat, und wurde zurückgefahren. Anschließend durchdrang der zweite Dorn von der Gegenseite die $h_p = 21$ mm starke Probe vollständig, bevor er zurückfuhr, womit der Fließlochformprozess abgeschlossen war.

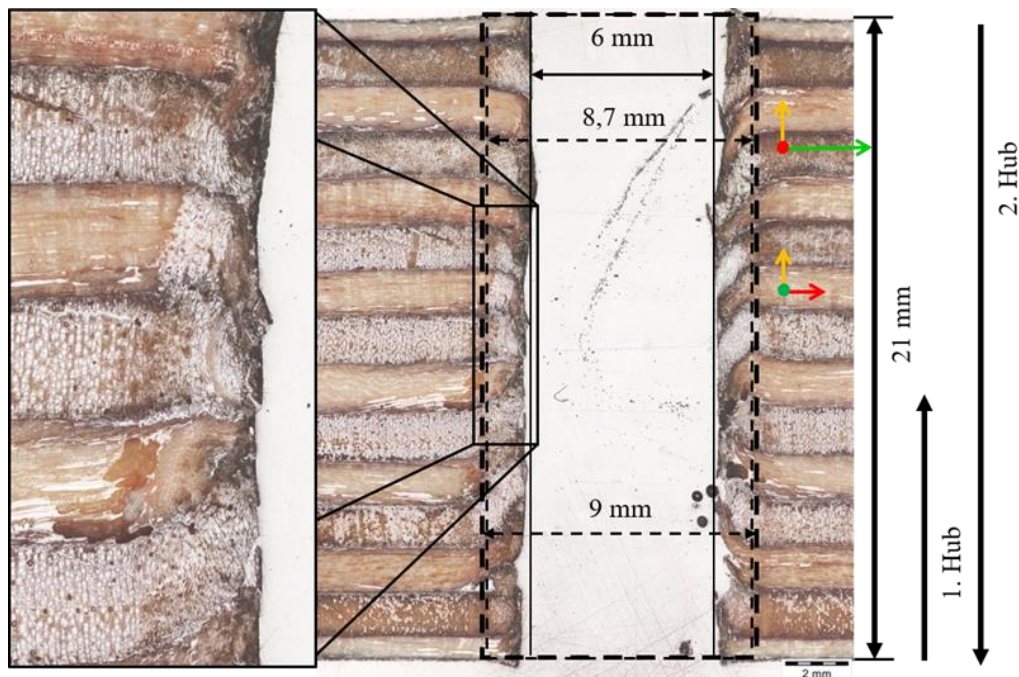


Bild 29: Beidseitiger Dorneintritt eines 6 mm Dorns mit 30° Spitzenwinkel [Pen23]

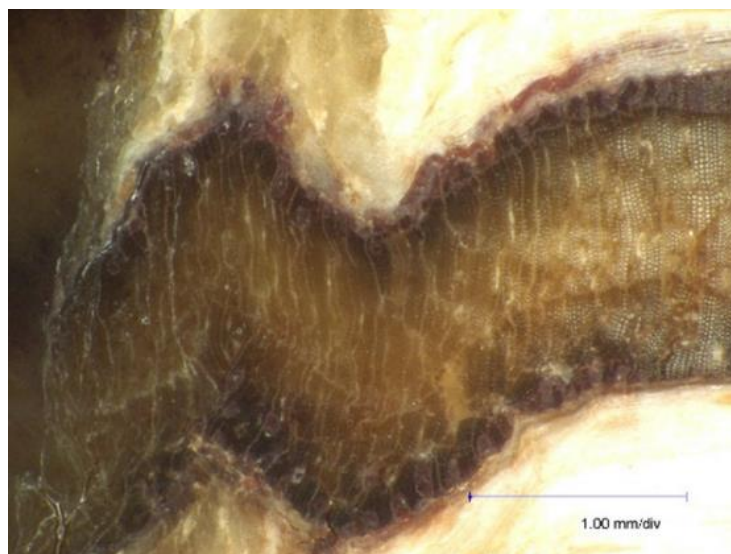


Bild 30: Verformung durch Ausknicken einer Furnierlage

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Bild 31 stellt die Schliffbilder der statischen und dynamischen Durchgangslocherzeugung dar. Dabei zeigt sich, dass die Lochwandung beim dynamisch, zweiseitig erzeugten Fließloch (rechtes Schliffbild) gleichmäßiger ist und der Durchgangslochdurchmesser über die gesamte Tiefe homogener ausfällt. Die thermische Fixierung durch die Temperaturzuführung hat stattgefunden. Zudem lässt sich erkennen, dass das Material beim dynamischen Verfahren überwiegend in Scheibenrichtung verdrängt wurde.



Bild 31: Auflichtmikroskopie fließlochgeformter Durchgangsbohrungen (v.l.n.r. statisch einseitig, statische zweiseitig, dynamisch zweiseitig)

Lochrückformung

Beim Herausfahren des Dorns aus dem Fließloch kommt es aufgrund der rheologischen Eigenschaften zur Rückverformung der Fließlochstelle. Die Höhe der Lochrückverformung wurde für die drei Fließlochformverfahren (statisch, dynamisch-schnell und dynamisch-thermisch) messtechnisch ermittelt und in Bild 32 gegenübergestellt. Der Durchgangslochdurchmesser wurde nach einer Ruhephase von $t = 5$ min an mehreren Stellen gemessen und auf den Dorn Durchmesser bezogen. Die Lochrückformung ist im dynamischen Verfahren (mit Dornrotation) am geringsten und beträgt für das schnelle Verfahren $w = 4,12 \pm 1,09$ % und für das thermische Verfahren $w = 3,82 \pm 0,19$ %. Dies lässt den Schluss zu, dass eine thermische Fixierung stattgefunden hat. Zwischen dem thermischen und schnellen Verfahren besteht kein nennenswerter Unterschied. Inwiefern eine klimatisch bedingte Änderung des Durchmessers auftritt ist in Kapitel 2.5.7 beschrieben.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

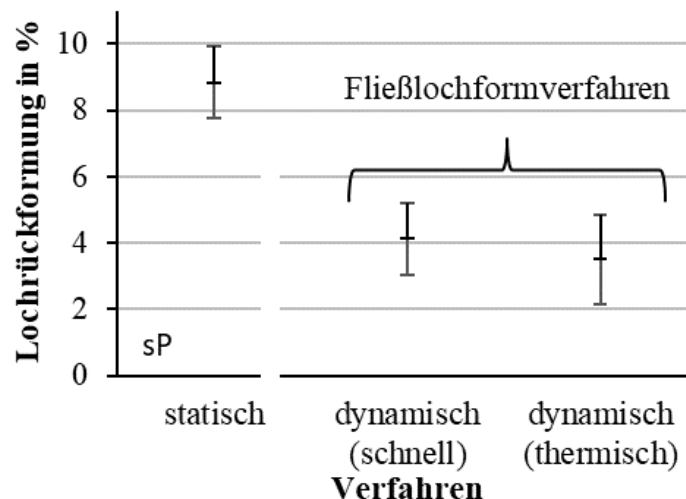


Bild 32: Lochrückverformung der Fließlöcher direkt nach der Herstellung [Pen23, S. 141]

Randabstand zur Werkstoffaußenseite:

In Annäherungsversuchen wurde der minimale Randabstand des Dornes zur Werkstoffaußenseite variiert die Axialkraft gemessen und der Schadensfall beurteilt. Daraus wurde der minimale Randabstand ermittelt, der eingehalten werden muss, um schadensfrei eine Fließlochformung ausformen zu können.

Der Randabstand, gemessen von der Achse des Dorns bis zur beanspruchten Außenkante der Probe, wurde zwischen 7,5 mm und 18 mm für die Dorndurchmesser 6,6 mm und 11 mm variiert. Ab einem Randabstand kleiner gleich 13,5 mm (für den 11 mm Dorn) und 9,8 mm (für den 6 mm Dorn) tritt das Versagen zunächst durch Rissbildung in der Decklage, später durch komplettes Ausbrechen aller Furnierlagen über die Probendicke, auf. Bild 33 veranschaulicht das Versagen der Bohrungen während des Fließlochformens mit abnehmendem Randabstand für den Dorndurchmesser $D_D = 11$ mm. In den kritischen Randabstandsbereichen wurde für eine größere Probekörperanzahl die Axialkraft während des Fließlochformens untersucht. Das Ergebnis in Bild 34 zeigt die Tendenz, dass mit Eintreten des Versagens bei zu geringen Abständen des Fließlochdornes zum Rand die Dornspitzenkraft absinkt. Das Merkmal des Absinkens der Dornspitzenkraft ist bei größeren Dorndurchmessern deutlicher erkennbar. Aus dem Verlauf der Dornspitzenkraft und das Schadensbild werden folgende minimale Randabstände definiert. Diese sind einzuhalten, um ein schadensfreies Fließloch zu formen:

$R = \text{Dorndurchmesser} * 1,77$ (Dorndurchmesser 6,6 mm)

$R = \text{Dorndurchmesser} * 1,32$ (Dorndurchmesser 11 mm)

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

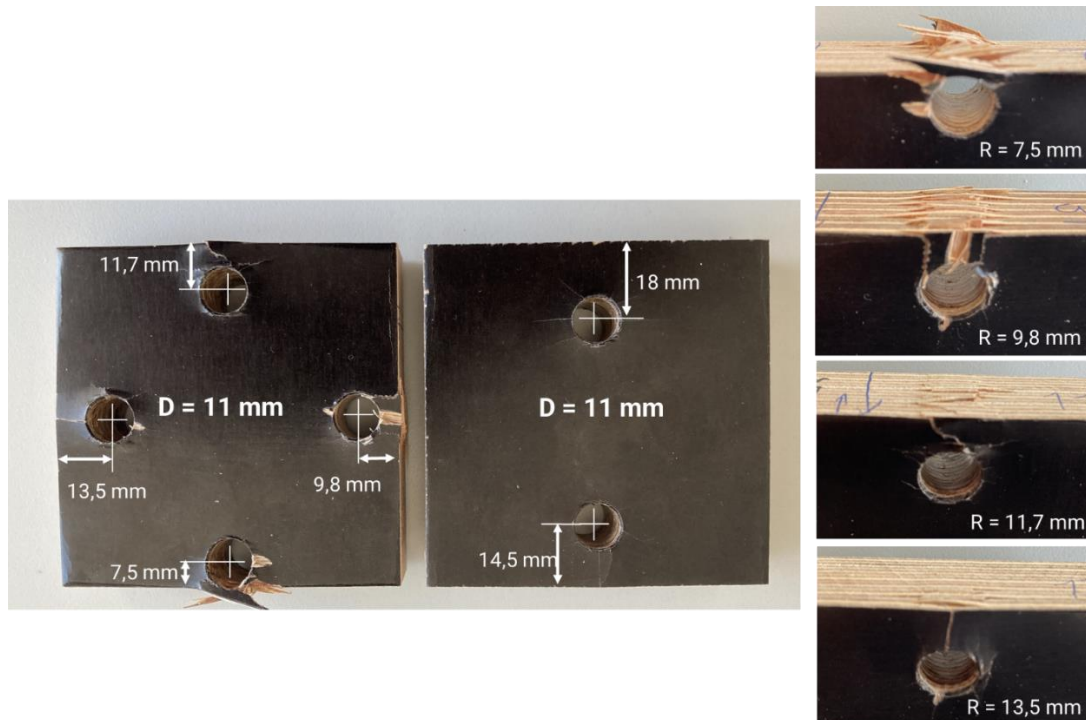


Bild 33: Schadensbild fließlochgeformter Bohrungen in Abhängigkeit des Randabstandes

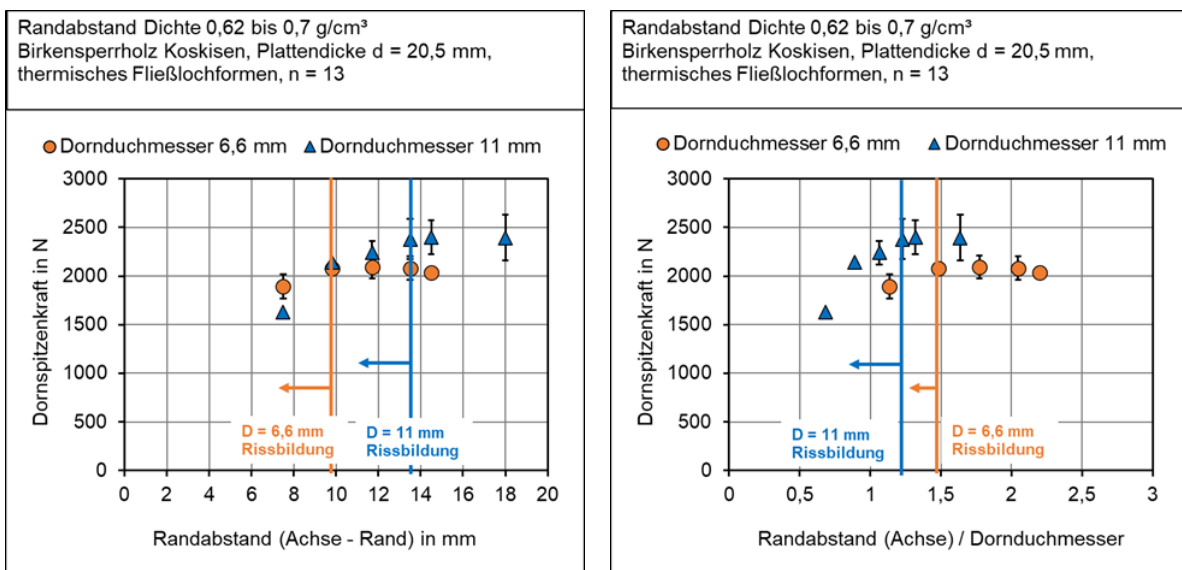


Bild 34: Dornspitzenkraft (=Axialkraft) abhängig vom Randabstand (li) und Dornspitzenkraft abhängig vom Randabstand/Durchmesserverhältnis (re.)

Abstand der Fließlochbohrungen:

Der Abstand von Fließlochbohrungen untereinander ist für Mehrfachschraubverbindungen relevant. Es wird an dem Probekörper der Bezug zu einem praktischen Einsatz dargelegt. Dabei wird ein konstruktiver und an der Praxis angelegnter Ansatz herangezogen. Der gewählte Abstand beträgt etwa das Dreifache des Ziellochdurchmessers von $d_z = 6$ mm für einen Dorndurchmesser von $D_D = 6,6$ mm. Der Abstand beträgt 20 mm zwischen zwei Fließlochbohrungen. Der Abstand entspricht der Verwendung von Unterlegscheiben nach DIN 9012 oder DIN EN ISO 7093 für M6 mit einem Außendurchmesser von $D = 18$ mm. Je

Hochfeste Verbindungsstellen für Holz furnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Probe wurde mittig das erste Fließloch hergestellt. Anschließend wurden vier weitere im gleichbleibenden Abstand zu dem ersten Loch und zum Rand um dieses herum erzeugt (Bild 35).

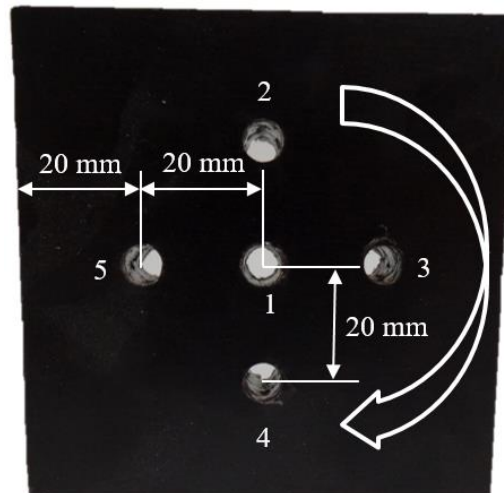


Bild 35: Probekörper mit Fließlochabstände untereinander mit Reihenfolge der Fließlöcher

Die Auswertung ergibt keinen signifikanten Merkmalsunterschied zwischen den ersten mittig fließlochgeformten Durchgangslöchern zu den nachfolgenden vier je Probe (Bild 36).

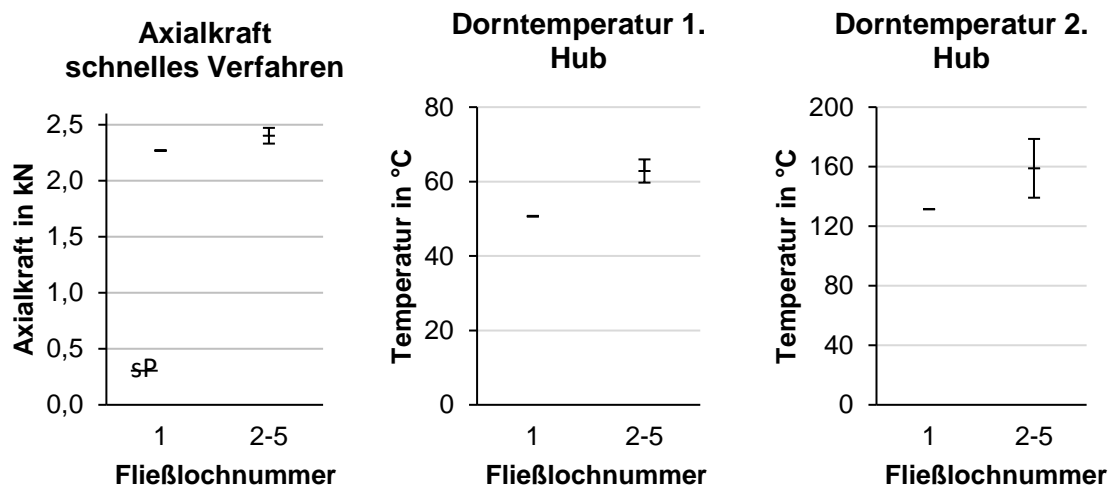


Bild 36: Einfluss eines 20 mm Abstandes bei 6,6 mm Dorndurchmesser

In Bild 37 ist eine aufgetrennte Probe mit drei Durchgangslöchern dargestellt. Die Durchgangslöcher wurden mit dem schnellen Verfahren hergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Bereiche der Einwirkung sich nicht überschneiden. Zwischen den Durchgangslöchern und zum Rand sind deutlich Bereiche im Holzwerkstoff zu erkennen, welche nicht durch das Fließlochverfahren beeinflusst wurden. **Demnach sind mehrere Fließlochbohrungen im relevanten Mindestabstand von 20 mm untereinander ausführbar.**

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

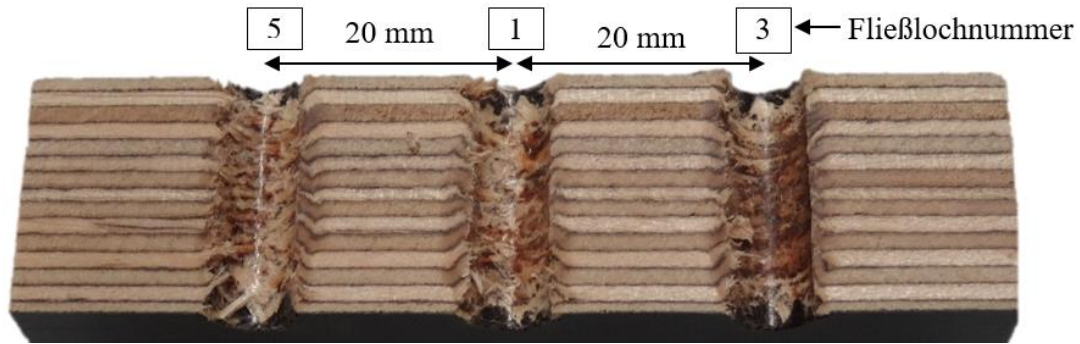


Bild 37: Aufgetrennte Probe mit Fließlochbohrungen im Abstand von 20 mm

Fazit:

Die Prozessparameter sind so zu steuern, dass der thermisch bevorzugte Bereich des Fließlochformens erreicht wird. Dieser ist in Bild 38 gekennzeichnet. Aus der Prozessparameteruntersuchung zeichneten sich zwei vorteilhafte Verfahrensstrategien ab. Das sind das „schnelle“ und das „thermische“ Verfahren. Deren charakteristischen Prozessparameter, Lochrückverformung und strukturelles Aussehen sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Beide Verfahrensstrategien werden für die Untersuchung der Verbindungseigenschaften hinzugezogen.

Die Prozesszeitoptimierung hin zu kurzen Prozesszeiten wurde im Rahmen der Verfahrensentwicklung als Kriterium mit vorgegeben und beim Bau des Fließlochformautomaten berücksichtigt. Entsprechende Maßnahmen waren die Integration neuer Zahnscheiben und -riemen für Drehzahlbereiche bis 300 U/min sowie der Einsatz kürzere Dorne zur Reduzierung der Verfahrswege.

Weitere Maßnahmen um die Prozesszeit zu reduzieren sind kürzere und schnellere Verfahrswege und leistungsstärkere Kühltechnik zum Abkühlen der Dornwerkzeuge. Diese ist durch eine leistungsfähigere Steuerung und Antriebstechnik in einer Komplettanlage auf Industrieniveau zu berücksichtigen.

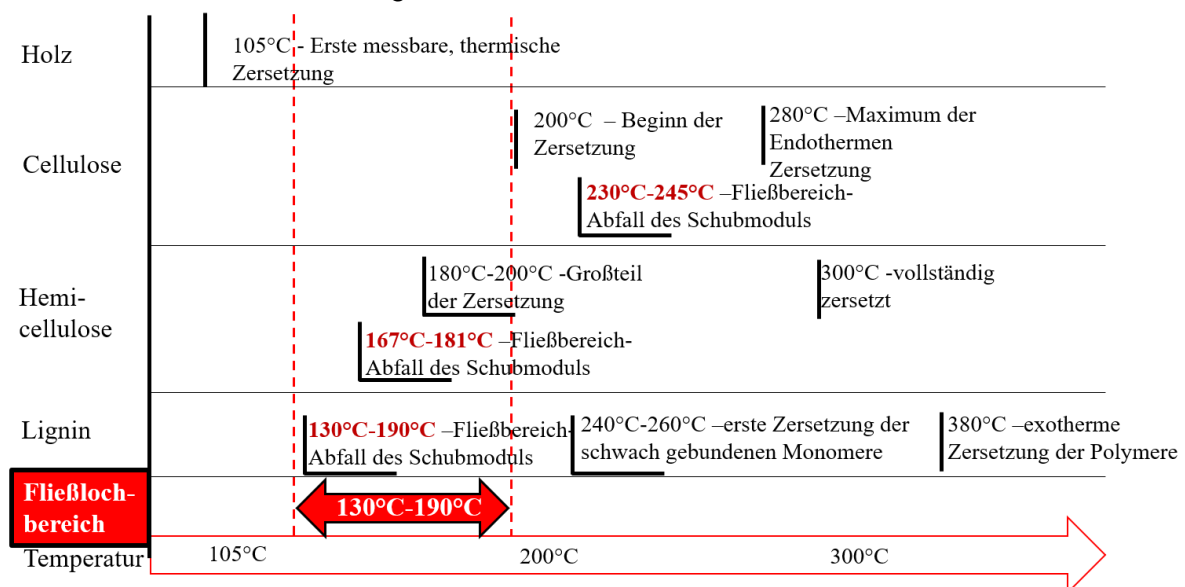




Bild 38: thermisch bevorzugter Bereich des Fließlochformprozesses [Pen23]

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Tabelle 8: Prozessparameter und Lochrückformung zum Fließlochformverfahren

Verfahren	thermisches	Schnelles
Prozessparameter	$n = 180 \text{ 1/min}$ $T = 195 \pm 19 \text{ °C}$ $F = 2086 \pm 304 \text{ N}$	$n = 100 \text{ 1/min}$ $T = 162 \pm 25 \text{ °C}$ $F = 2022 \pm 171 \text{ N}$
Mikroskopisches Aussehen		
Lochrückverformung (Schrumpfung)	$w = 3,82 \pm 0,19 \%$	$w = 4,12 \pm 1,09 \%$
Prozesszeit	$t = 51 \text{ s}$	$t = 48 \text{ s}$

2.4.2 Axiale Verdichtung

Das Ergebnis der axialen Verdichtung wird im Wesentlichen von den Prozess- und Werkstoffparametern

- Stempelheiztemperatur
- Presstiefe
- Pressgeschwindigkeit
- Werkstoffdichte und herstellerbedingte Werkstoffqualität
- Abkühlung
- Randabstand des Kegels zur Außenseite und untereinander,

bestimmt.

Diese Parameter wurden systematisch untersucht und hinsichtlich der resultierenden Eigenschaftsmerkmale

- resultierende Presskraft ↓
- Rissbildung in Decklage ↓
- Delamination und Abscherung der Furnierlagen ↓
- Ausbeulung an Plattenunterseite ↓
- Verkohlungserscheinungen ↓

beurteilt.

Temperier-Konzept und Vorkonditionierung des Werkstoffes

In Vorversuchen wurde das Temperier-Konzept unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen erstellt. Hierfür wurden Testversuche mit unbeheiztem Stempel und thermisch sowie dampf-plastifizierten Werkstoffproben durchgeführt. Das Ziel dieser Vortests bestand darin, dass der unbeheizte Stempel den umgeformten plastifizierten Werkstoffproben bereits im Pressvorgang die Wärme entzieht um kurze Haltezeiten zu realisieren. Dies führte zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen, da mit der Entlastung der Probe eine sofortige Rückverformung eintrat und keine Fixierung stattgefunden hat. Die visuellen Testergebnisse fassen Bild 39 für die vorkonditionierten Proben zusammen. Das bedeutete für den weiteren Versuchsablauf, dass der Presstempel stets zu beheizen ist.

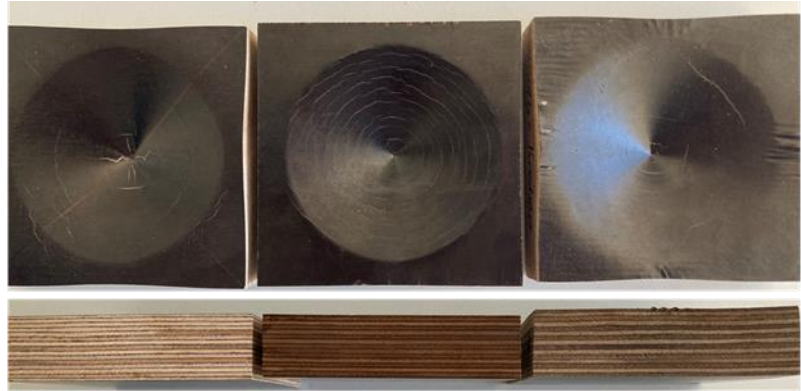


Vorkonditionierung	90°C, 90% rel. LF	200°C (Umluftofen) 1h	Kochprobe 30 min
Materialfeuchte	20%	Darrtrocken	25%
Presskraft bei 12 mm Tiefe	39,3 kN	54,7 kN	35,4 kN

Bild 39 : Pressversuche zum Temperierkonzept „kalter Stempel- warm (plastifizierte) Werkstoffprobe“

Dem gegenübergestellt zeigt Bild 40 für das Temperier-Konzept mit beheiztem Stempel das Pressergebnis mit unterschiedlich vorkonditioniertem Probenmaterial. Mit den thermisch (auf 200°C erwärmte Probe) und dampf-plastifizierten (Kochprobe) Werkstoffproben konnte zwar bei ausreichender Verdichtung eine deutliche Reduzierung der Presskraft auf 15 kN erreicht werden, jedoch ist es aufgrund des Spring-Back Effektes des Sperrholzes für die potentielle Verfahrensführung nicht sinnvoll. Zusätzlich muss das zuvor in die Probe eingebrachte Wasser für die weitere Bearbeitung und Anwendung energieintensiv ausgeleitet werden. Aus diesem Grund werden jegliche Probenmaterialien bei **Raumklima bis Holznormklima** konditioniert. **Die Dampf-Plastifizierung entfällt. Die Reduzierung der Presskraft muss ausschließlich über die Stempelheiztemperatur erfolgen.**

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)



Vorkonditionierung	20°C, 65% rel. LF	200°C (Umluftofen) 1h	Kochprobe 60 min
Materialfeuchte	8%	Darrtrocken	29%
Presskraft bei 12 mm Tiefe	26,5 kN	34,9 kN	15,8 kN

Bild 40: Pressversuche mit Heizstempel und unterschiedlich vorkonditionierten Werkstoffproben

Stempelheiztemperatur T_H

Die Prozessgröße der Stempelheiztemperatur wurde in dem maximalen Temperaturfeld von $T = 175^\circ\text{C}$ bis bewusst über den Zersetzungspunkt hinaus von 300°C variiert und das Verdichtungsergebnis hinsichtlich der Merkmale

- Minimale Presskraft
- Verkohlungs/Verbrennung im Querschnitt
- Verkohlungs der Decklage
- Einreißen der Decklage
- Rückverformung des Verdichtungskegels nach 24 h

bewertet.

Neben handelsüblichen phenolharzbeschichtetem Birkensterrholz wurden Probenchargen ohne Deckschicht verwendet. Hierfür wurde die Beschichtung spanend entfernt.

Die Verdichtungsversuche wurden so realisiert, dass ausgehend von der gemessenen Ausgangsdichte und der Plattenstärke des Werkstoffes die Presstiefe des Presswerkzeuges mit der Zielgröße der maximalen Verdichtung auf die Reindichte des Sterrholzes von $\rho_R = 1,5 \text{ g/cm}^3$ berechnet wurde. Damit liegen den Versuchen in Abhängigkeit der Ausgangsdichte und Plattenstärken unterschiedliche Presstiefen zugrunde. Die Schwankungen innerhalb der Presstiefe sind direkt auf die Dichte- und Dickenschwankungen des Materials zurückzuführen, welche hersteller- und chargenbedingt gegeben ist.

Folgende Verfahrensparameter wurden für die Verdichtungsversuche eingestellt:

- Pressgeschwindigkeit 1 mm/min
- Stempelheiztemperatur zwischen $T = 175^\circ\text{C}$ bis 300°C
- Abkühldauer unter Last 15 bis 20 Minuten ohne Druckluftkühlung (um Abkühltemperatur von unter 90°C zu erreichen)
- Vorkonditionierung Probenmaterial $20^\circ\text{C} / 65\%$ rel. LF

Die Ergebnisse in Bild 41 zur ermittelten Presskraft während des Verdichtens und der Rückverformung des Verdichtungskegels nach 24h zeigen das Absinken der Kennwerte mit zunehmender Stempelheiztemperatur an. Das ist mit dem Plastifizierungsvorgang der

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Holzbestandteile und dem Abfall der mechanischen Kennwerte unter Einwirkung steigender Temperatur zu begründen. Die geringere Rückverformung des Verdichtungskegels bei steigenden Temperaturen, lässt die thermische Fixierung vermuten. Mit einem weiteren Temperaturanstieg auf $T = 300\text{ °C}$ wird das Holzgefüge derart geschädigt, dass sich der Stempel einbrennt und damit teils negative Rückverformungswerte erreicht wurden.

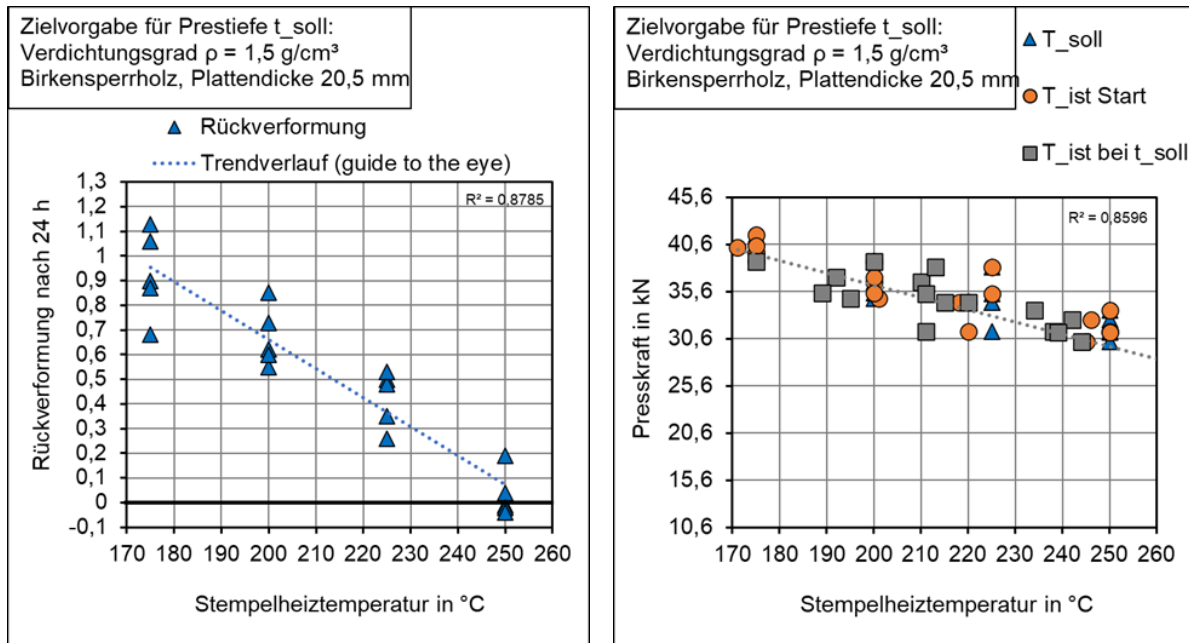


Bild 41: Rückverformung und Presskraft in Abhängigkeit der Stempelheiztemperatur

Dem gegenübergestellt ist an den beschichteten Proben in Bild 42 zu erkennen, dass bei zu geringen Stempelheiztemperaturen die obere Decklage sowohl in radialer als auch axialer Richtung stärker einreißt. Die Querschnittsaufnahme zeigen zudem, dass die Kegelform ab Stempelheiztemperaturen von ca. $T = 225\text{ °C}$ als gerade Kante ersichtlich ist. Bei geringeren Stempelheiztemperaturen zeigen die Verdichtungsformen hingegen eine konvexe Rundung. Dies lässt auf eine unzureichende Formstabilität schließen. Auf Basis der makroskopischen Bewertung und Presskraftbewertung ergibt sich daraus das **vorteilhafte Temperaturfeld von 220 °C bis 250 °C**.

Ob der Prozess mit 220 °C oder 250 °C geführt ist, ist neben den Kundenanforderungen noch von der Pressgeschwindigkeit abhängig. Beide Prozessgrößen bestimmen in deren Kombination den Wärmeeintrag. Höhere Temperaturen lassen höhere Pressgeschwindigkeiten respektive kürzere Presszeiten zu.

Bei einer Stempelheiztemperatur von $T = 250\text{ °C}$ stehen die positiven Merkmale aus größerer Formstabilität des Verdichtungskegels und geringer Presskraft der thermischen Schädigung der ersten zwei oberen Furnierlagen und deutlichen Emissionsentwicklungen entgegen.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

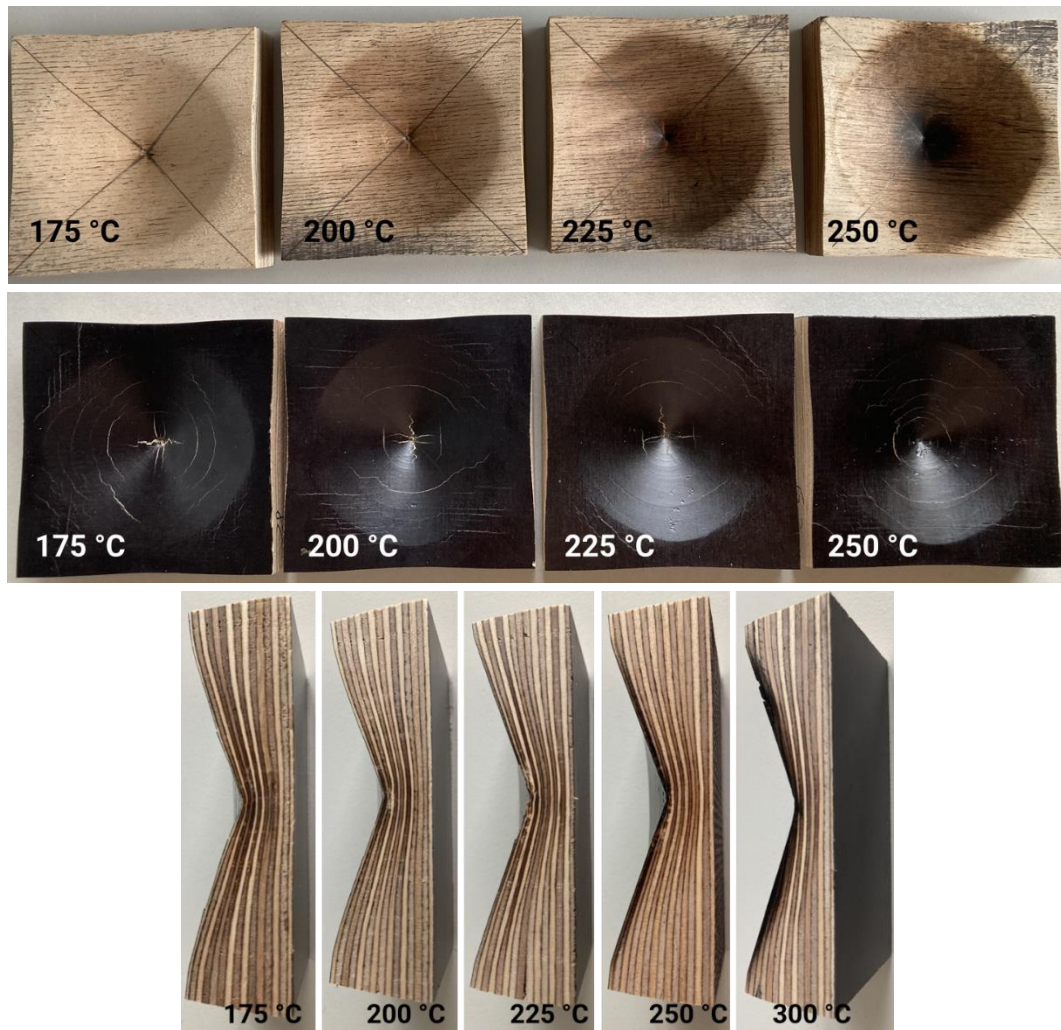


Bild 42: axial verdichtete Proben in Abhängigkeit der Stempelheiztemperatur Draufsicht ohne Decklage (oben) Draufsicht mit Decklage (mittig) Querschnitt (unten)

Presstiefe t

Die Variation der Presstiefe t verfolgt das Ziel, den Grenzbereich der Verdichtung und den Einfluss auf die tatsächliche Presskraft bzw. mit Rückrechnung der tatsächlichen Pressfläche den Pressdruck abzubilden.

Die Presstiefe wurde ausgehend von der Presstiefe bei einer maximalen Verdichtung von $1,5 \text{ g/cm}^3$ um $0,5 \text{ mm}$ sowie 1 mm unterhalb und 1 mm oberhalb variiert. Bild 43 stellt die Presskräfte und die mit der Mantelfläche berechneten Pressdrücke dar.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

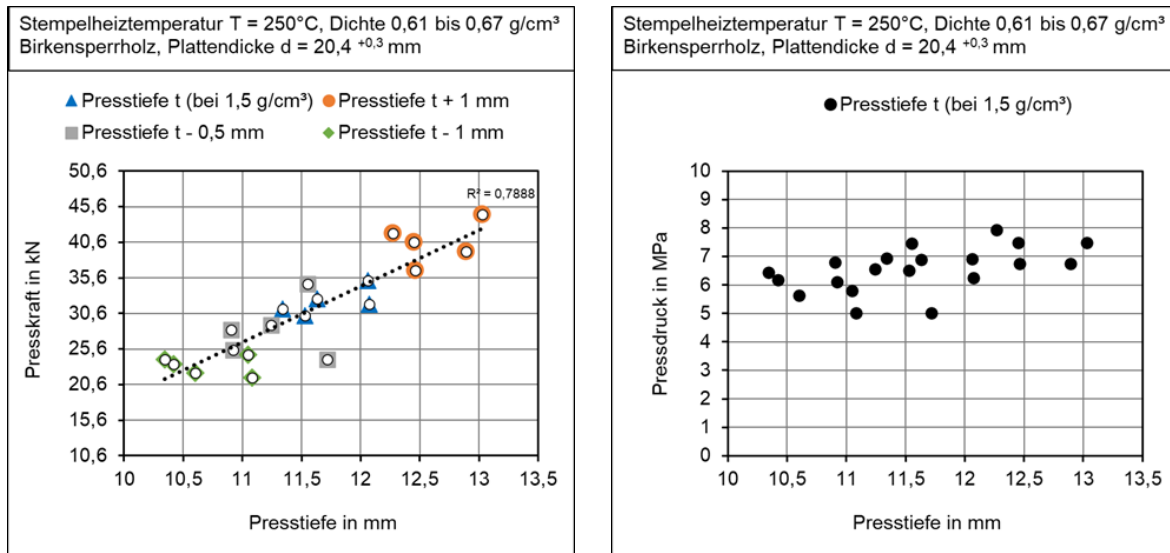


Bild 43: Presskraft und Pressdruck in Abhängigkeit der Presstiefe

Schwankungen innerhalb der Kennwerte ergeben sich durch chargenbedingte Materialschwankungen und Schwankungen der Stempelheiztemperatur. Die Schwankung lag bei etwa 10 °C. Eine Steigerung der Presstiefe um 1 mm oberhalb der Presstiefe bei maximaler Verdichtung von 1,5 g/cm³ führt zu einem deutlichen Ausbeulen auf der Gegenseite der Probe. Um diesen Verzug zu vermeiden sollte die maximale **Presstiefe bei der maximalen Verdichtung von 1,5 g/cm³ eingehalten werden**. Größere Werte führen lediglich zum Bauteilverzug und unnötig hohen Presskräften. Die Auflichtmikroskopieaufnahme in Bild 44 zeigt den Querschnitt einer axial verdichteten Probe auf eine rechnerische Maximalverdichtung von 1,5 g/cm³. Daraus wird ersichtlich, dass bereits mikroskopische Schäden in Form von Furnierrissen, Querlagenverschiebungen und Schubrisen innerhalb der Furnierlagen eingetreten sind, sodass eine weitere Verdichtung von der ausgehenden Bearbeitungsseite nicht ohne weitere Strukturschäden möglich ist. Die auf der Gegenseite liegenden Furnierlagen können nur durch die beidseitige Bearbeitung verdichtet werden.



Bild 44: Strukturschäden einer bis auf 1,5 g/cm³ verdichtete Probe

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

herstellereingebundene Werkstoffqualität

Bild 45 stellt den Herstellereinfluss beider Werkstofflieferanten A und B auf den resultierenden Pressdruck gegenüber. Es werden bezogen auf die Zielpresstiefe bei einer Dichte von 1,5 g/cm³ nahezu gleiche Pressdrücke erreicht. Normiert auf die Dichte der Probekörper liegt kein Unterschied vor. Das lässt den Schluss zu, dass der Werkstoffunterschied lediglich in der zugrunde gelegten Ausgangsdichte besteht. Auf diesen Werkstoffparameter wird der Prozess stets angepasst, sodass es kein Problem darstellt.

Im strukturellen Verdichtungsergebnis konnten lediglich Unterschiede in der Oberflächenqualität des Werkstoffes von Hersteller B festgestellt werden, die eine schlechtere Verleimung der Furnierlagen vermuten lassen Bild 46.

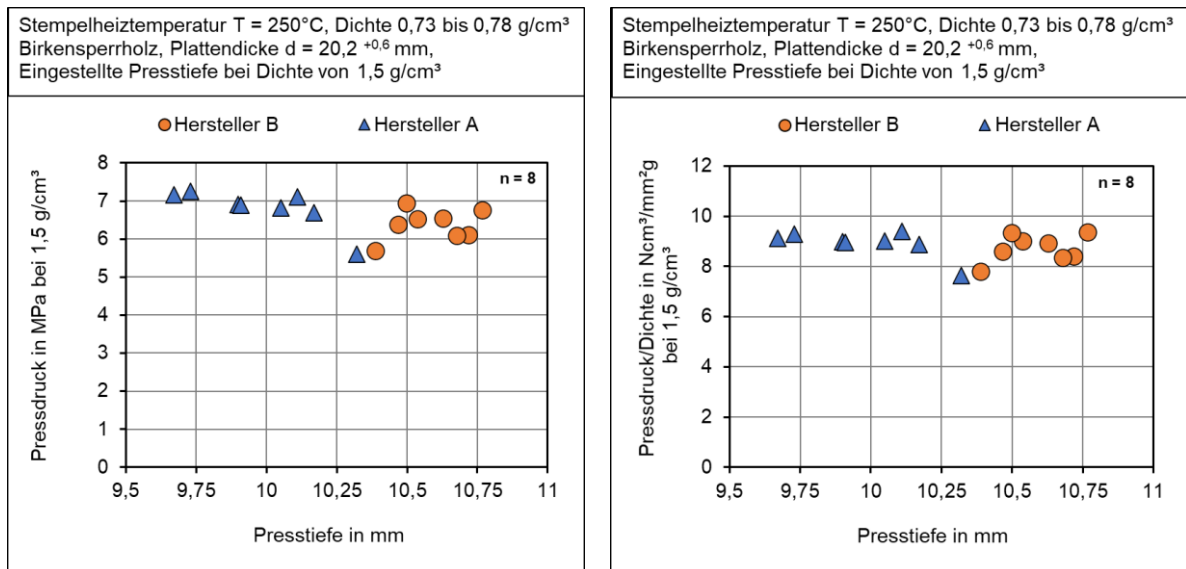


Bild 45: Pressdruck und dichtenormierter Pressdruck für zwei Werkstofflieferanten



Bild 46: Oberflächenqualität axial verdichteter Proben zwei verschiedener Hersteller phenolharzbeschichtetem Birkensperrholzes (WVC-BSH)

Pressgeschwindigkeit

Für eine wirtschaftliche Prozessführung sind hohe Pressgeschwindigkeiten von Vorteil. Für den viskoelastischen und porösen Werkstoff kann das jedoch strukturelle Probleme verursachen. Aus diesem Grund wurde der Verfahrensparameter in einem breiten Geschwindigkeitsbereich von sehr langsam $v = 1$ mm/min bis sehr schnell $v = 60$ mm/min variiert und hinsichtlich der resultierenden Eigenschaften maximale Presskraft und Rückverformung der hergestellten Verdichtung nach 24 h beurteilt.

Die Kurvenverläufe und die Pressdrücke bei Solltiefe und am Versuchsende in Bild 47 zeigen das mit zunehmender Geschwindigkeit ein steiferes Werkstoffverhalten auf, welches zu höheren Presskräften führt. Die Rückverformung ist bei der geringsten Geschwindigkeit unter Temperatureinwirkung am geringsten. Dies schließt auf die thermische Fixierung während des Pressvorganges.

Die geringe Pressgeschwindigkeit von $v = 1$ mm/min ist unter Heitztemperatureinwirkung für ein optimales Verdichtungsergebnis und geringen Presskräften zu bevorzugen.

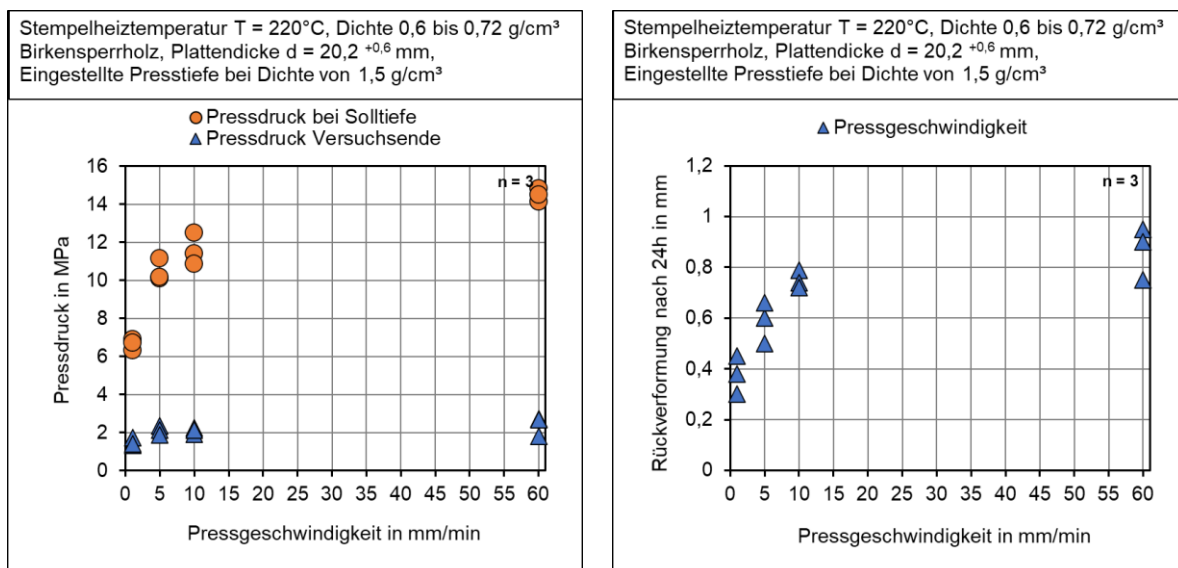


Bild 47: Pressdruck und Rückverformung des Verdichtungsgebietes in Abhängigkeit variiert Pressgeschwindigkeiten

Randabstand Presskegel zur Werkstückaußenseite

Der Randabstand zur Werkstückaußenseite wurde durch die Variation des Probenquerschnittes von 80 x 80 mm bis 140 x 140 mm variiert. Die Herstellung der axialen Verdichtung erfolgte bis zum maximal möglichen Verdichtungsgrad von 1,5 g/cm^3 mit einer Stempelheiztemperatur von $T = 220^{\circ}\text{C}$. Der Verdichtungskegel wurde stets zentrisch aufgesetzt, sodass beidseitig der gleiche Randabstand zwischen Kegeldurchmesser und Werkstückaußenseite zugrunde lag. Bei geringen Randabständen (Probenlänge $L = 80$ mm in Bild 48) zeigte sich eine Furnierverformung als Querschub auf der Deckseite durch eine seitliche Einschnürung in der Draufsicht. Im Schnittquerschnitt in Bild 48 A-A ist diese Einschnürung als Maßabweichung zwischen Probenlänge an der Unterseite (L_{unten}) und der Probenlänge an der Oberseite (L_{oben}) als Differenz messbar. Die Werte sind in Abhängigkeit

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

des Randabstandes im Diagramm in Bild 49 eingetragen. Mit einem Abstand von 75 mm liegt die Größe der Einschnürung mit 0,2 mm im zulässigen Toleranzbereich für Holzwerkstoffe im Maschinenbau. Sofern die Einschnürung eine technische Relevanz in der Baugruppe (z.B. geschlossene Kanten) darstellt, muss der Randabstand unter Verwendung des beschriebenen Presskegels mindestens 75 mm betragen. Anderenfalls kann die Einschnürung vernachlässigt werden, da sich diese Einschnürung in größeren Halbzeugen (siehe Bild 50) egalisiert.

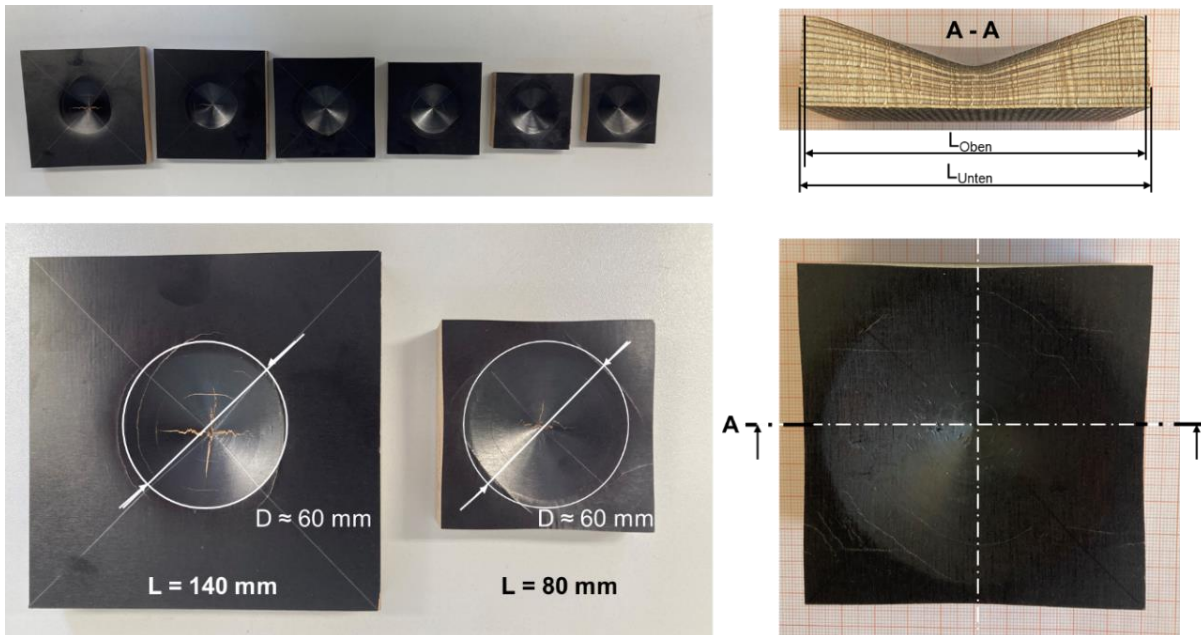


Bild 48: axiale Verdichtung in Abhängigkeit des Randabstandes (links) und Messung der Einschnürung der Deckseite (rechts)

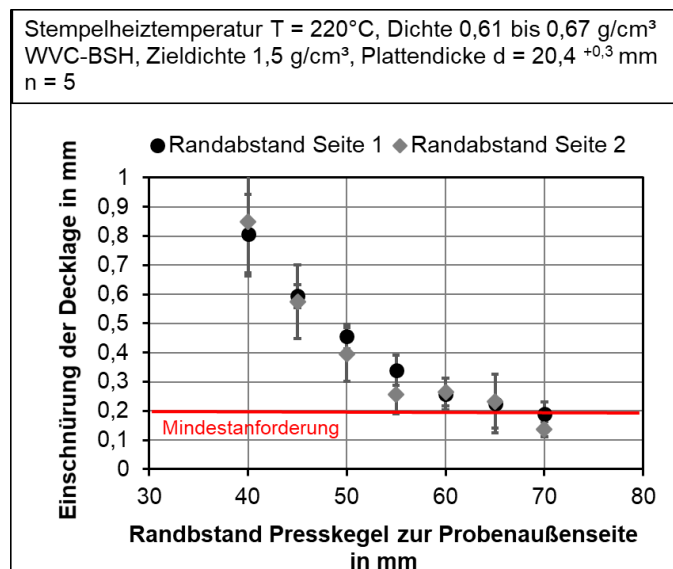


Bild 49: Einschnürung der Decklage in Abhängigkeit des Randabstandes

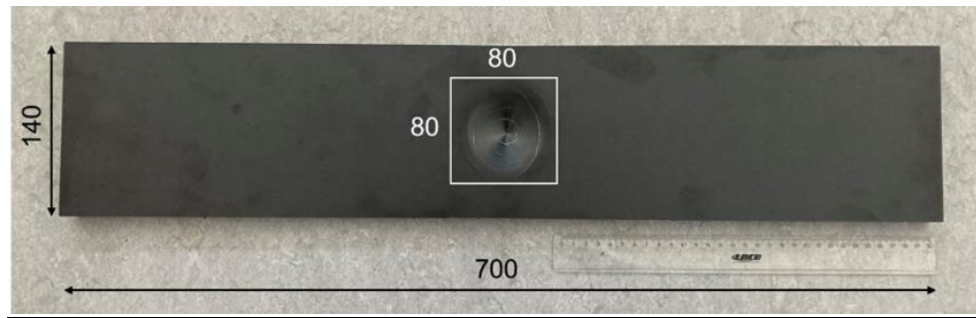


Bild 50: axiale Verdichtung im Plattenhalbzeug mit größeren Abmaßen

Temperierung in der Relaxationsphase

In dieser Versuchsreihe wurde der Effekt der Kühlung bzw. Weitertemperierung und deren Haltezeit in der Relaxationsphase auf den Presskraftabfall und die Rückverformung der axial verdichteten Probekörper untersucht. Der Temperaturbereich lag unter Berücksichtigung der Schwankungen zwischen $T = 216\text{ °C}$ und 225 °C . Die Pressgeschwindigkeit wurde einheitlich auf $v = 1\text{ mm/min}$ bis zum Erreichen der maximalen Presstiefe bei einer Dichte von $1,5\text{ g/cm}^3$ festgelegt. Damit dauerte die Pressphase je nach Presstiefe und Ausgangsdichte 10 bis 11,9 Minuten. Aus der Literatur ist bekannt, dass Lignin, als natürliches im Holz vorkommendes Polymer, in seinem Kristallisationsverhalten duroplastische Verhalten aufzeigt [Guo20, May21]. Das führt zu der Überlegung den gepressten verdichteten Bereich in der Haltephase/ Relaxationsphase unter weitere Temperaturzuführung thermisch zu fixieren. Demgegenüber gestellt wurden Pressversuche in denen mit Erreichen der maximalen Presstiefe die Verdichtungsstelle in der Relaxationsphase gekühlt worden sind.

Für beide Verfahrensführungen ist der Presskraftverlauf über die Zeit in Bild 51 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass unabhängig von der Temperatur die Presskraft in beiden Situationen abfällt. Jedoch für die Probe unter bestehender Temperierung weniger stark relaxiert. Innerhalb der Haltezeit von 8 min relaxierten die gekühlten Proben um 72% die beheizten Proben hingegen nur um 51%. Die potentielle Verfahrensführung verlangt einen starken schnellen Abfall der Presskraft. Die Ergebnisse zeigen, dass dies unter externer Kühlung möglich ist. Darauf aufbauend wurde unter Variation der Haltezeit zwischen 1 und 20 Minuten der Pressdruck nach Verfahrensende und die Rückverformung der verdichteten Proben nach 24 h gemessen. Das Ergebnis ist als Differenz zwischen der Decklage und der eingedrückten Kegelspitze ist in Bild 52 dargestellt. Es zeigt sich, dass die aktive Kühlung in der Relaxationsphase sowohl zu einer geringeren Rückverformung als auch zu einem geringeren Pressdruck am Prozessende führt. **Aus diesem Grund ist der Kühlvorgang in der weiteren Verfahrensentwicklung und Maschinenauslegung notwendig.** Ab einer Haltezeit von 6 Minuten unter Druckluftkühlung ($T = 60\text{ °C}$) wird keine kleinere Rückverformung mehr erreicht, **wodurch die Haltezeit auf 6 Minuten verkürzt werden kann.**

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

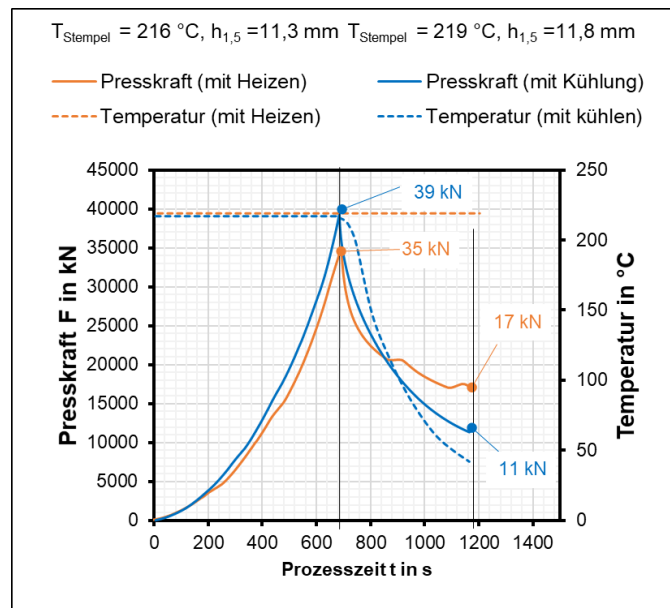


Bild 51: Presskraft- und Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Temperierung

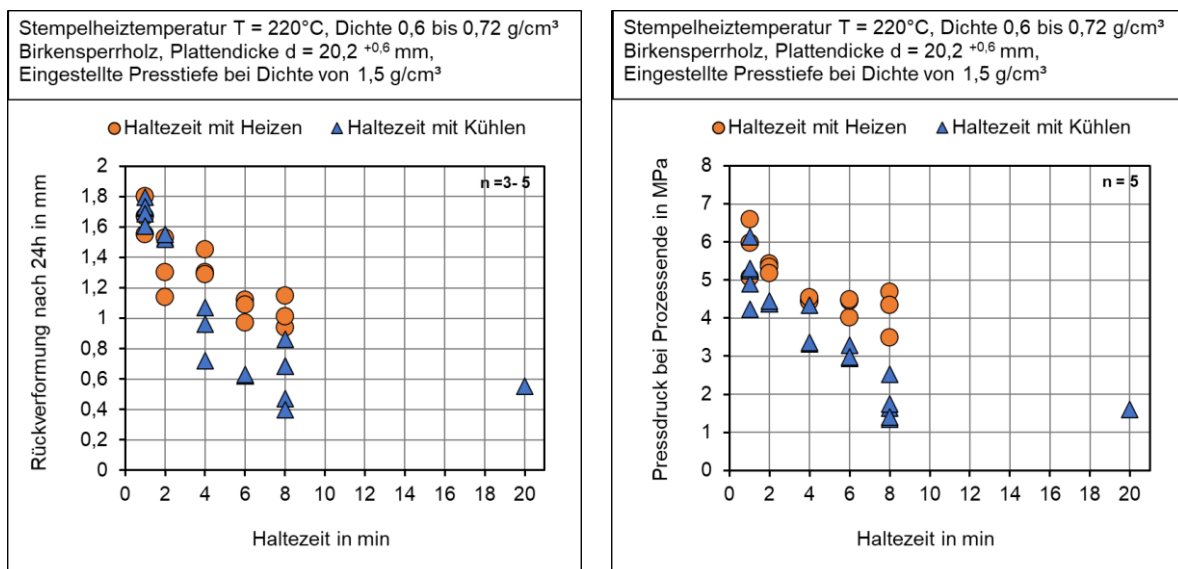


Bild 52: Relaxationsphase (Haltephase) unter Heizen und Kühlen und variiertes Haltezeit

2.5 Eigenschaften der hochfesten Verbindungsstellen (AP4)

Für die Analyse der mechanischen Verbindungseigenschaften wurden axial, radial, und axial-radiale Werkstoffproben hergestellt, zur jeweiligen Schraubverbindung zusammengefügt und hinsichtlich ihrer relevanten Verbindungseigenschaften untersucht. Die Übersicht der hergestellten Verbindungen und deren Testaufbau liefert Bild 7 in Kapitel 2.1.2. Die Untersuchung der Maßhaltigkeit erfolgte ausschließlich an den Werkstoffproben, welche parallel zu den hergestellten Verbindungsstellen gemessen worden.

2.5.1 Maßhaltigkeit der Verbindungsstelle

Es wurden sowohl radial verdichtete als auch axial verdichtete Verbindungsstellen hinsichtlich ihrer Formabweichung gegenüber des Verdichtungswerkzeuges gemessen. Bild 53 stellt die taktile Messung (mittels Koordinatenmessgerät Micura Zeiss, Professur Fertigungsmesstechnik TU Chemnitz) eines fließlochgeformten Durchgangsloches über die gesamte Lochtiefe dar. Die Bohrung ist über gemessene Mantellinien und Kreisquerschnitte nachgebildet. Der verwendete Fließlochdorn hatte einen Durchmesser von 6,6 mm. Es ist ersichtlich, dass die fließlochgeformte Bohrung über die Bohrtiefe deutliche Inhomogenitäten und grobe Formabweichungen, sowohl in der Tiefe als auch am Umfang aufweist. Der maximale ermittelte Innenkreisdurchmesser beträgt $d = 6,091$ mm, was eine Differenz von $\Delta d = 0,5094$ mm zum verwendeten Dorndurchmesser ergibt. Die größte Abweichung über die Bohrungstiefe zwischen dem kleinsten und größten Messwert beträgt 0,2559 mm.

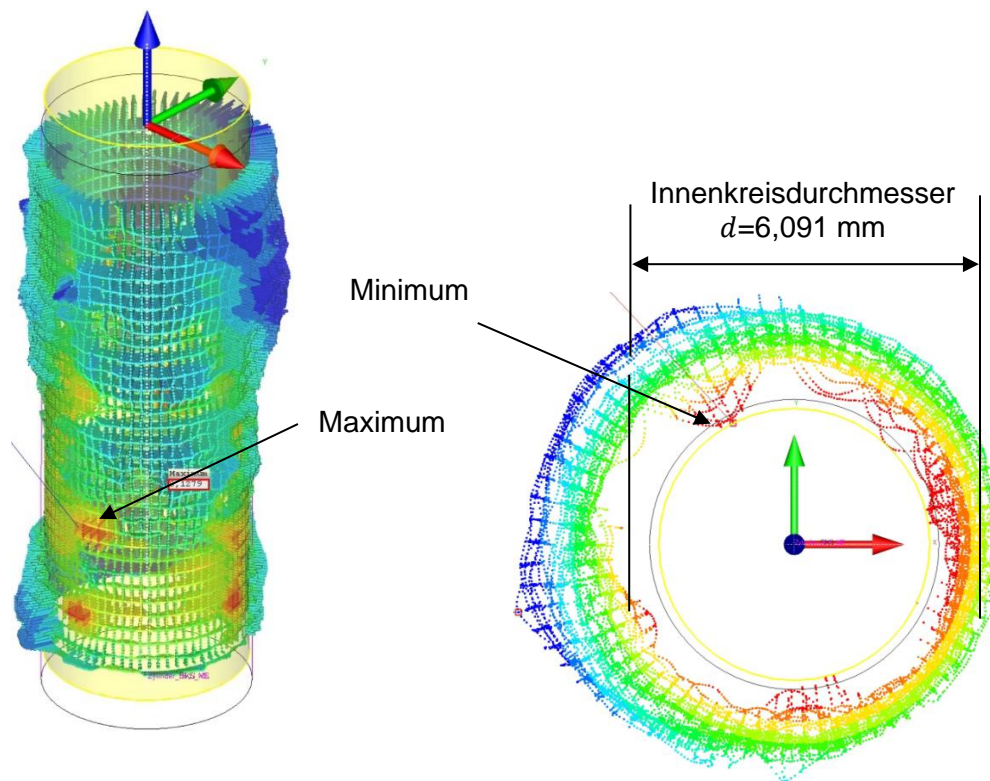


Bild 53: taktile Messung der fließlochgeformten Bohrung über die Lochtiefe

Zur Vergleichbarkeit erfolgte die Messung deshalb nur am Eingang der Bohrung. Bild 54 stellt den optisch gemessenen Durchmesser am Bohrungseingang einer fließlochgeformten und einer konventionell gebohrten Bohrung gegenüber. Die Formabweichung der fließlochgeformten Bohrung ist deutlich zu erkennen. Das zieht Messungenauigkeiten und eine schlechte Reproduzierbarkeit nach sich.

Das lässt den Schluss zu, dass ausgehend vom runden Fließlochdorn eine werkstoffbedingte Rückverformung eingetreten ist. Diese Rückverformung wurde bei jedem hergestellten Fließloch nach 5 Minuten mittels Messschieber an je drei Stellen ermittelt. Die prozentuale Lochschrumpfung beträgt im Mittel 3,8 % bis 4,12 %.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

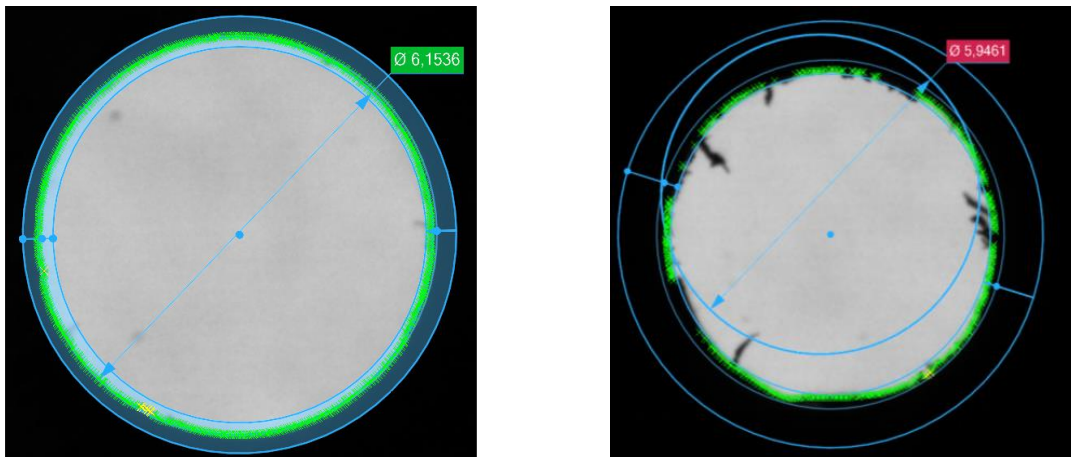


Bild 54: Bohrungsdurchmesser einer gebohrten Probe (links) und einer fließlochgeformten Probe (rechts), Messsystem Zeiss O-Selekt, Professur Fertigungsmesstechnik der TU Chemnitz

Für die axiale Verdichtung erfolgte die Messung des Kegelwinkels am Werkzeug und an 9 verschiedenen axialen Verdichtungsproben zusätzlich zu der Eindringtiefe des Kegels. Die Eindringtiefe des Kegels wurde als Qualitätskriterium der Verdichtung hinzugezogen und ist als Rückverformung in den jeweiligen Parameterstudien zur axialen Verdichtung in Kapitel 2.4.2 aufgeführt.

Bild 55 stellt exemplarisch die Messung der Kegelvertiefung der Verdichtungsproben dar. Hierfür wurden drei Schnittebenen in den Kegel eingefügt und an diesen der Winkel als Geraden in einer Ebene zueinander gemessen.

Am Verdichtungswerkzeug wurde ein Kegelwinkel von $139,9^\circ$ gemessen. Die Verdichtungsproben besaßen im Mittel einen Kegelwinkel von $142,2^\circ$. Darüber hinaus zeigte sich bei einem schlechten Verdichtungsergebnis ein konvexer Linienverlauf der Kegelgeraden in Bild 55 rechts.

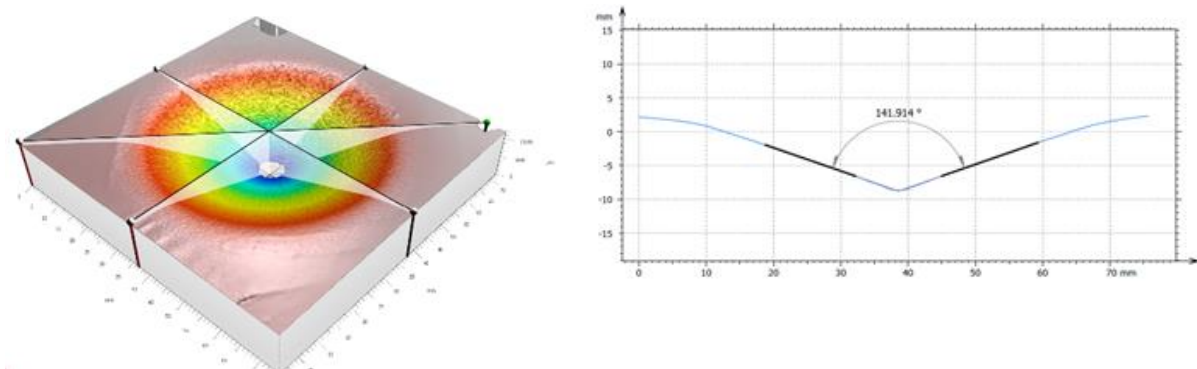


Bild 55: Messung des Winkels der Kegelvertiefung, Messsystem Zeiss (GOM) Atos, Professur Fertigungsmesstechnik TU Chemnitz

2.5.2 Maximal übertragbare Vorspannkraft und Überdrehmoment

Die Vorspannkraft bestimmt in vorgespannten Schraubverbindungen die Klemmkraft in der Trennfuge der Bauteile und bestimmt die Höhe der Kraftübertragung senkrecht und parallel zur Stiftachse. Wo hingegen die auf Scherung beanspruchten Schraubverbindung einen höheren Stellenwert einnehmen. In diesem Lastfall wirkt die Vorspannkraft unter Berücksichtigung des Reibwertes dem Klaffen und Verschieben der Bauteile entgegen. Die Maximal übertragbare Vorspannung und das Drehmoment wurde für ausgewählte Verbindungsarten im Drehmoment-Vorspannkraftversuch in Anlehnung an DIN EN ISO 16047 [DIN16047] ermittelt.

Es wurde für die Durchsteckschraubverbindungen als auch den Einschraubverbindungen mit Holzschraube der Überdrehversuch mit Kopfreibung durchgeführt um die maximal übertragbare Vorspannkraft und das Überdrehmoment in Abhängigkeit der verdichteten Verbindungsstelle zu ermitteln. Während des Montageversuches kann unter Verwendung einer servomotorischen Schraubspindel (Bosch/Rexroth BG 3) unter definierten Einschraubbedingungen die Vorspannkraft und das Überdrehmoment bis zum Versagen der Verbindung gemessen werden. Aus messtechnischen Gründen musste sich auf die Schraubennenngröße $d = 6 \text{ mm}$ beschränkt werden.

Aus den Ergebnissen in Bild 56 ist für die Holzschraubverbindung zu erkennen, dass die konventionell spanend hergestellten Einschraubstellen höhere Überdrehmomente und Vorspannkraft übertragen als die radial verdichteten Einschraubstellen. Die Ursache der geringere übertragbaren Vorspannkraft in fließlochgeformten Bohrungen ist auf die während des Fließlochformens ausknickenden Furnierlagen in der Einschraubstelle zu begründen. Fließlochgeformte Einschraubstellen sind für auf Zug beanspruchte Schraubstellen nicht vorteilhaft. Die Verbindungen versagen alle durch Schraubenauszug aus dem Grundmaterial. Der gleiche Sachverhalt ist auch für die kombinierten axial-radial verdichteten Einschraubstellen zu verzeichnen. Die kombiniert verdichtete Einschraubstelle ist derart geschädigt, dass die maximal übertragbaren Vorspannkraft sogar im unteren Bereich der radial verdichteten Einschraubstellen (fließlochgeformten) liegen.

Axial verdichtete Einschraubstellen überragen mit ihrer maximal übertragbaren Vorspannkraft alle anderen Einschraubstellen. Dieses Ergebnis wird an den Einschraubparametern bezogen auf die Werkstoffdicke und Einschraublänge in Bild 56 (unten) noch deutlicher.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

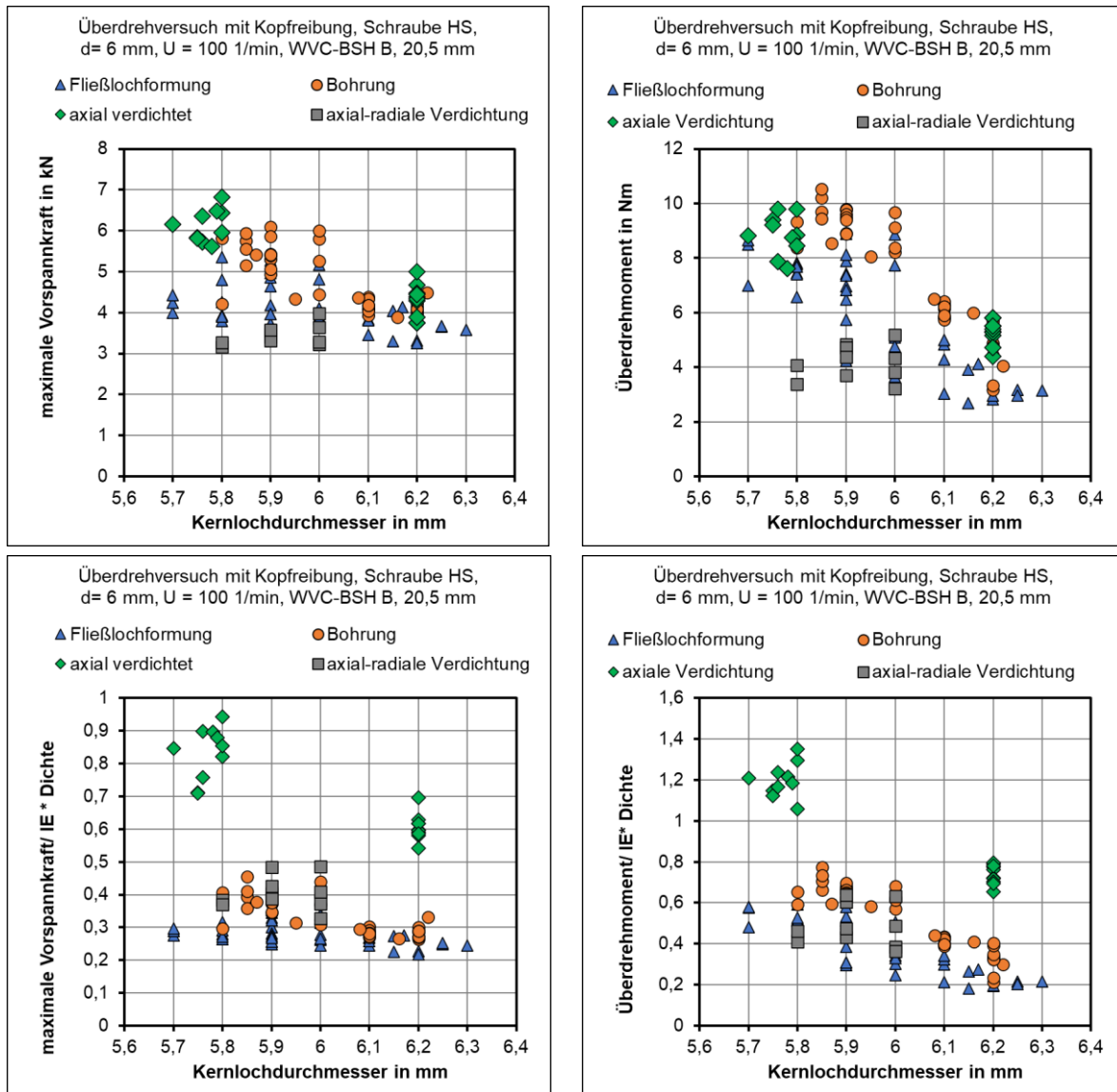


Bild 56: Überdrehversuch an Einschraubverbindungen mit Holzschrauben Typ HS in unverdichtete, radial, axial, und kombiniert verdichtete Einschraubstellen, Absolutwerte (oben), auf Dichte und Einschraublänge I_E normierte Werte (unten)

Einschraubverbindungen mit Gewindeeinsätze konnten aufgrund der begrenzten Spindelbaugröße nicht geprüft werden. Aufgrund der gleichen Kraftübertragung und Beanspruchung wie Holzschraubverbindungen lässt sich der Sachverhalt analog übertragen.

Durchsteckschraubverbindungen mit Vorspannung

Für die Durchsteckschraubverbindungen wurde der Überdrehversuch mit Maschinenschrauben der Festigkeitsklasse 10.9 durchgeführt. Getestet wurden sowohl unverdichtete Schraubstellen, lokal verdichtete Schraubstellen als auch eine Stahlverschraubung. Sie dient als Referenz und zeigt das mögliche Potential auf. Das Versagen der DSV erfolgte im Gegensatz zu den getesteten Einschraubverbindungen durch Schraubenbruch und Verformung im Bereich der Unterlegscheiben.

In Bild 57 ist exemplarisch die Drehmomentkurve der Stahlverschraubung dargestellt. Die Schwachstelle der Verbindung ist die Schraube. Der charakteristische Kurvenverlauf einer

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Stahlverschraubung zeigt den linearen Anstieg der Vorspannkraft bzw. des Drehmomentes im Proportionalitätsbereich an. Darüber hinaus steigen die Kennwerte nicht weiter an und die plastische Verformung der Schraube nimmt bis zum Schraubenbruch zu. Bis sie an dem „roten Punkt“ schlagartig versagt. Der Schraubvorgang dauert bis zum Versagen bei 5 U/min ca. 14 Sekunden.

Demgegenüber gestellt ist die Drehmomentkurve einer DSV in unverdichtetem Birkenperrholz (WVC-BSH) in Bild 57 rechts. Dieser Kurvenverlauf ist ebenfalls gekennzeichnet durch einen kleinen elastischen Bereich, indem Drehmoment und Vorspannkraft mit der Zeit linear ansteigen (bis ca. 4,5 kN). Dem schließt sich ein langgezogener plastischer Bereich an. In diesem Bereich tritt eine Verdichtung der Schraubstelle ein, indem sich die Unterlegscheibe bis ca. 3 mm in den Holzwerkstoff einarbeitet. Die Schraube wird dabei nicht nur gelängt, sondern auch tordiert. Das hat zur Folge, dass die Vorspannkraft wenig steigt und das Drehmoment bis zum Schraubenbruchmoment ansteigt. Der Montagevorgang dauerte mit 5 U/min 90 Sekunden. Diese Schraubstellen sind für Anwendungen im Maschinenbau ungeeignet, da die maximal Übertragbare Vorspannkraft mit 4 kN zu gering sind und die Montagezeiten für höhere Vorspannkraften zu hoch sind.

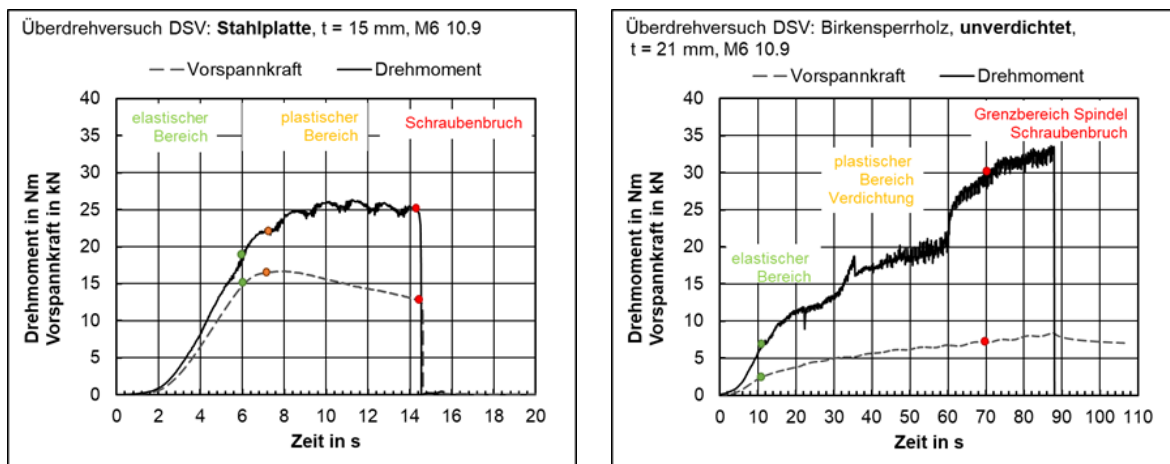


Bild 57: Drehmomenten und Vorspannkraftkurve einer Stahlverschraubung (links) und unverdichteten Holzverschraubung (rechts)

Bild 58 stellen die Drehmoment- und Vorspannkraftkurven der lokal verdichteten Proben gegenüber. Daraus wird ersichtlich, dass die radiale Verdichtung keinen nennenswerten Effekt auf den Schraubvorgang hat. Der Kurvenverlauf liegt auf dem Niveau wie die des unverdichtete Probenmaterials in Bild 57.

Die axial und axial-radial verdichteten Proben liegen auf ein und demselben Niveau. Beide Verdichtungsvarianten zeigen einen Kurvenverlauf mit einem ausgedehnten elastischen Bereich. Sie lassen sich in 30 bis 40 Sekunden montieren und schöpfen das Potential einer 10.9 Schraube mit 12 kN aus. Sie liegen mit Ihrer Schraubfallhärte auf dem Niveau wie die Stahlverschraubung.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

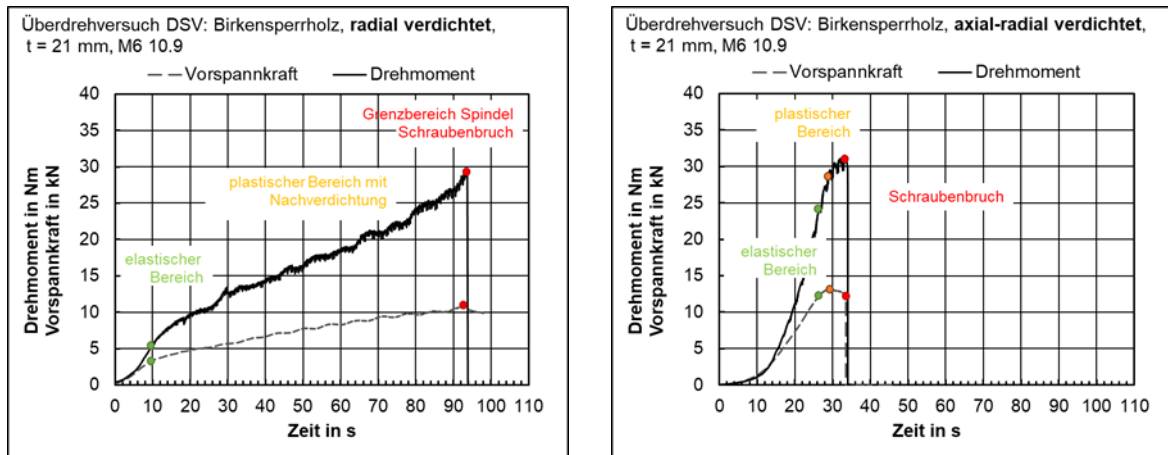


Bild 58: Drehmomenten und Vorspannkraftkurve DSV in BSH radial verdichtet (links) und axial-radial verdichtet (rechts)

Die jeweilige Verformung durch das Einpressen der Unterlegscheibe während der Schraubmontage ist für die Verdichtungsproben in Bild 59 aufgezeigt. Daraus ist ersichtlich, dass die axial und axial-radial verdichteten Schraubproben kaum einen Abdruck der Unterlegscheibe aufzeigen. Ganz im Gegenteil zu den unverdichteten und radial verdichteten Schraubproben.



Bild 59: Während der Schraubmontage verformte Schraubstellen von unverdichteten, radial verdichteten, axial und axial-radial verdichteten Proben (v.l.n.r.)

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es mit der axialen Verdichtung gelungen ist, eine hochfeste Durchsteckschraubverbindung mit hohen übertragbaren Vorspannkraften zu montieren, ohne die Schraube durch das Montagemoment unnötig zu schwächen. Damit ist die Voraussetzung gegeben, im Betriebszustand hohen Belastungen (statisch und dynamisch) standzuhalten.

2.5.3 Lochleibungsfestigkeit (radial verdichtete Materialien)

Die Lochleibungsfestigkeit ist die festigkeitsbestimmende Größe in scherlochleibungsbeanspruchten Holzschraubverbindungen, Insertsraubverbindung, Passbolzenverbindungen, Durchsteckschraubverbindungen und Quergewindebolzenverbindungen. Die axiale Tragfähigkeit der QGB-Verbindung ist separat in Kapitel 2.5.4 mit aufgeführt.

Für die radial verdichteten Bohrungen wurde die Lochleibungsfestigkeit spanend bearbeiteter Bohrungen gegenübergestellt, um den Nutzen der radialen Verdichtung darzustellen. Hierzu wurde zusätzlich der Faserlastwinkel in 0° und 90° sowie die Holzwerkstoffdichte in $\rho = 0,61 \text{ g/cm}^3$ und $0,72 \text{ g/cm}^3$ unterschieden. Hierfür wurde eine Vorsortierung der Proben aus den Plattenzuschnitten des Herstellers B vorgenommen. Die Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit erfolgte nach DIN EN 380 ohne Vorbelastungszyklus an jeweils 10 Einzelproben. Der Bolzendurchmesser betrug 6 mm. Die Bohrungen besaßen einen Durchmesser von 6,3 mm. Im Ergebnis Bild 60 zeigt sich, dass die radial verdichteten Bohrungen eine um 30% höhere Lochleibungsfestigkeit besitzen.

In der Gegenüberstellung beider Werkstoffdichten wird zudem deutlich, dass die Lochleibungsfestigkeit fließlochgeformter Bohrungen im Sperrholz, mit einer Dichte von $0,61 \text{ g/cm}^3$, auf dem Niveau von spanend hergestellten Bohrungen im Sperrholz, mit einer Werkstoffdichte von $0,72 \text{ g/cm}^3$, liegen. Das bedeutet, dass durch die radiale Verdichtung der Bohrung eine 18 % leichtere Sperrholzplatte verwendet werden kann. Demnach wird mit der Gewichtseinsparung um 18 % das Leichtbaupotential entsprechend erhöht.

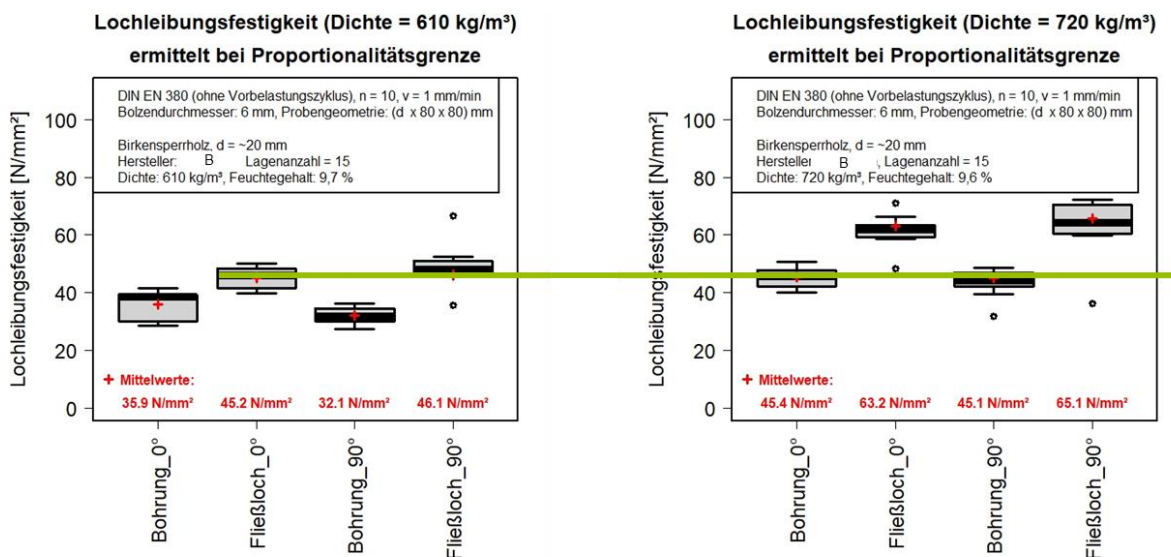


Bild 60: Lochleibungsfestigkeit fließlochgeformter Bohrungen im Vergleich zu spanend hergestellten Bohrungen

In Bild 61 ist die Lochleibungsfestigkeit bei der Proportionalitätsgrenze aller lokalen Verdichtungsarten gegenübergestellt. Zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit wurde der tatsächlich im Bolzenbereich vorhandener Querschnitt zugrunde gelegt. Das bedeutet, dass für die axial und kombiniert axial-radialen Verdichtungsproben der tatsächliche Querschnitt im Verdichtungsbereich gemessen wurde. Das Ergebnis zeigt, dass die axial verdichteten und

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

kombiniert verdichteten Proben innerhalb der Streubreite auf ein und demselben Niveau liegen. Bezogen auf den Mittelwert liegen die axial verdichteten Proben sogar höhere als die kombiniert verdichteten Verbindungsstellen. Die axialen Verdichtungsstellen weisen mit fast 100 N/mm² die höchste Lochleibungsfestigkeit auf.

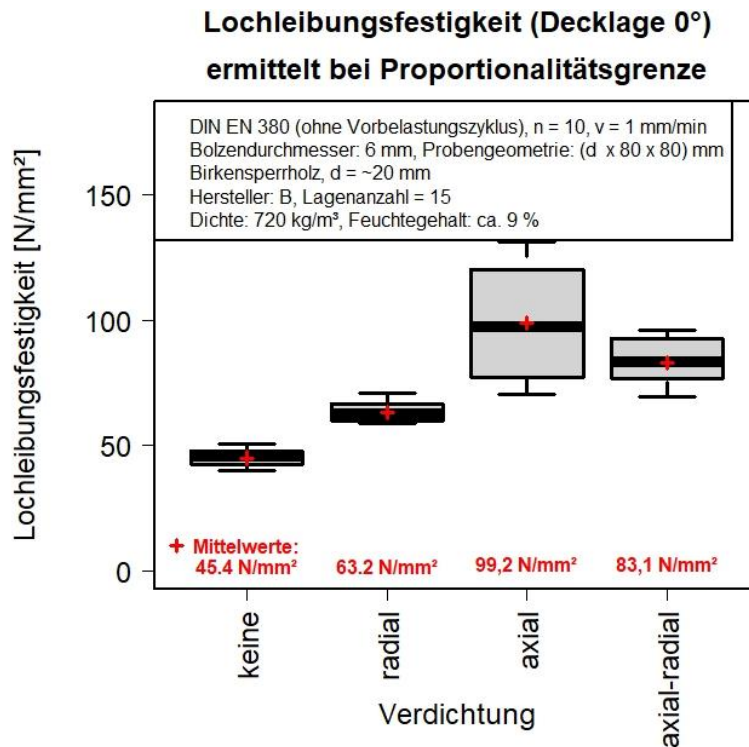


Bild 61: Lochleibungsfestigkeit lokal verdichteter Proben im Vergleich zu unverdichteten Bohrungen

2.5.4 Statische Tragfähigkeit von Einschraubverbindungen (Auszugfestigkeit)

Als Maß für die statische Tragfähigkeit wurde die Schraubenauszugfestigkeit, der statische Ausziehparameter f_x und die Steifigkeit bezogen auf die Verankerungsfläche nach DIN EN 320 [DIN320] und DIN EN 1382 [DIN1382] bestimmt. Der statische Ausziehparameter wurde abweichend von der Norm mit der tatsächlich im Grundwerkstoff verankerten Gewindefläche nach [Eck12] berechnet. Es wurden unverdichtete Referenzproben (grau), axial verdichtete Proben (blau), radial verdichtete Proben (rot) und kombiniert axial-radial verdichtete Proben (grün) für die Schraubarten Holzschraub- und Insertsraubverbindung untersucht. Die Testergebnisse sind in Bild 62 und Bild 63 dargelegt. An ausgewählten Probekörpern erfolgte die Variation des Kernlochdurchmessers der Bohrung. Für beide Verbindungsarten wird ersichtlich, dass die fließlochgeformten (radial verdichteten) Bohrungen keine Verbesserung der statischen Auszugeigenschaften erzielten. Das Aussehen der Gewindeeingriffe und die Spanentwicklung während des Schraubenauszugs zeigte, dass die Furnierlagen im radialen Verdichtungsbereich derart geschädigt sind (Ausknicken vgl. Bild 30), dass das Rückhaltevermögen nicht mehr gegeben ist. Die radiale und axial-radiale Verdichtung führen teilweise sogar zu schlechteren Schraubenauszugeigenschaften und benachteiligt das Haltevermögen der Schrauben.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

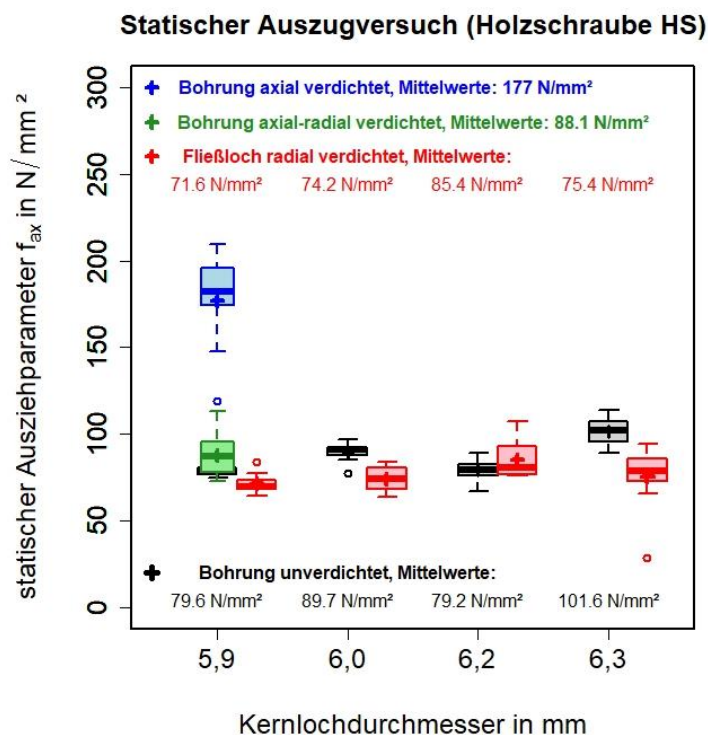
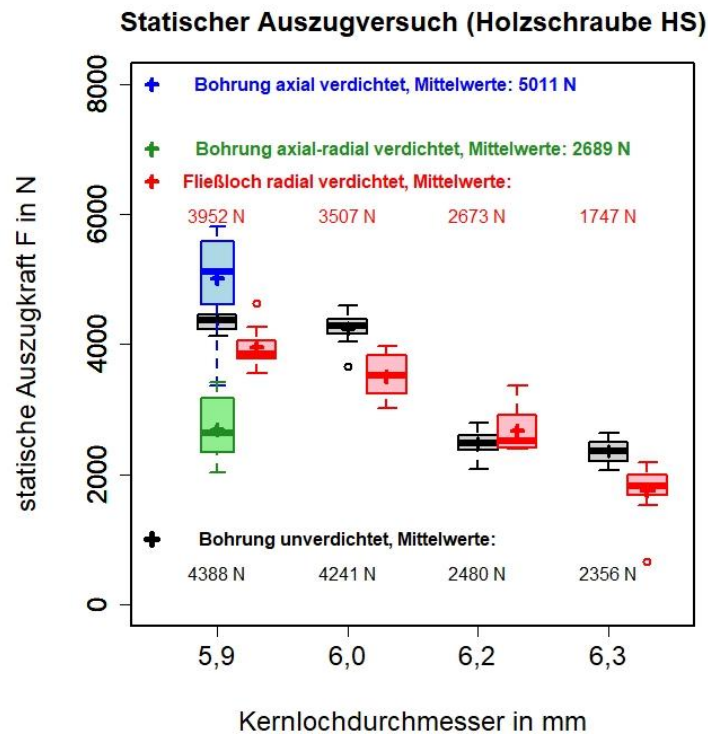


Bild 62: Schraubenauszugeigenschaften von Holzschrauben (Typ HS, $d = 6$ mm, Birkenesperrholz Hersteller B, $t = 20,6$ mm, $n = 10$, $v = 10$ mm/min) aus unverdichteten, radial verdichteten, axial und axial-radial verdichteten Testwerkstoffen

Dem gegenübergestellt zeigt die axiale Verdichtung einen deutlich vorteilhaften Effekt auf. Mit dem nachträglichen Verpressen der Furnierlagen werden mehr als das doppelt bis vierfach höhere statische Ausziehparameter erreicht. Das sich dieser Effekt nicht an der Auszugskraft so gravierend zeigt, ist mit der fast halb so geringen Einschraublänge zu begründen.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

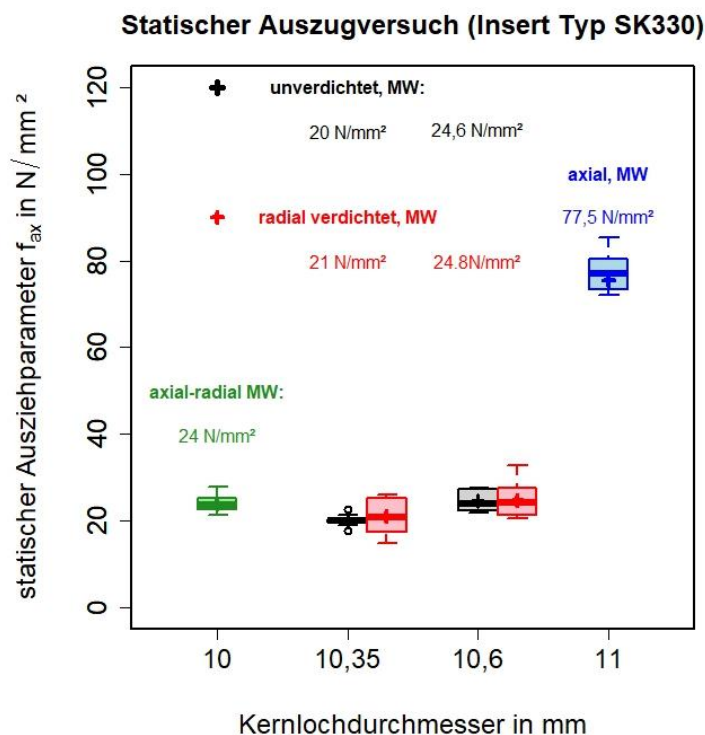
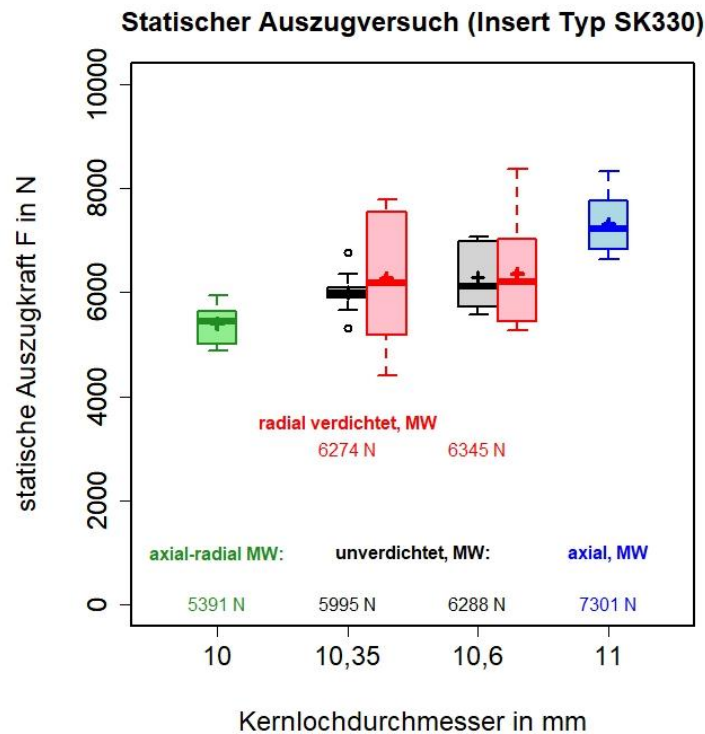


Bild 63: Schraubenauszugeigenschaften von Gewindeeinsätze (Typ SK330 M6, L20, D12, Birkenesperrholz Hersteller B, $t = 20,6$ mm, $n = 10$, $v = 10$ mm/min) aus unverdichteten, radial verdichteten, axial verdichteten und axial-radial verdichteten Testwerkstoffen

Das lässt den Schluss zu, dass die radiale Verdichtung für das Schraubenthaltevermögen unvorteilhaft und die axiale Verdichtung sehr vorteilhaft ist.

Aus den Ergebnissen der radialen und axialen Verdichtung ist zu erwarten, dass die axial-radial verdichteten Verbindungsstellen sich maximal auf dem Niveau wie die axial verdichteten Proben befinden.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Aufbauend auf die Untersuchungen zur Lochleibungsfestigkeit in Kapitel 2.5.3 wurde die statische Tragfähigkeit an Quergewindebolzenverbindungen im Auszugversuch in den Belastungsrichtung Scheibe 0° und Scheibe 90° für fließlochgeformte und gebohrte Testproben ermittelt. Die fließlochgebohrten Proben zeigen im Gegensatz zur verbesserten Lochleibungsfestigkeit keine höheren Auszugkräfte und Verbindungssteifigkeiten gegenüber gebohrten Testproben (Bild 64).

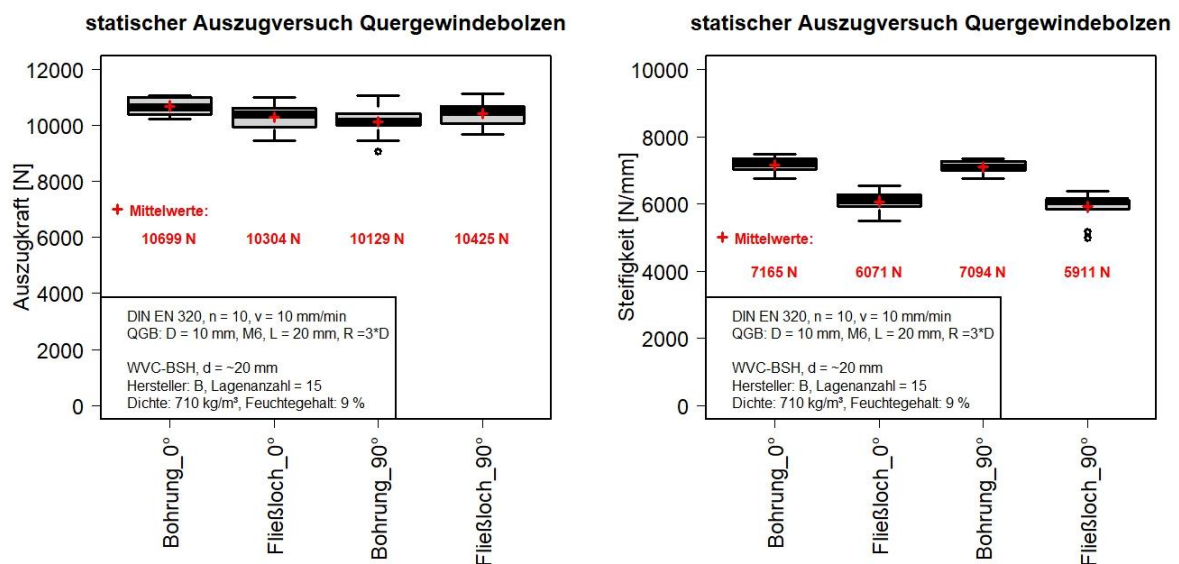


Bild 64: Auszugkraft und Verbindungssteifigkeit von QGB-Verbindungen in gebohrten und fließlochgeformten Einschraubstellen

2.5.5 Dynamische Tragfähigkeit von Einschraubverbindungen

Die Untersuchung der dynamischen Tragfähigkeit erfolgte im dynamischen Laststeigerungsversuch unter Zugschwellbeanspruchung mit einem Belastungsverhältnis von $R = 0,1$. Dieser Versuch wurde bereits für die Prüfung verschiedener Verbindungsmittel in WPC durchgeführt und ist detaillierter in [Sch24] auf Basis der Grundlagen in [Ehr03] beschrieben. Beurteilt werden in diesem Versuch neben der maximalen Lastwechselzahl und dazugehöriger Kraftstufe auch der Verlauf der charakteristischen Versagenskennwerte. Diese lassen eine Tendenz zur möglichen Dauergebrauchsfähigkeit erkennen. Im Versuch wurde ab einer Ausgangszugkraft von 1000 N diese um je 250 N pro Stufe mit einer Prüffrequenz von 5 Hz bis zum Versagen erhöht. Der Stufensprung erfolgte nach je 5000 LW. Die dynamischen Versuche konnten nur an Einschraubverbindungen mit Schraubinserts parallel zur Stiftachse erfolgreich durchgeführt werden. Das ist damit zu begründen, dass die Verbindungsmittelfestigkeit von konventionellen Holzschrauben für dynamisch beanspruchte Verbindungsstellen zu gering ist. Das stetige Schraubbruchversagen lässt keine Schlussfolgerung zur Verbindungsstelle zu. Für die Prüfung der Schraubinserts konnte dieser Effekt durch den Einsatz einer hochfesten Gewindestange 10.9 bis 12.9 vermieden werden. Das gleiche Problem stellte sich bei der Prüfung der Quergewindebolzen heraus. Hierbei versagte die hochfeste Gewindestange. Größere Bolzendurchmesser mit einem entsprechend größerem Nenngewinde war mit den Dorndurchmessern des Fließlochformens nicht

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

kompatibel. Zudem zeigten die statischen Tragfähigkeitsergebnisse keine besseren Auszugswerte radial verdichteter Einschraubstellen gegenüber konventionell gebohrten Einschraubstellen auf, die bessere dynamische Werte erwarten ließen. Tabelle 9 stellt die Versuchsergebnisse der verdichteten Einschraubstellen gegenüber. Es handelt sich um radiale Verdichtungsstellen und gebohrte axiale Verdichtungsstellen.

Der ermittelte dynamische Ausziehparameter wurde als dynamische Bruchkraft bezogen auf die effektive im Grundwerkstoff verankerte Gewindefläche ermittelt. Die axial verdichteten Einschraubstellen zeigen eine um die 6-fach bessere Performance als die konventionell hergestellten Einschraubstellen. Unter dynamischer Belastung schneiden sogar die radial verdichteten Einschraubstellen gegenüber den unverdichteten Einschraubstellen geringfügig besser ab.

Tabelle 9: Bruchversagen der dynamisch Beanspruchung Schraubinserts Typ 330, Mittelwerte aus n=5 Einzelwerten

Kennwert	Einheit	Keine Verdichtung (Bohrung)	Radial Verdichtet (Fließloch)	Axial Verdichtet (Bohrung)
Kernlochdurchmesser	mm	10,49	10,3	10,94
Einschraublänge l_E	mm	20,7	20,36	10
Verankerte Gewindefläche A_{ef}	mm ²	276	306	90,6
Lastwechsel	-	43151	53620	97138
Dynamische Bruchstufe	N	3000	3600	5750
Dynamischer Ausziehparameter f_{ax_dyn}	N/mm²	10,87	11,75	63,8
Statische Bruchlast	N	6288	6274	7301
Dynamisch/statischer Bruchlastfaktor	-	0,47	0,57	0,79

Der Verlauf der charakteristischen Kennwerte Steifigkeitsanstieg, Verformung und Dämpfung ist aus den aufgezeichneten Hystereseschleifen jeder Laststufe für die axial verdichtete Einschraubstelle in Bild 65 exemplarisch dargestellt.

Daraus lässt sich eine erste Schädigung in der 14. Laststufe (=kritische Laststufe) mit dem Beginn der überproportionalen Kurvenänderung erkennen. Inwiefern die kritische Laststufe als Dauerfestigkeitsgrenze zu bewerten ist, muss in Dauerschwingversuchen nachgewiesen werden. Hier setzen Anschluss Themen an.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

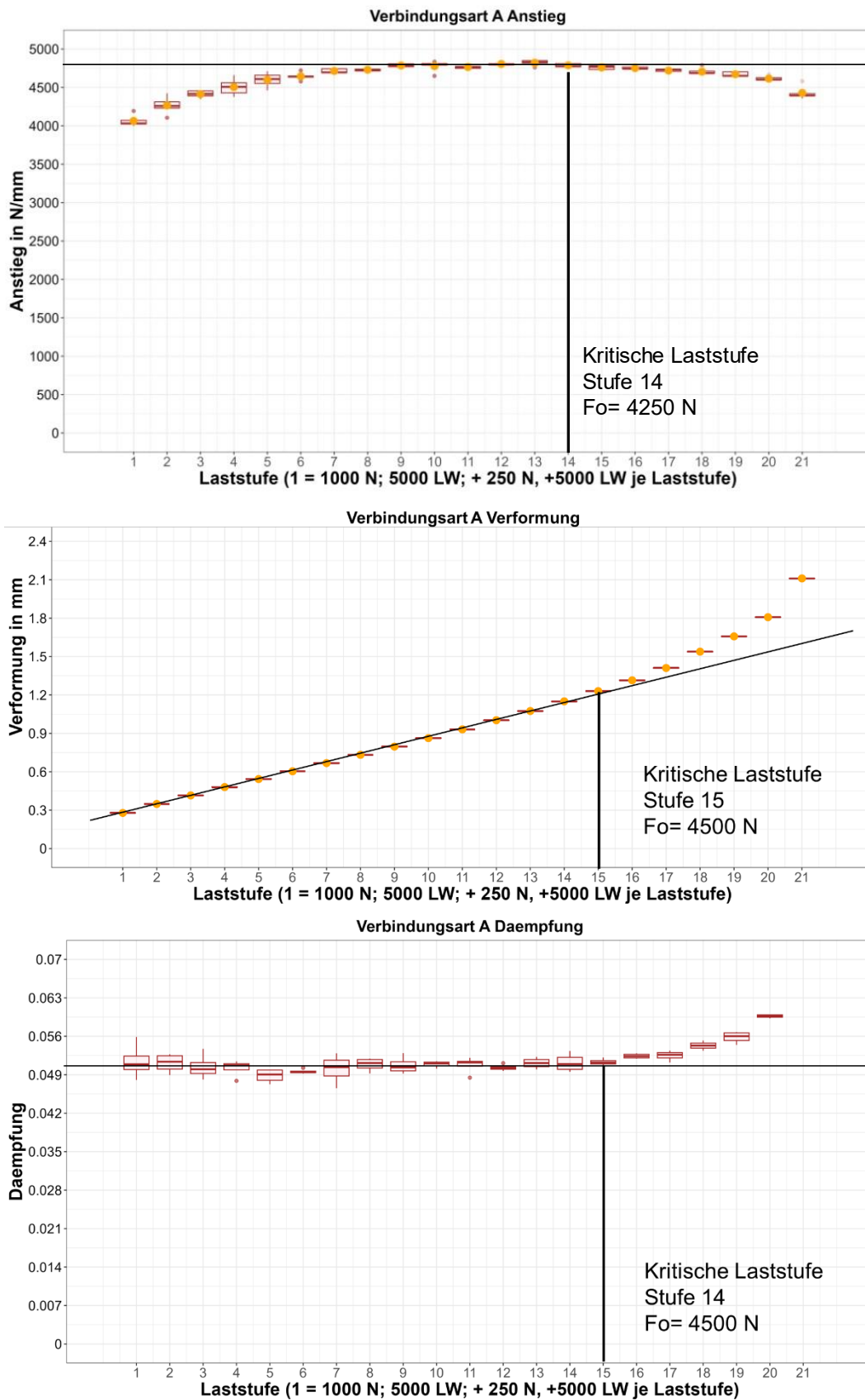


Bild 65: Verlauf der charakteristischen Kenngrößen im Laststeigerungsversuch zur Ermittlung der kritischen Laststufe

2.5.6 Vorspannkraftverlauf ohne klimatischen Einfluss

Im Ingenieurholzbau ist es üblich, Schraubverbindungen aufgrund rheologischer Effekte wie Kriechen und Spannungsrelaxation vorwiegend auf Scherlochleibung zu beanspruchen. Im Maschinenbau werden reine kraftschlüssige und im Ingenieurholzbau teilweise auch kraftformschlüssige Durchsteckschraubverbindungen ausgeführt. Diese werden nachgezogen, um die relaxierte Vorspannkraft wieder auf das Anfangsniveau zu heben. Das reduziert den Relaxationseffekt und stellt sicher, dass die Vorspannkraft innerhalb der Betriebszeit weniger relaxiert. Mit der lokalen Verdichtung wird versucht die Vorspannkraftrelaxation zu minimieren und die Nachziehintervalle auf ein Minimum zu beschränken.

Zur Messung des Vorspannkraftverlaufes wurden die Durchsteckschraubverbindungen gemäß Bild 66 aufgebaut und geprüft. Die verwendeten Sensoren ermöglichten zudem die Auslagerung in kritischen Klimaszenarien bis maximal 80 °C und unter dauerhafter Wasserlagerung. Der Aufbau umfasst galvanisch verzinkte M6 Schaufschrauben (DIN 931, Festigkeit 10.9) mit passenden Muttern (DIN 934-8 ZN M6) und Unterlegscheiben (DIN EN ISO 7093) mit einem Innendurchmesser von 6,3 – 6,4 mm, einem Außendurchmesser von 17,8 mm und einer Höhe von 1,6 mm. Für axial verdichteten Proben wurde die in Kapitel 2.1.2 dargestellte Kegelunterlegscheibe aus Stahl verwendet, welche sich formschlüssig an die Innenkontur des verdichteten Kegels anlegt.

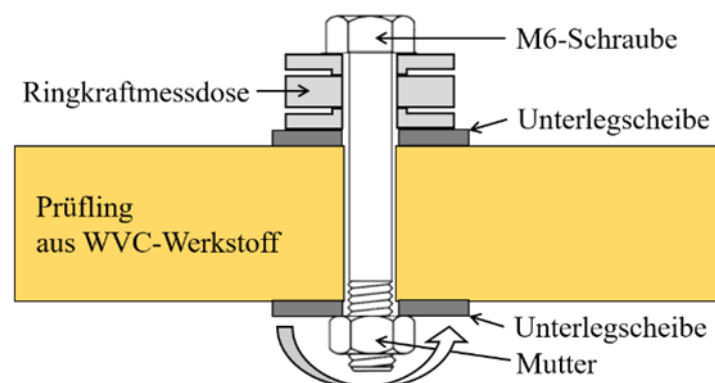


Bild 66: Verbindungsaufbau DSV für Relaxationsversuche

Die Anfangsvorspannkraft zu Beginn der Messung betrug $F = 4 \text{ kN}$ und $F = 9 \text{ kN}$. Die Montage erfolgte definiert mit einer servomotorischen Schraubspindel (Modell HF 300 – BG 3, Bosch Rexroth).

In der ersten Instanz wurden über einen kurzen Messzeitraum von 5 Minuten die fließlochgeformten Proben (radial verdichtete) unverdichteten Bohrungen gegenübergestellt. Das Ergebnis in Bild 67 zeigt, dass die radial verdichteten Schraubstellen um das gleiche Niveau relaxieren, wie die konventionell gebohrten Proben. Der Vorspannkraftabfall lag nach 5 Minuten bei den gebohrten Proben bei 24 %, bei den fließlochgeformten Proben bei 25 %. Ein Nutzen hinsichtlich des Vorspannkraftabfalls lässt sich bereits innerhalb des kurzen Messzeitraumes nicht erkennen.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

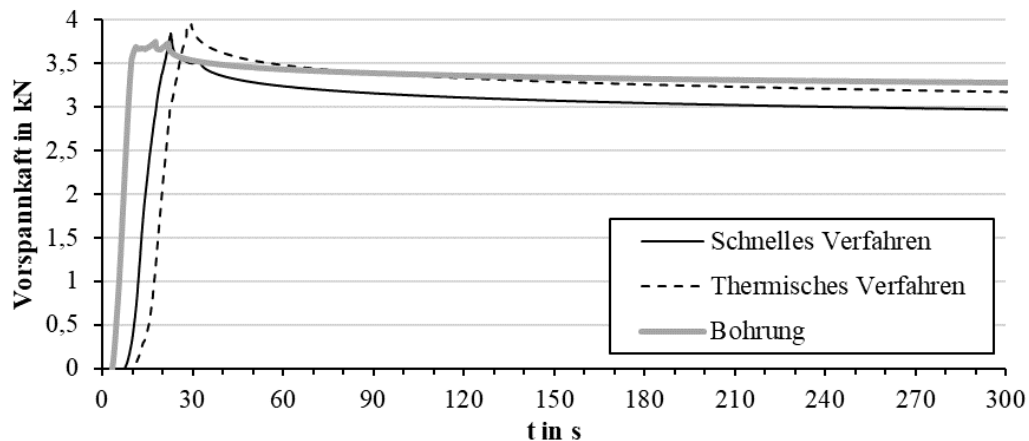


Bild 67: Vorspannkraftverlauf fließlochgeformter und gebohrter Durchgangsbohrungen (Anfangsvorspannkraft 4 kN)

Für den Direktvergleich aller Verdichtungsarten wurden gleichartige Relaxationsversuche über einen Zeitraum von 3 Wochen durchgeführt und den Referenztestproben aus hochverdichtetem Kunstharzpressholz und unverdichtetem Birkenperrholz gegenübergestellt (Bild 68). Das Testmaterial aus Kunstharzpressholz stellt den Benchmark dar. Alle Versuche fanden zeitgleich statt, sodass der Effekt von Klimaschwankungen auf das Ergebnis ausgeschlossen werden konnte.

Das Ergebnis in Tabelle 10 zeigt den deutlich positiven Effekt der axial verdichteten Verbindungsstelle. Sie liegt in Ihrem Relaxationsverhalten auf dem Niveau des hochverdichteten Kunstharzpressholzes. Wohlgermerkt muss darauf hingewiesen werden, dass die maximale Verdichtung der axial verdichteten Verbindungsstelle auf der Probenunterseite noch nicht erreicht ist, sodass noch weiteres Verbesserungspotential gegeben ist.

Die radiale Verdichtung bei der Fließlocherzeugung hat nicht den gewünschten Effekt erbracht. Deren Vorspannkraftabfall liegt auch in dieser Messung auf dem Niveau wie die des unverdichteten Birkenperrholzes.



Bild 68: Testaufbau der Relaxationsversuche nach Tabelle 10

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Tabelle 10: Messergebnis der Vorspannkraftrelaxationsversuche über eine Dauer von 3 Wochen

Probennummer	WVC KHP 01	WVC KHP 02	WVC BSH 03	WVC BSH 04	WVC BSH 05	WVC BSH 06	WVC BSH 07	WVC BSH 08
Verbindungsstelle	Hochverdichtet (Bohrung)		Unverdichtet (Bohrung)		Radial verdichtet (Fließloch)		Axial verdichtet (Bohrung)	
Startwert in kN Vorspannkraft	9	9	9	9	9	9	9	9
Endwert in kN Vorspannkraft nach 3 Wochen	5,57	5,45	*)	3,19	3,48	3,83	5,649	5,90
Vorspannkraftabfall um (je geringer umso besser)	38%	39,4%	-	64,5%	61%	57%	37%	34%

*)Messung abgebrochen

2.5.7 Vorspannkraftverlauf und Maßhaltigkeit unter Klimaschwankungen

Die Untersuchung der Maßhaltigkeit und der Vorspannkraft unter definierten Klimaszenarien folgte dem Ziel, die Änderung in den lokalen Verdichtungsstellen zu detektieren, um daraus Schlüsse zur Empfindlichkeit verdichteter Lasteinleitungsstellen gegenüber Klimaschwankungen zu ziehen. Es wurden bezugnehmend auf die Klimaschwankungen in Produktionsstätten am Standort Deutschland [Mue15] für eine gesamte Jahresscheibe die jeweils in den Jahreszeiten dominierenden Klimata über einen Zeitraum von je eine Woche simuliert. Darüber hinaus wurden Extrembedingungen von sehr warm/ trocken bis zu warm/feucht und der kompletten Wasserlagerung abgebildet. Die Probekörper wurden jeweils 1- 2 Wochen den Bedingungen ausgesetzt und turnusmäßig die Feuchte, die Dicke, der Durchmesser, der Kegelwinkel und die Vorspannkraft gemessen. Tabelle 11 stellt die Lagerungsabfolge dar.

Tabelle 11: Eingestellte Klimabedingungen in chronologischer Abfolge

Messung	Eingestelltes Klima	Zustand, Simulierte Jahreszeit	Feuchtegehalt [%]	Dauer [Tage]
1	Lagerungsklima	Ausgangspunkt	9,9	
2	20°C, 65% rel. LF	Herbst	10,62	7
3	15°C, 25% rel. LF	Winter	7,4	7
4	20°C, 65% rel. LF	Frühling	10,7	7
5	30°C, 50% rel. LF	Sommer	9,08	7
6	20°C, 65% rel. LF	Herbst	10,85	7
7	80°C, 10% rel. LF	Worst case 1 nahe Darrtrocknung	2,2	10
8	20°C, 65% rel. LF	Normklima	8,05	4
9	20°C, 65% rel. LF	Normklima	9,9	7
10	30°C, 85% rel. LF	Warm/ feucht	14,89	7
11	30°C, 85% rel. LF	Warm/ feucht	15,43	7
12	Wasserlagerung	Worst Case 2	63	14

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Die geometrischen Größen Durchmesser, Kegelwinkel der axialen Verdichtungsstellen und Probendicke sind als relative prozentuale Änderung zum Ausgangswert in den Diagrammen in Bild 69 dargestellt. Der Ausgangswert ist der erste Messwert, vor Beginn der Klimatisierung. Der Vorspannkraftverlauf ist als normierte Größe bezogen auf den Anfangswert in Bild 70 dargestellt. Der Werteverlauf bis zur 6. Messung stellt den Jahresverlauf mit den Übergängen der Jahreszeiten von Herbst – Winter – Frühling – Sommer – Herbst dar. Der Verlauf der Materialfeuchte ist in jedem Diagramm als gestrichelte Kurve mit aufgeführt. Die Dimensionsänderung über den Jahresverlauf, jeweils linksseitig dargestellt, zeigt eine Dickenänderung von maximal 1,1 %, eine Änderung des Durchmessers um maximal 1,4% und eine Winkeländerung um maximal 0,6 %.

Der Durchmesser fließlochgeformter Proben unterliegt mit maximal 1,4 % Abweichung, größeren Schwankungen als die konventionell gebohrten Proben mit nur 0,8 %. Zudem weisen die fließlochgeformten Proben eine deutlich größere Forminstabilität auf, die zu größeren Messunsicherheiten führt (vgl. Kapitel 2.5.1). Deutlicher stellt sich dieser Unterschied im Durchmesser unter den Extrembedingungen in den Messungen 7 und 10 bis 12 in Bild 69 heraus.

Die Vorspannkraftmessung erfolgte auf Basis der bisherigen Ergebnislage ausschließlich an axial verdichteten und unverdichteten Verbindungsstellen. Es wurden Durchsteckschraubverbindungen (DSV) und Einschraubverbindungen (ESV) mit Gewindeinserts für die Schraubengröße M6 ausgeführt. Die Anfangsvorspannung zur Schraubmontage betrug 4 kN.

Am Vorspannkraftverlauf über die Jahresscheibe (bis Messung 6) wird ersichtlich, dass die axial verdichteten Verbindungsstellen deutlich geringeren Schwankungen infolge der Klimaschwankungen unterliegen als die unverdichteten Referenzproben. Im kritischen Übergang von der Messung 2 (simulierter Herbst) auf die Messung 3 (simulierter Winter) verlieren die Schraubverbindungen unverdichteter Verbindungsstellen komplett ihrer Vorspannung. Die Verbindung ist versagt. Die axial verdichteten Verbindungsstellen besitzen hingegen noch eine Restvorspannung von 50 %. Die axial verdichteten Verbindungsstellen halten somit über die gesamte Jahresscheibe ihre Funktionsfähigkeit aufrecht. **Mit der axialen Verdichtung ist es gelungen dem Vorspannkraftabfall deutlich entgegen zu wirken und eine um mindestens 50 % höhere Vorspannung als unverdichtete Verbindungsstellen im praktischen Einsatzfall über den klimatischen Jahresverlauf in Produktionsstätten zu erhalten.** Unter sehr warmen, trockenen Bedingungen (Messung 7), die einer Darrtrocknung nahekommen und praktisch nicht in unserer mitteleuropäischen Klimazone auftreten, verlieren auch die axial verdichteten Verbindungsstellen ihre Vorspannung. In der sich anschließenden Messung 8 wurde das Holznormklima eingestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die verdichteten Verbindungsstellen schneller ihre Vorspannkraft infolge des entstehenden Quelldruckes wiederaufbauen können.

Inwiefern die Quellneigung der radial verdichteten Schraubstelle die Vorspannung beeinflusst, wurde nicht untersucht, da die Messungen zur Vorspannkraft ohne Klimaschwankungen keinen Benefit zeigten.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

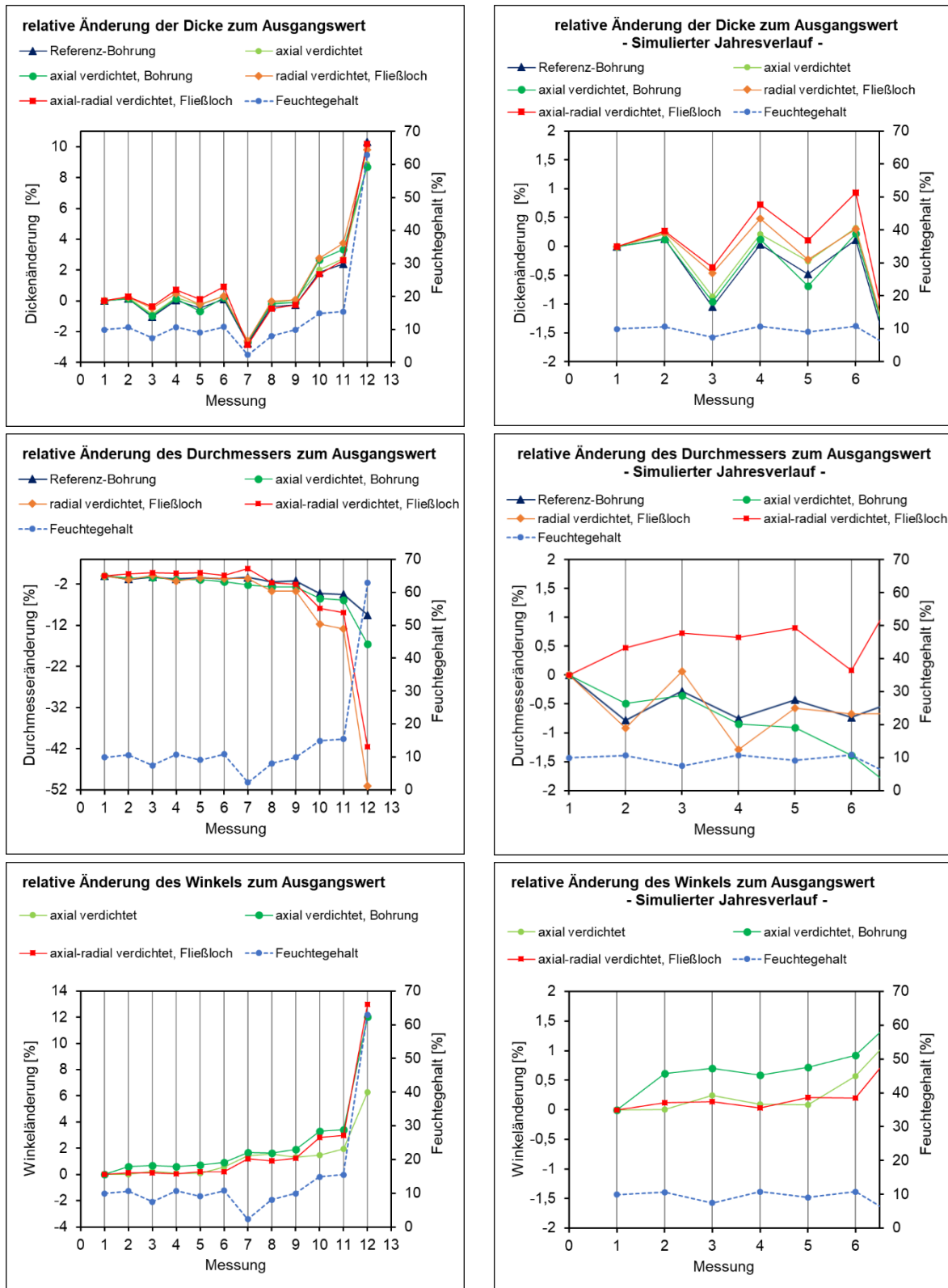


Bild 69: Änderung der geometrischen Größen der Verdichtungsstellen unter definierten Klimaschwankungen, Probendicke (oben), Durchmesser (mittig), Kegelwinkel (unten) mit Anfangsdurchmesser für M6 von $d = 5,6 \text{ mm} - 6,1 \text{ mm}$

Unter dem 2. „worst case“ Szenario, der Auslagerung in sehr feucht warmem Klima und der Wasserlagerung, versagten die Verbindungen durch Schraubenabriss und den durch den Quelldruck verursachten Insertauszug aus den Einschraubstellen. Das deutete sich mit den

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

abfallenden Vorspannkraften innerhalb der Wasserauslagerung an, welche zuvor auf ca. 11 kN angestiegen waren. Das bedeutet, dass hoch vorgespannte Schraubstellen in axial verdichteten Verbindungsstellen, aufgrund des stärkeren auftretenden Quelldruckes zusätzlich auf Schraubenbruch ausgelegt, bzw. gesichert werden müssen. Das erfordert detailliertere Untersuchungen und stellt einen offenen Punkt für Anschluss-themen dar. Die kegelförmige axiale Verdichtungsstelle formte sich fast komplett wieder zurück.

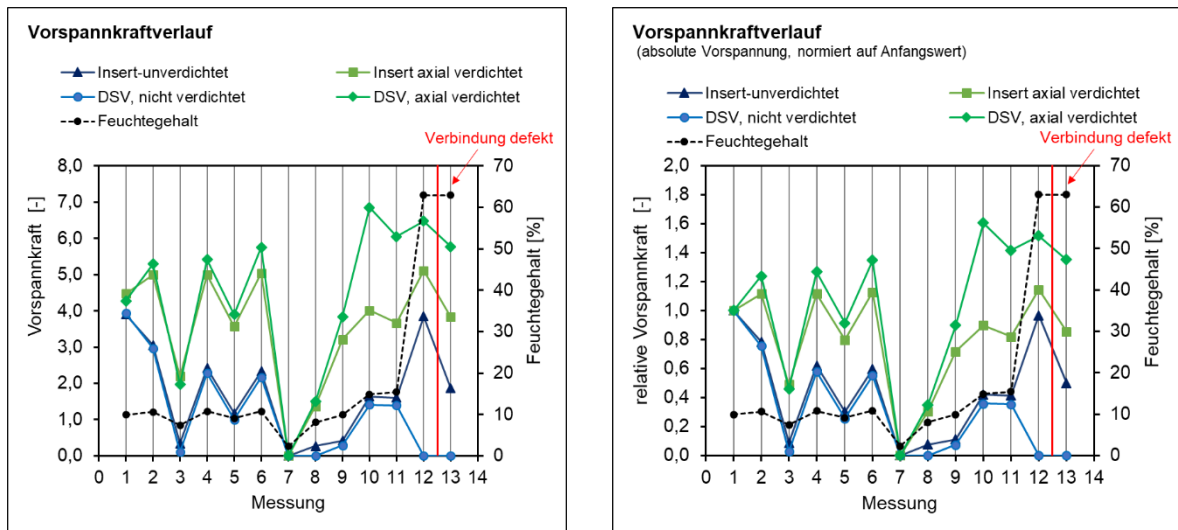


Bild 70: absoluter und relativer Vorspannkraftverlauf unverdichteter und axial verdichteter Verbindungsstellen in Durchsteckschraubverbindungen (DSV) und Insertschraubverbindung (M6, 10.9, $F_v = 4$ kN)

2.6 Verfahrensmodifikation (AP5)

2.6.1 Axiale-radiale Kombinationsverdichtung mit Werkzeugmodifikation

Kombinationsverdichtung beschreibt den verbundene Verfahrensablauf aus axialer und radialer Verdichtung in ein und demselben Verfahren. Das Kombinationsverfahren bleibt als Umformprozess der Schraubmontage vorgelagert. Die Integration mit der Schraubmontage konnte aufgrund zu hoher Presskräfte und dafür nicht verfügbarer Maschinenteknik nicht realisiert werden und bleibt als offener Punkt für Anschlussprojekte bestehen.

Aus den vorab erläuterten Erkenntnissen zum Fließlochdorn (Kapitel 2.4.1) und dem beheizten Werkzeug für die axiale Verdichtung (Kapitel 2.4.2) wurde das Werkzeug aus der Kombination beider Verfahren in Bild 71 entwickelt.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

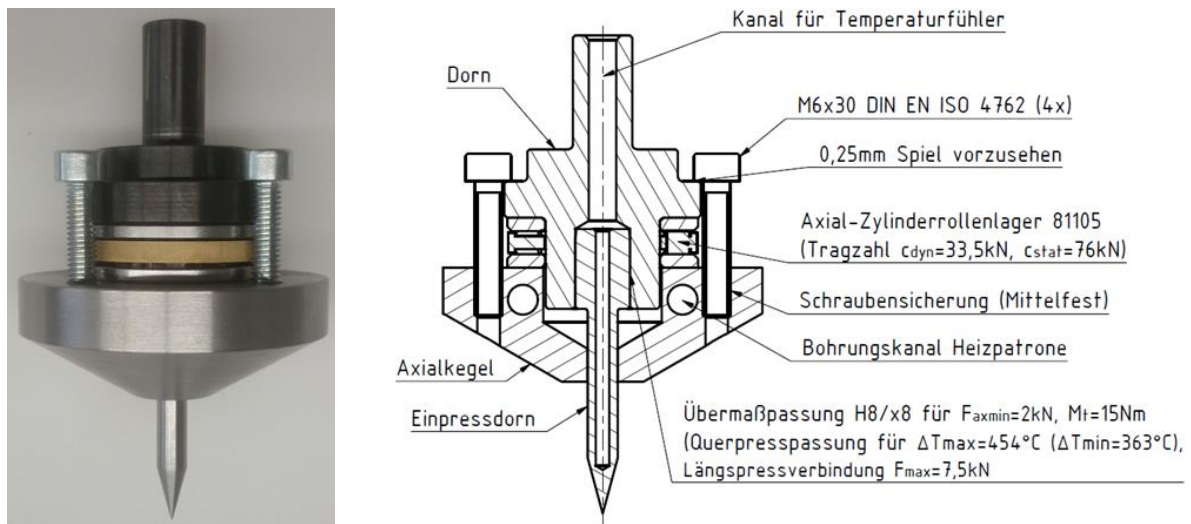


Bild 71: gefertigtes Kombiwerkzeug als reales Bauteil und als Schnittdarstellung

Die maximalen auftretenden Kräfte für die Verdichtung eines 20 mm dicken Ausgangsmaterials der Rohdichte $\rho_{8,4\%} = 0,67 \text{ g/cm}^3$ auf die theoretische Reindichte $\rho_R = 1,5 \text{ g/cm}^3$ betragen in den maximal aufgetretenen Kraftwerten knapp 32 kN. Um einer Rückverformung entgegenzuwirken konnte gezeigt werden, dass das heiße Werkzeug in der pressenden Position (Relaxationsphase) für eine gewisse Zeit u. A. zum Abkühlen des Werkzeuges und des Werkstoffes gehalten werden sollte. Die Notwendigkeit des Haltens bringt eine Verlängerung der Prozesszeit und damit Herstellungszeit auf der Maschine mit. Für diesen Fall wurde ein neues Kombiwerkzeug für die industrielle Fertigung konzipiert. Die grundlegende Weiterentwicklung kann durch eine kausale Kette dargelegt werden. So würde das Halten des Werkzeuges in der pressenden Position (Relaxationsphase) deutlich mehr Maschinenzeit in Anspruch nehmen, aber das Ergebnis des Durchgangsloches und der ertragbaren Vorspannung deutlich verbessern. Eine Schlussfolgerung dazu wäre, dass nur das Werkzeug an der zu erzeugenden Verbindungsstelle über den notwendigen Zeitraum verbleibt und die Maschine mit einem anderen Werkzeug durch einen Werkzeugwechsel weiterarbeiten kann. Damit wird die Effizienz gesteigert.

Somit würde der Dorn und der Kegel in der Umformstelle verbleiben und ein Gegenhalter an der gegenüberliegenden Werkstoffseite müsste die Zugkräfte ableiten. Die theoretischen Kraftverläufe beim axialen Umformen zeigen die auftretenden Presskräfte am Werkzeug. (vgl. Bild 72). Diese steigt beim Pressen auf das Maximum an und durch das positionierte Verweilen des temperierten Werkzeuges (Relaxationsphase) fällt die Kraft durch Relaxationseffekte wieder ab. Der Einsatz eines Gegenhalter für die Weiterentwicklung eines wechselbaren Werkzeuges und der damit verbundene Kraftverlauf, welcher die Kraftableitung z. B. über eine Klemmung zwangsläufig über den Dorn abgeleitet, wird in Bild 73 angedeutet.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

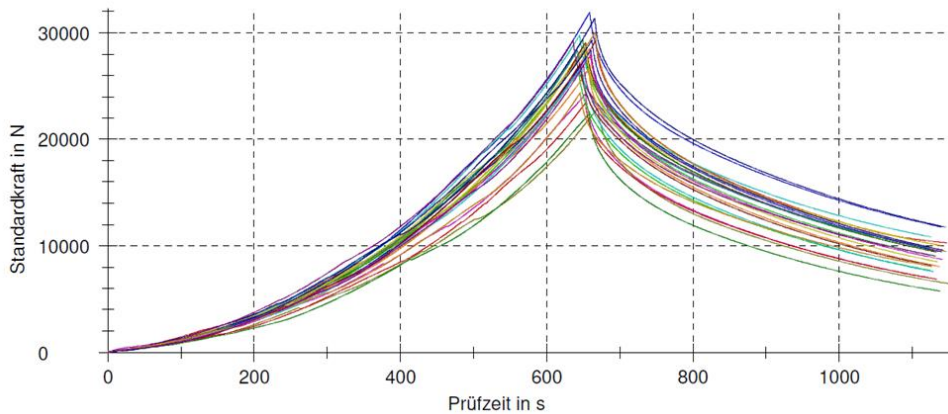


Bild 72: Kraftverlauf axiale Verdichtung Pressphase und Relaxationsphase

An dieser Stelle rückt der Dorn mit einem werkstoffseitige Grenzverhalten in den Fokus. Die vorab aufgebrauchten Druckkräfte von maximal 32 kN würden sich in die abzuleitenden Zugkräfte umkehren. Eine rechnerische Auslegung (Übersicht in Bild 74) ergibt, dass bei 32 kN Zugkraft kein Werkstoff für einen 6,6 mm Dorndurchmesser geeignet ist.

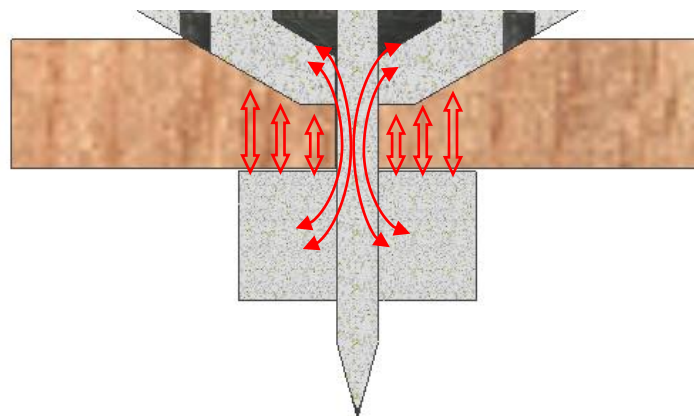


Bild 73: Kombiwerkzeug mit Gegenhalter und schematischem Kraftfluss

anliegende Zugkraft resultierend aus der Maschinenseitigen Druckkraft in N		32000					20000				
Durchmesser in mm	Zugfläche in mm ²	σ in N/mm ²	S235JR	C22	C60	34CR2	σ in N/mm ²	S235JR	C22	C60	34C
6,6	34,21	935					585				
9	63,62	503					314				
11	95,03	337					210				
13	132,73	241					151				

Werkstoff	Zugfestigkeit N/mm ²
S235JR (unlegiert)	360
C22 (unlegiert)	410
C60 (unlegiert)	670
34CR2 (legiert)	800

Bild 74: Rechnerisch ertragbare Spannungen des Dorns in Abhängigkeit des Werkstoffes und des Durchmessers

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Größere Durchmesser wären teilweise geeignet, jedoch ist zu beachten, dass der Ausschnitt der Berechnung auf der Grundlage beruht, dass der einzudringende Kegel mit der Kegelfläche gleichbleiben. In praktischer Umsetzung würde bei einer Vergrößerung des Durchmessers ebenfalls die Größe der notwendigen Unterlegscheibe und damit die gesamte Kegelfläche sich vergrößern und damit auch die notwendige Presskraft ansteigen.

Eine Möglichkeit zur Umsetzung mit entsprechenden Werkstoffen ist es die Presskräfte durch einen temporären Verbleib mit der Aufrechterhaltung der Position des Werkzeugs auf mindestens 20kN durch die Ausnutzung der Spannungsrelaxation und Retardation gesenkt wird. Erst dann sind die wirkenden Zugkräfte klein genug, dass der Schaft mit einem Gegenhalter (Klemme) fixiert werden kann ohne durch die Rückformkraft droht den Dorn zu verformen oder abzureißen. Für den industriellen Einsatz ist die Umsetzung durch die Fixierung oder konstruktive Umsetzung in einer SK-Aufnahme (Schaftkegel) oder HSK-Aufnahme (Hohlschaftkegel) möglich. Das ermöglicht einen schnellen Wechsel des Werkzeuges.

Die durchgeführten Testversuche mit dem Kombiwerkzeug zeigten unter Berücksichtigung der vorhandenen Maschinenteknik (Schwerlast- Standbohrmaschine mit Vorschub) sehr gute Ergebnisse. Es ist gelungen, bis zur mechanischen Grenzlast der Maschine (Bild 76) eine kombinierte axiale-radiale Verdichtungsstelle bis zu einer Tiefe von 6 mm auszuformen. Die Presstiefe ist seitens der Grenzlast der Maschine gegeben. Größere Presstiefen lassen sich mit entsprechend größerer Anlagentechnik jedoch erwarten.

Die Prozessphasen sind in Bild 76 mit dem Kraft-Zeit-Verlauf beschrieben.

Mit dem Eindringen des Dornes bis zum Aufsetzen des Verdichtungskegels findet die radiale Verdichtung statt. Mit aufsetzen des Kegels startet die axiale Verdichtung und die Axialkraft nimmt schlagartig zu. Es formt sich der axiale Verdichtungsbereich aus. Am oberen Kraftpunkt (hier 22 kN) ist mit dem Ende des Vorschubs die Pressphase abgeschlossen. Das Werkzeug bleibt positioniert und die Relaxationsphase beginnt mit dem Abfall der Presskraft.

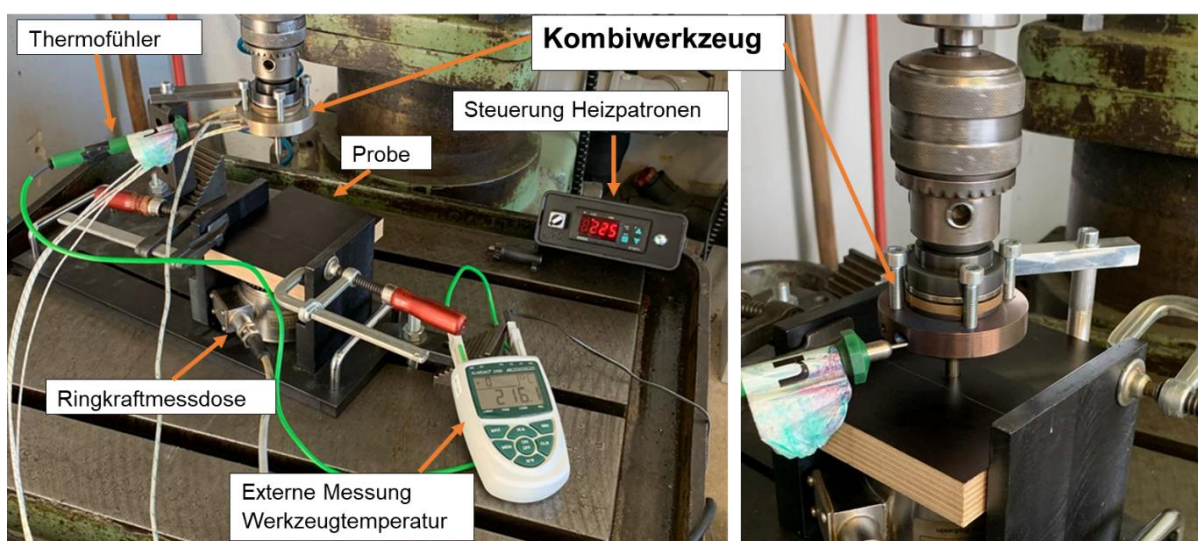


Bild 75: Versuchsaufbau für die Kombiverdichtung auf einer Schwerlast-Standbohrmaschine

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

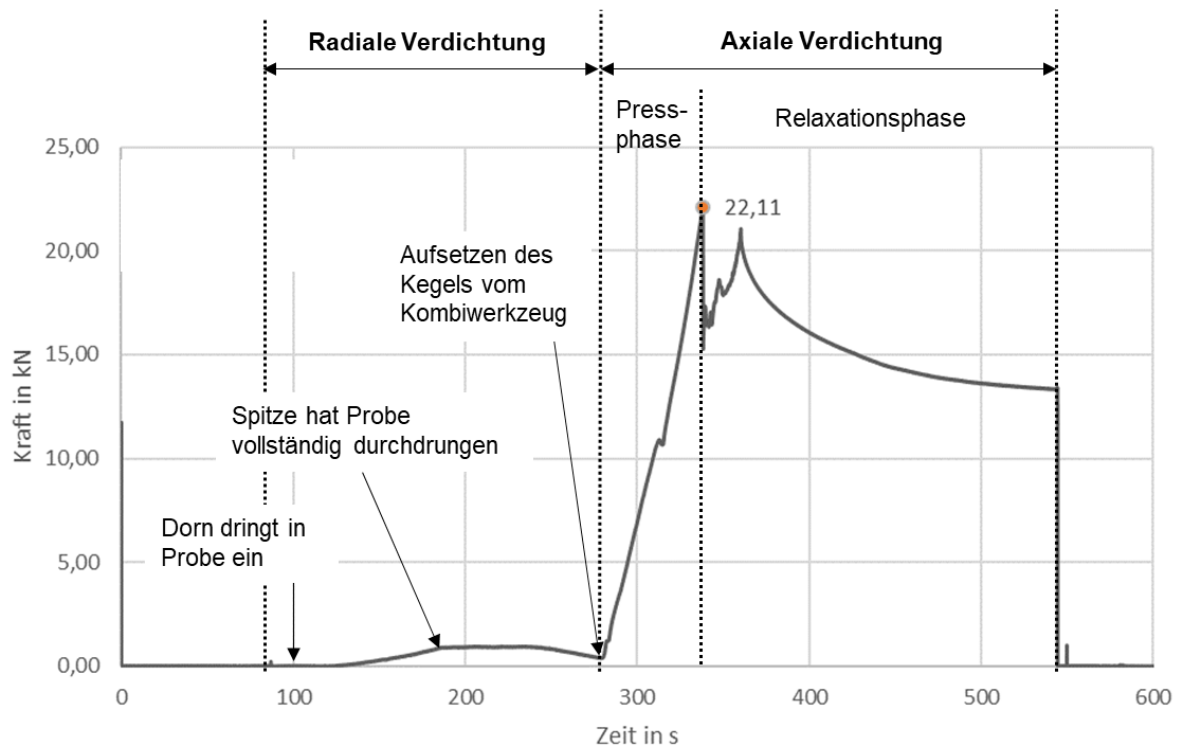


Bild 76: Prozessphasen Kombiverdichtung mit Kraft-Zeit-Verlauf, Dorndurchmesser 6,6 mm, Die Unstetigkeiten im Kraftverlauf nach der Maximalkraft sind auf das Rutschen der Anlage zurückzuführen. Der Kraft-Zeit-Verlauf folgt normalerweise dem Kurvenverlauf in **Bild 72**

2.6.2 Zweistufige Verfahrensführung axiale Verdichtung

Mit der zweistufigen Verfahrensführung wird das Ziel verfolgt die Prozesszeit in der Pressphase zu reduzieren. Indem der erste Vorschub des Verdichtungskegels sehr schnell innerhalb weniger Sekunden stattfindet und mit größerer Kontaktfläche der Vorschub schlagartig auf 1 mm/min reduziert wird. Diese Verfahrensmodifikation basiert auf folgender Überlegung:

Mit zunehmendem Eindringen (Presstiefe steigt) des beheizten Kegels in die Sperrholzprobe nimmt, mit der Vergrößerung der Mantelfläche des Kegels die Kontaktfläche zur Probe und damit der Wärmeeintrag zu. Zu Beginn ist die Kontaktfläche und entsprechend auch der Wärmeeintrag am geringsten und nimmt bis zur maximalen Kontaktfläche, bei Erreichen der maximalen Presstiefe zu. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Kegel in die Probe gedrückt wird, bestimmt neben der Kontaktfläche zusätzlich den Wärmeeintrag in die Probe. In der Phase der größten Umformung muss der Wärmeeintrag am größten sein, um durch die thermische Plastifizierung das Reißen der Furnierlagen zu vermeiden. Das bedeutet mit zunehmender Presstiefe, und der daraus resultierenden Kontaktfläche des Stempels zum Werkstoff, muss die Pressgeschwindigkeit reduziert werden. Das ermöglicht am Pressbeginn eine deutliche Prozesszeitminderung und dennoch ein gleichmäßiges und qualitativ hochwertiges Pressergebnis. Gleichzeitig wird damit der thermisch lokal geschädigte Bereich an der Kegelspitze vermieden. Die stufenweise Verfahrensführung ist exemplarisch in Bild 77 dargestellt. In dieser Darstellung wird der Stempel in Schritt 1 mit 600 mm/min auf die

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Presstiefe t_1 gefahren und im Schritt 2 mit $v_2 = 1$ mm/min auf die geforderte Gesamttiefe t_{ges} auf die geforderte Reindichte von $1,5$ g/cm³.

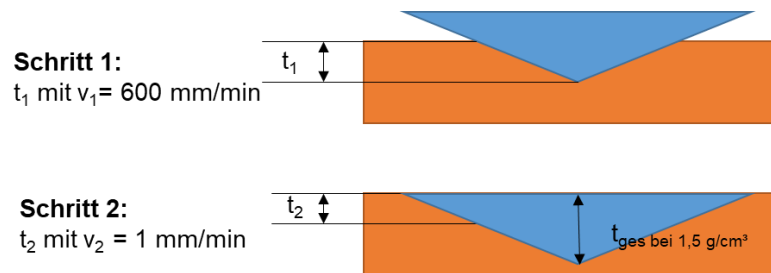


Bild 77: schematische Darstellung des zweistufigen axialen Verdichtungsprozesses

In anschließenden Pressversuchen erfolge die Variation der Presstiefe mit hohen Pressgeschwindigkeiten und die Beurteilung hinsichtlich der Rückverformung und des Presskraftverlaufes über die Zeit. Die Parametereinstellung und resultierende Prozesszeit in der Pressphase sind in Tabelle 12 dargelegt. Den zweistufigen Varianten (Z1-Z5) sind zwei einstufige mit einer langsamen und einer sehr schnellen Presszeit gegenübergestellt. Dieser Prozessoptimierung stehen die Kriterien der geringen Rückverformung und geringer Presskraft entgegen. Auf Basis dieser Kriterien erfolgt die Auswahl der vorteilhaften Parameter. In der ersten Variante, bei der 10 mm Vorschub mit $v = 600$ mm/min gefahren werden, übersteigt die Presskraft der Stufe 1 die Presskraft bei maximaler Presstiefe um fast 10 kN (Bild 78). Die ist für die zukünftige Anlagenentwicklung von Nachteil. Die Gegenüberstellung der Rückverformung des einstufigen Verfahrens mit einer Pressgeschwindigkeit von $v = 600$ mm/min und maximaler Pressdauer von 1 s zeigt, dass keine thermische Fixierung stattgefunden hat. Die zweite Prozessphase mit langsamem Vorschub ist somit für die thermische Fixierung zwingend erforderlich.

In der aufgelisteten Variante Z2 liegen die Presskräfte der Stufe 1 in etwa auf dem gleichen Niveau wie in Stufe 2. Das stellt den herausgearbeiteten Kompromiss aus geringer Prozesszeit und möglichst geringer Presskraft dar. Die Rückverformungen liegen bis zu einer Presstiefe in Stufe 1 von $t_1 = 8$ mm im annähernd gleichen Bereich (Bild 79).

Tabelle 12: Prozesszeitreduzierung im zweistufigen axialen Verdichten, mit $T = 220^\circ\text{C}$

Variante	Presstiefe t_1 in mm mit $v_1 = 600$ mm/min	Presstiefe t_2 in mm mit $v_2 = 1$ mm/min	t_{ges} in mm (gerundeter Wert, abhängig von tatsächlicher Rohdichte)	Prozesszeit Pressphase in s	Rückverformung nach 24 h in mm (Mittelwert aus $n=4$)	Presskraft in Stufe 1 und Stufe 2 in kN
Z 1	10	1	11	61	0,7	38 / 27
Z 2	8	3	11	180,8	0,52	25 / 28
Z 3	6	5	11	300,6	0,44	14 / 31
Z 4	4	7	11	420,4	0,44	12 / 27
Z 5	2	9	11	540,4	0,4	3 / 27
Einstufiges Verfahren	10,5 mit $v = 600$ mm/min		10,5	1	1,06	57,5
	10,5 mit $v = 1$ mm/min		10,5	630	0,45	30,5

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

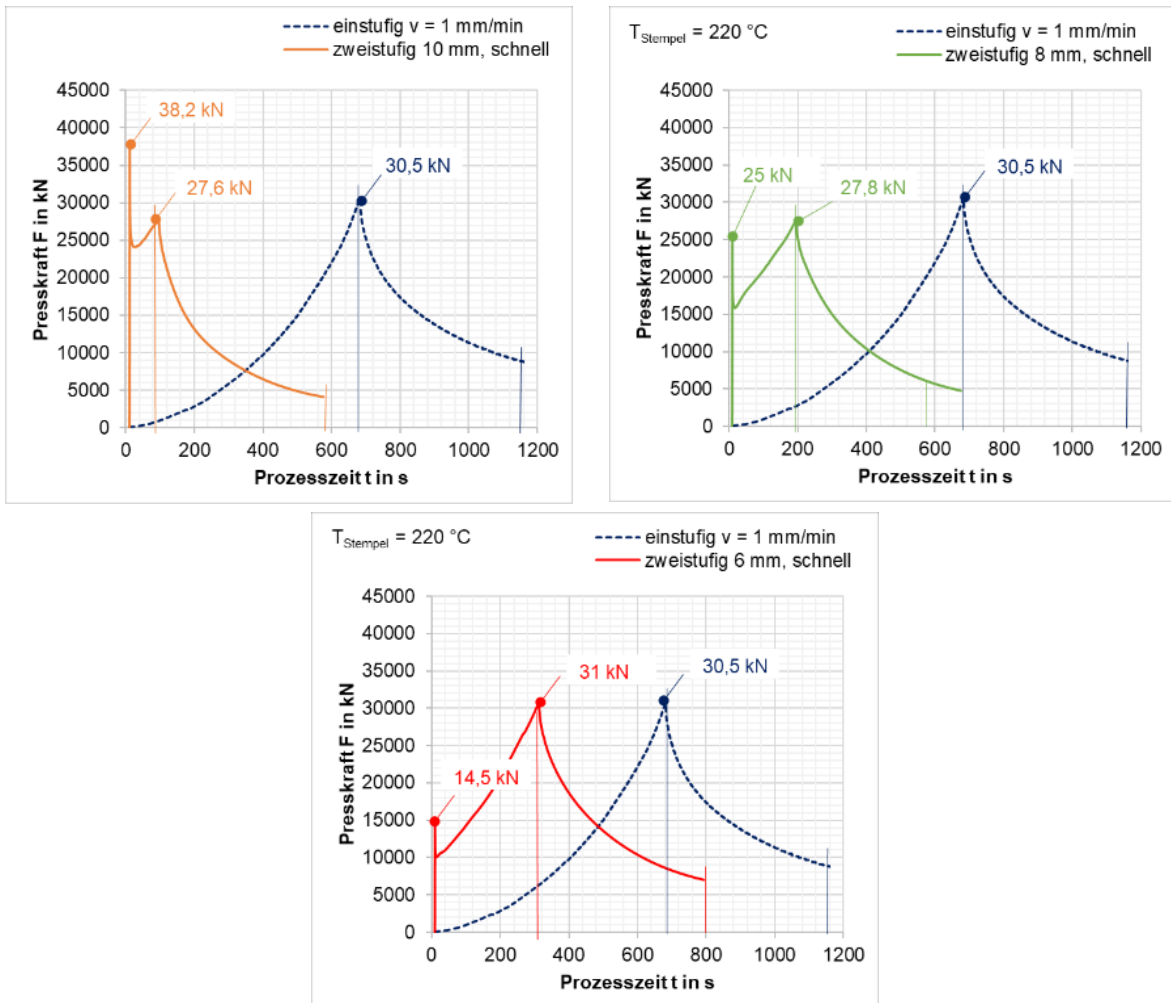


Bild 78: Presskraft-Zeit-Verlauf im zweistufigen axialen Verdichtungsprozess mit schnellem Vorschub auf 10 mm Tiefe (oben, links) auf 8 mm Tiefe (oben, rechts) und auf 6 mm Tiefe (unten)

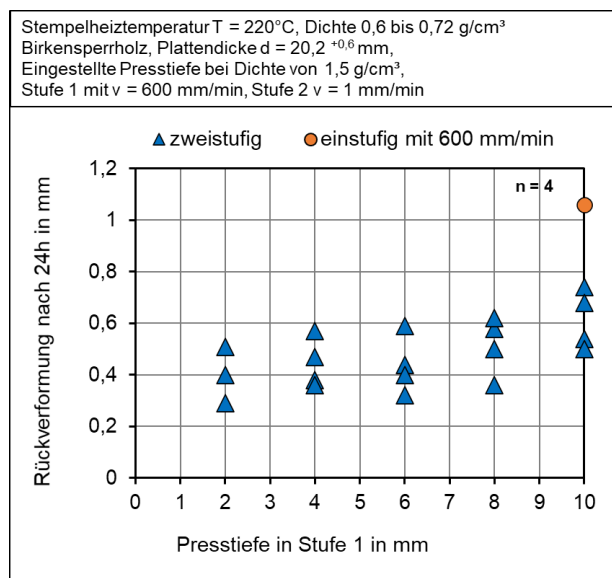


Bild 79: Rückverformung nach 24 h der Presslinge im zweistufigem verfahren in Abhängigkeit von der Presstiefe in Stufe 1

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Auf Basis dieser Ergebnisse ist die Verfahrensmodifikation des zweistufigen Verfahrens mit folgenden Parametern möglich:

- $T = 220 \text{ °C}$
- $t_1 \leq 8 \text{ mm}$ mit $v_1 = 600 \text{ mm/min}$
- $t_2 = t_{\text{ges}} - t_1$ mit $v_2 = 1 \text{ mm/min}$

Daraus resultiert eine Reduzierung der Prozesszeit in der Pressphase um 7,5 Minuten auf nunmehr 3 Minuten zuzüglich 6 Minuten in der Halte-/ Relaxationsphase. Das macht eine Gesamtprozesszeit von 9 Minuten.

Bild 80 stellt das Testergebnis des zweistufigen axialen Verdichtungsprozesses dem einstufigen axialen Verdichtungsprozess gegenüber. Durch die zweistufige Verfahrensführung konnte der thermisch geschädigte Bereich in der Kegelspitze vermieden werden und gleichzeitig die Prozesszeit von maximal 19 min auf 9 min reduziert werden. Das zweistufige axiale Verfahren ist auch auf das kombiniert axial-radiale Verfahren übertragbar, wurde aber noch nicht getestet.



Bild 80: Testergebnis zweistufiges Verfahren im Vergleich zum einstufigen Verfahren Parameter: $t_{\text{ges}} = 12 \text{ mm}$, $T = 220 \text{ °C}$, $v_1 = 600 \text{ mm/min}$ auf $t_1 = 4,5 \text{ mm}$ und $v_2 = 1 \text{ mm/min}$ auf t_{ges}

2.7 Implementierung in industrielle Fertigung (AP5)

Die Implementierung der radialen Verdichtung (Fließlochformen) in die industrielle Fertigung wurde bei einer konventionellen CNC-Holzbearbeitungsmaschine getestet, aber mit der sich entwickelnden Ergebnislage als technisch nicht sinnvoll erachtet.

Der axiale Verdichtungsprozess verlangt sehr hohe Presskräfte und im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren, wie dem Bohren und Fräsen, dennoch deutlich längere Prozesszeiten. Aus diesem Grund muss der Fertigungsablauf zur spanenden und umformenden Bearbeitung von Holzfurnierlagenverbundwerkstoffen entkoppelt werden. Hier bedarf es eines komplett neuen Anlagenkonzeptes, welche in weiterführenden Anschlussprojekten angegangen wird. Anforderung an die Anlage sind:

- hohe Presskräfte
- kurze Press- und Aufheizzeiten
- lokal flexibel einsetzbar
- hohe, angepasste Drehzahlen

2.8 Fertigungsrichtlinie (AP6)

Die Fertigungsrichtlinien für das radiale Verdichten (Fließlochformen) der axialen Verdichtung werden als allgemeine Regeln für das Verfahren aufgestellt, um diese sicher, effizient und als Ergebnis qualitativ hochwertige Verbindung von Werkstoffen zu gewährleisten. Dafür sind die wichtigsten Punkte in den folgenden Tabellen für die axiale Verdichtung zusammengefasst. Für die Kombinationsverdichtung gilt die niederschwelligere Schnittmenge aus beiden Richtlinien.

Tabelle 13 : Fertigungsrichtlinie radiale Verdichtung

Merkmal	Beschreibung
Werkstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • gesperrte Holzfurnierlagenwerkstoffe mit geringere Spaltneigung • Dichte unter 0,8 g/cm³ • Plattenstärke bis 40 mm
Ausgangsfeuchte	<ul style="list-style-type: none"> • $u = 7 - 10\%$ • entspricht Liefer- und Lagerzustand bei 20°C, 50% rel. LF und 20°C, 65% rel. LF
Werkzeug	<ul style="list-style-type: none"> • Fließlochdorn mit Dornspitzenwinkel 30°, • Oberflächenrauheit $R_z 3 \mu\text{m}$ für hohe Wiederholgenauigkeit • Baustahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit (50 W/mK) • Keine Edelstähle • integrierbarer Temperaturfühler
Prozessparameter	<ul style="list-style-type: none"> • thermisches Verfahren mit $n = 180 \text{ 1/min}$, def. Kraftgrenze (Dichte + Dornabhängig) Vorschub $v = 80 \text{ mm/min}$ $\rightarrow T = 195 \pm 19 \text{ °C}$ • schnelles Verfahren mit $n = 100 \text{ 1/min}$, def. Kraftgrenze (Dichte + Dornabhängig) Vorschub $v = 80 \text{ mm/min}$ $\rightarrow T = 162 \pm 25 \text{ °C}$
Vorbohrung	<ul style="list-style-type: none"> • ab Werkzeugdurchmesser über $D_D = 9 \text{ mm}$ • ab Materialstärke von kleiner $2 \times D_D$ • Vorbohrdurchmesser = $2/3 \times D_D$
Mindestabstand Werkstoffrand	$1,8 \times D_D$
Abstand untereinander	$3 \times D_D$

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Tabelle 14: Fertigungsrichtlinie axiale Verdichtung

Merkmal	Beschreibung
Werkstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • gesperrte Holzfurnierlagenwerkstoffe mit geringere Spaltneigung • Dichte unter 0,8 g/cm³ • Plattenstärke bis 21 mm, größere Plattenstärken verlangen die beidseitige axiale Verdichtung
Ausgangsfeuchte	<ul style="list-style-type: none"> • $u = 7 - 10\%$ • entspricht Liefer- und Lagerzustand bei 20°C, 50% rel. LF und 20°C, 65% rel. LF
Werkzeug	<ul style="list-style-type: none"> • Kegelwinkel als resultierender Wert unter 2%-Dehnung des Werkstoffes • $D_K = 80$ mm, Spitzenwinkel ca. 140° • Baustahl mit höherer Wärmeleitfähigkeit (50 W/mK) • keine Edelstähle • beheizbar mit Heizpatronen oder Induktion • integrierbarer Temperaturfühler
Prozessparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Stempelheiztemperatur $T_H = 220 - 250^\circ\text{C}$ • Pressgeschwindigkeit 1 mm/min am Ende der Pressphase • 2 Stufig mit $v_1 = 600$ mm/min möglich, mit umschalten auf $v_2 = 1$ mm/min zum Ende der Pressphase • weggeregelttes Verfahren mit Presstiefe als Zielgröße • maximale Presstiefe bei 1,5 g/cm³ • Presstiefe bei jeder Verdichtung aus Ausgangsdaten (Plattenstärke und Reindichte berechnen) • Haltedauer in Relaxationsphase 6 min • Relaxationsphase mit externer Kühlung
Mindestabstand Werkstoffrand	$1,1 \times D_K$
Abstand untereinander	D_K

2.9 Performancebewertung (AP6)

Die Performancebewertung stellt die Leistungsfähigkeit lokal verdichteter Verbindungsstellen unverdichteten konventionell gebohrten Verbindungsstellen gegenüber. Die Ergebnisse sind im Bericht in Kapitel 2.5 dargestellt und werden in nachstehender Tabelle zusammengefasst. Die unverdichtete Bohrung stellt stets die Referenz dar und ist für den Vergleich mit 100% beziffert. Für den Direktvergleich werden die Eigenschaften als prozentuale Werte angegeben. Zeilen in denen keine Eintragung vorhanden sind, wurde aus technischen Gründen und auf Basis der vorhergehenden Ergebnislage keine Kennwertbestimmung durchgeführt.

Die Bewertung fasst zusammen, dass die axiale Verdichtung eine überragende Verbesserung der Verbindungseigenschaften mit sich bringt, und dabei gleichzeitig das Leichtbaupotential der Holzwerkstoffe beibehält. Die radiale Verdichtung hat nur für Scherlochleibungsbeanspruchte Verbindungen einen positiven Effekt. Das ist an der Kennwertsteigerung der Lochleibungsfestigkeit zu erkennen. Darüber hinaus rechtfertigt der Nutzen der radialen Verdichtung nicht, den Mehraufwand, den der Prozess mit sich bringt. Die radiale Verdichtung

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

ist nur in Kombination mit der axialen Verdichtung technisch sinnvoll und für den Sonderfall, dass spanlose Bohrungen gesetzt werden sollen. Die kombinierte axiale-radiale Verdichtung ist nicht für Einschraubverbindung geeignet.

Tabelle 15: Performancebewertung der lokalen Verdichtungsstellen für eine Verschraubung mit $d = 6 \text{ mm}$ (rot = schlechter als Bezugswert, gelb = Bezugswert, grün = besser als Bezugswert)

Eigenschaft	unverdichtet	Lokal verdichtet		
	Bohrung	Radial Verdichtet (Fließloch)	Axial Verdichtet (+Bohrung)	Kombinierte, axial-radiale Verdichtung (Fließloch)
Maximal übertragbare Vorspannkraft in kN für Durchsteckschraubverbindungen (DSV)				
	4 kN (100%)	4 kN (100%)	12 kN (300%)	12 kN (300%)
Maximal übertragbare Vorspannkraft für Einschraubverbindungen mit Holzschrauben (bezogen auf Einschraublänge und Dichte)				
	0,4 (100%)	0,3 (75%)	0,85 (212%)	0,4 (100%)
Lochleibungsfestigkeit bei Proportionalitätsgrenze in N/mm²				
	45,25 (100%)	64,15 (142%)	99,2 (219%)	83,1 (179%)
Statischer Ausziehparameter Holzschraube f_{ax} in N/mm²				
	101,6 (100%)	85,4 (84%)	177 (174%)	88,1 (87%)
Statischer Ausziehparameter Gewindeeinsatz f_{ax} in N/mm²				
	24,6 (100%)	24,8 (101%)	77,5 (315%)	24 (97%)
Dynamischer Ausziehparameter Gewindeeinsatz f_{ax_dyn} in N/mm²				
	10,87 (100%)	11,75 (101%)	63,8 (587%)	-
Vorspannkraftverlust (geringere Werte sind besser)				
	64% (100%)	59% (92%)	35,5% (55%)	-
Vorspannkraftverlust im kritischen Klimaszenario von Normklima auf kalt/ trocken				
	0% F_{v_start} (100%)		50% F_{v_start} (500%)	
Maßhaltigkeit und Formabweichung der Verbindungsstelle (empirische Einschätzung und Messwerte aus Kapitel 2.5.1)				
	gut	schlecht	gut	schlecht

3 Zusammenfassung, Zielabgleich und offene Punkte

Im Projekt wurden lokale Verdichtungstechnologien für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (Wood Veneer Composite, kurz: WVC) hinsichtlich ihrer Prozessparameter und resultierenden Eigenschaften in der Verdichtungs- und Verbindungsstelle erforscht und weiterentwickelt. Diese Technologie ist der Schraubmontage vorgelagert und dient dem Zweck eine hochfeste Verbindungsstelle für vorgespannte Schraubverbindungen für das Anwendungsfeld im Maschinenbau herzustellen. Die Herstellung der lokalen Verdichtung erfolgt mit speziellen Press- und Rotationswerkzeugen unter Temperatur und Druck ausschließlich im abgegrenzten Bereich der Verbindungsstelle. Mit der lokalen Komprimierung des Holzwerkstoffes geht die Dichteerhöhung, die zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften führt, einher. Damit werden die Verbindungseigenschaften bei gleichzeitigem Erhalt des leichtbautechnischen Anwendungspotentials der Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe verbessert.

Es wurden die lokalen Verdichtungstechnologien in axialer Richtung, in radialer Richtung und deren Kombination auf vorgespannte Durchsteckschraubverbindungen (DSV) und relevante Einschraubverbindungen (ESV) im Anwendungsfeld des Maschinenbaus fokussiert. Die axiale Verdichtung beschreibt die Komprimierung der Holzwerkstoffstruktur mit der axialen Vorschubbewegung des Presswerkzeuges in Plattenebene. Im Plattenwerkstoff bleibt eine lokale Vertiefung in der Passivform des Presswerkzeuges bestehen. Die radiale Verdichtung, auch Fließlochformen genannt, beschreibt die Materialverdrängung in radialer Richtung des eindringenden Dorns. Es entsteht dabei ein spanlos erzeugtes Fließloch.

Es wurden die Prozessparameterinflüsse der Verdichtungsprozesse untersucht und die resultierenden Eigenschaften in der Verdichtungs- und Verbindungsstelle ermittelt. Die Untersuchung der Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung erfolgte für den jeweiligen Verdichtungsprozess unter Variation der relevanten Prozessparameter. Zur Beurteilung des Verdichtungsergebnisses wurden makroskopische und mikroskopische Strukturanalysen hinzugezogen, sowie die Rückverformung und die Prozesskräfte bewertet. Damit war es möglich ein vorteilhaftes Parameterfeld herauszuarbeiten und die Prozesszeit in beiden Verfahren zu reduzieren. Die vorteilhaften Parameter sind in der jeweiligen Fertigungsrichtlinie beschrieben und stehen Anwendern zur Verfügung.

Mit den Grundlagenergebnissen war es möglich eine Verfahrensmodifikation umzusetzen, welche die axiale und radiale Verdichtung mit Hilfe eines entwickelten Werkzeuges in einem Prozess kombiniert. Zusätzlich wurde der axiale Pressvorgang als zweistufiges Verfahren, mit einer schnellen und einer langsamen Pressphase ausgeführt. Das reduzierte erheblich die Presszeit und den Verfahrensaufwand. Die erarbeiteten Technologien können in die industrielle Fertigung implementiert werden. Hier bedarf es jedoch einer Großanlage, welche lokal flexibel, in sehr kurzer Zeit, hohe Presskräfte aufbringen kann.

Die Analyse der hochfesten Verbindungsstellen erfolgte anschließend hinsichtlich der Aspekte maximal übertragbarer Vorspannkraft, Vorspannkraftverlust, Reaktion ggü. des Klimaeinflusses sowie statisch-/ dynamischer Tragfähigkeit. Auf Basis der Ergebnisse wurde die Leistungsfähigkeit der lokal verdichteten Verbindungsstellen derer unverdichteten, gebohrten Verbindungsstellen gegenübergestellt und in einer Performanceübersicht zusammengefasst.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Nachfolgend ist der **Zielabgleich** der zu Projektbeginn formulierten Teilziele dargelegt.

Phase	Nr.	Ziel
I	1	Definition der Anforderungsliste und der Verbindungsgestaltung der Schraubstelle (einschnittige bzw. zweischnittige Schraubverbindung, Anbauteil, Randabstände, Einschraublänge, Durchmesser, ...) → erfüllt, Kapitel 2.1
II	2	Weiterentwicklung der Anlagentechnik und Verdichtungswerkzeuge zur Erfüllung einer wirtschaftlichen Prozessführungsstrategie → erfüllt, Kapitel 2.3 und Kapitel 2.6.1
III	3	Erforschung der Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung → erfüllt, Kapitel 2.4
	4	Finden technisch- wirtschaftlicher Verdichtungsparameter → erfüllt, Kapitel 2.4 und Kapitel 2.6.2
IV	5	Analyse der Lochgeometrie unter Berücksichtigung der thermischen Fixierung, der Rückverformung und des klimatischen Einflusses Finden der Geometrieabweichung zur Ableitung eines Toleranzfensters → teilweise erfüllt, Kapitel 2.5.1 und Kapitel 2.5.7 → die Definition des Toleranzfeldes ist aufgrund zu großer Maß- und Formabweichungen nicht sinnvoll.
	6	Beurteilung des Klimaeinflusses und der langzeitmechanischen Eigenschaften → Klimaeinfluss erfüllt, Kapitel 2.5.7
V	7	Umsetzung der Verfahrensmodifikation, d.h. Kombination der radialer-axialer Verdichtung → erfüllt, Kapitel 0
	8	Übertragung des lokalen Verdichtungsprozesses auf industrielle Fertigungsstandards → nicht erfüllt, da der Verdichtungsprozess eine Neuanlage fordert, die schnell, flexibel, sehr hohe Presskräfte aufbringen kann. Kapitel 2.7
VI	9	Ableitung einer Fertigungsrichtlinie → erfüllt, Kapitel 2.8
	10	Erstellen einer Performanceübersicht im Vergleich zu unverdichteten Schraubstellen → erfüllt, Kapitel 0

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Aus den Projektergebnissen und dem Zielabgleich lassen sich folgende **offene Punkte** formulieren, die in weiterführenden Aufgabenstellungen zu klären sind:

1. **Neuanlage für Verdichtungsprozess:** Der Vergleich der ermittelten Presskräfte und die ertragbaren Kräfte auf einer CNC-Holzbearbeitungsmaschine hat gezeigt, dass der Verdichtungsprozess nicht in die bestehende Fertigungsanlagentechnik integriert werden kann. Es erfordert eine Anlage, die in sehr kurzer Zeit, lokal flexibel sowohl in der rotatorischen Bewegung hohe, angepasste Drehzahlen als auch im axialen Vorschub Presskräfte realisieren kann.
2. **Integration des Verdichtungsprozesses mit der Schraubmontage:**
Die Integration mit der Schraubmontage kann aufgrund zu hoher Presskräfte und aktuell nicht verfügbarer Maschinenteknik nicht realisiert werden. Die Kombination mit der Schraubmontage muss im Anschluss an die neukonzipierte Anlage aus 1. überdacht werden.
3. **Größere Schraubendurchmesser:** Die bisherigen Untersuchungen und Werkzeugentwicklung basieren auf Schraubstellen mit der Schraubennenngröße von $d = 6$ mm. Die Technologie muss auf Schraubennenngrößen bis mindestens M10 ausgedehnt werden. Dafür muss die Skalierung des Verdichtungswerkzeuges sowohl hinsichtlich des Dornes als auch des Verdichtungskegels erfolgen.
4. **Dynamisch höher belastbare Verbindungsmittel und Ermüdungseigenschaften:** Die Durchführung der dynamischen Laststeigerungsversuche hat gezeigt, dass die bisher auf dem Markt verfügbaren Verbindungsmittel der Holzwerkstoffbranche für den dynamischen Lastfall eine zu geringe Festigkeit aufweisen. Es werden für den dynamischen Lastfall holzwerkstoffspezifische hochfeste Verbindungsmittel benötigt. Im Anschluss daran müssen die Ermüdungseigenschaften (Dauerfestigkeitsgrenze) für den sicheren Einsatz noch ermittelt werden.

4 Verwertung und Veröffentlichung

Im Rahmen des Projektes wurden folgende **Verwertungsaktivitäten** getätigt:

Tabelle 16: Verwertungsaktivitäten

Kategorie	Aktivität	Zeitpunkt
Wissenschaftliche Verwertung	Teilaspekte der Projektergebnisse wurden für die wissenschaftliche Weiterqualifikation und Veröffentlichungen genutzt.	2022 – 2026
Öffentlichkeitsarbeit	Tagungsbesuche mit Veröffentlichungen der Projektergebnisse werden nach Projektende und nach Erteilung der Schutzrechte umgesetzt.	2025 – 2027
Lehre	Die Ergebnisse fließen in die Vorlesungen zu „Holzwerkstoffen im Maschinenbau“ und „organische Werkstoffe“ der TU Chemnitz ein.	laufend
Folgeprojekte	Es lassen sich aus den offenen Punkten des Projektes mehrere Folgeprojekte generieren. Dazu zählt u.a. die dynamische Tragfähigkeit einer maschinenbaurelevanten Holzwerkstoffverbindungstechnik. Sowie die Entwicklung der Maschinenteknik zur Umsetzung der axialen und kombiniert axialen-radialen Verdichtungstechnologie	2024 - 2027
Industrieanwendung	Der Einsatz und die Anwendung der Verdichtungstechnologie ist durch die Firma Ligenium GmbH gesichert. Mit der erarbeiteten Fertigungsrichtlinie zur Herstellung lokal verdichtete Verbindungsstellen ist die Grundlage zur Prozessführung gesetzt.	ab 2025

Wissenschaftlich, technische, wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Es wurde der lokale Verdichtungsprozess hinsichtlich seiner Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung erforscht, darauf ableitend eine Fertigungsrichtlinie mit einem vorteilhaften Parameterfeld abgeleitet und die Performance der lokalen Schraubstellen herausgearbeitet. Im Rahmen dieser Tätigkeit wurde Knowhow erarbeitet welches Fügetechnikern und Anwendern zur Verfügung steht. Mit den Verfahrensmodifikationen aus kombiniert axialer- radialer Verdichtung und dem zweistufigen Pressvorgang war es möglich die Fertigungszeit erheblich zu kürzen. Der erreichte geringere Vorspannkraftverlust in der lokal verdichteten Verbindungsstelle schafft für den Praxiseinsatz größere Sicherheit und baut damit weiter kritische Vorurteile ab, die den Praxiseinsatz von Holzwerkstoffen im technischen Bereich hindern.

Mit der Herstellung hochfester Verbindungsstellen, besonders durch die axiale lokale Verdichtung werden Schraubstellen mit hohen übertragbaren Vorspannkraften in Holzwerkstoffen auf dem Niveau wie die von Metallwerkstoffen realistisch. Damit stellt die Verbindungsstelle womöglich nicht mehr die Schwachstelle in der Holzbaugruppe dar. Gleichzeitig bleibt das leichtbautechnische Potential des Werkstoffes erhalten.

Daraus eröffnen sich weitere Anwendungsbaugruppen und Substitutionsmöglichkeiten, die den Holzwerkstoffeinsatz und -absatz als Konstruktionswerkstoff im Maschinenbau steigern.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

Davon profitieren entlang der gesamten Wertschöpfungskette folgende Industriezweige und Anwendergruppen:

- Einheimische Forstwirtschaft
- Anlagenbau Holzwerkstoffindustrie und Füge-technik
- Klebstoffindustrie (incl. Zuschlagstoffe) im weiteren Sinn
- Hersteller, Lieferanten von Holzwerkstoffen
- Hersteller, Lieferanten von Verbindungsmitteln
- Füge- und Montagetechniker
- Anwender

Die Märkte für Holzwerkstoffe, Verbindungsmitteln und Füge-technik werden gesichert und inbegriffene Arbeitsplätze bleiben am Wirtschaftsstandort Deutschland erhalten.

Es wurde eine wirtschaftliche Verdichtungstechnologie geschaffen, welche mit der dafür notwendigen Anlagenentwicklung in einen wirtschaftlich herstellbaren Industriestandart überführt werden kann. Die radiale Verdichtung als Einzelverfahren stellt aufgrund seines technischen Nutzens in der Verbindungsstelle keinen nennenswerten Vorteil gegenüber dem konventionellen Bohren dar. Nur in Kombination mit der axialen Verdichtung ist der technisch-wirtschaftliche Mehrwert gegeben, da während der axialen Verdichtung gleichzeitig die Bohrungen gesetzt werden.

Veröffentlichung

Die Patente zur lokalen Verdichtung WO002021018354A1, US020220274282A1, EP000004007683B1 wurden erteilt. Eine weitere Veröffentlichung wurde 2023 mit der Dissertationsschrift von Herrn Dr.-Ing. Eric Penno mit dem Titel, „Prozesseinflussgrößen zum Fließlochformen in Holzwerkstoffe“ publiziert. Neben dem folgenden Beitrag sind weitere Veröffentlichungen noch geplant.

Penno, E.: Prozesseinflussgrößen zum Fließlochformen in Holzwerkstoffe – ein Überblick. Tagungsband des 21. Holztechnologischen Kolloquiums Dresden. TU Dresden. 21/2024. S. 65 – 72. ISBN 978-3-86780-774-6.

Eichhorn, S.; et. al.: Holz im Maschinenbau – Auswahl aktueller Anwendungen und neuer Entwicklungen aus Chemnitz – ein Überblick. Tagungsband des 21. Holztechnologischen Kolloquiums Dresden. TU Dresden. 21/2024. S. 13 – 21. ISBN 978-3-86780-774-6.

5 Erkenntnisse von Dritten

Aufbauend auf den Stand der Technik sind keine weiteren Erkenntnisse Dritter zu lokalen Verdichtungstechnologien, deren Prozessführung und resultierenden Verbindungseigenschaften vorhanden.

6 Literaturverzeichnis

- [Alb21] N.N.: Leichtbau leicht gemacht mit Albasia. Online unter <https://www.juergensen.de/news/leichtbau-leicht-gemacht-mit-albasia/>. Zugriff am 19.2.2021.
- [Alt16] Alt, C., Schmeing, M.: Dynamisch belastbare hochfeste Verbindungen durch Fließlochformen für Gestellsysteme aus Holzwerkstoffen. Aif ZIM, KF215350 FH 3. 2016.
- [Alt19] Alt, C.; et. Al: Bauteile aus einem Werkstoff, der überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen besteht, mit mindestens einem verdichteten Bereich sowie Verfahren und Werkzeug zum Herstellen des verdichteten Bereiches. Patent DE102019120850A1, 01.08.2019
- [Aug88a] Augustin, Hans u. a.: Holz-Lexikon: Nachschlagewerk für die Holz- und Forstwirtschaft, Band 1, 3. Auflage, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1988.
- [Bac84] Bachmann, G.; Fischer, R.: Holzbearbeitung, Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1984.
- [DIN322] DIN EN 322 (1993) Holzwerkstoffe – Bestimmung des Feuchtegehaltes; Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth-Verlag.
- [DIN320] DIN EN ISO 320 (2011): Verfahren zur Prüfung des achsenparallelen Schraubenausziehdrehwiderstands an Faserplatten und Spanplatten; Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth-Verlag.
- [DIN1382] DIN EN ISO 1382 (2016) Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmittelelementen; Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth-Verlag.
- [DIN16047] DIN EN ISO 16047 (2012) Verbindungselemente - Drehmoment/Vorspannkraft-Versuch, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth-Verlag.
- [DIN1995] DIN EN 1995-1-1 (2010) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, S. 26
- [Eck12] Eckardt, R.: Untersuchungen an Verbindungselementen für Holzkonstruktionen im Maschinen- und Anlagenbau: Dissertation, 2012. TU Chemnitz.
- [Ehr93] Ehrenstein, G. W.: Hysteresis-Messverfahren, das flexible Verfahren zur dynamischen Werkstoff- und Bauteilprüfung nach R. Renz. ISBN 3-9802740-4-7.1993.
- [Eic17] Eichhorn, S.; et. Al: Substitution energieintensiver Stahl- und Aluminiumwerkstoffe durch nachwachsende Rohstoffe in der Fördertechnik – SubSTANCE. Abschlussbericht FNR 2017.
- [Guo20] Guo, J.; Chen, X.; Wang, J.; He, Y.; Xie, H.; Zheng, Q.: The Influence of Compatibility on the Structure and Properties of PLA/Lignin Biocomposites by Chemical Modification, <https://doi.org/10.3390/polym12010056>, 2020.
- [Hei94] Heisel, U.; Eggert, O.: Holzbiegen. Ein umweltfreundliches und zugleich modernes Produktionsverfahren. HK 1/94 s. 56 – 59. 1994
- [Klu21] Kluge, P.; et. al.: Normalklima für den Einsatz von Holzwerkstoffen in technische Anwendungen des Maschinenbaus. Holztechnologie, 3/2021 S. 38.
- [Kol51] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Band 1, Heidelberg: Springer Verlag Heidelberg, 1951.
- [LiG] Exist Forschungstransfer Projekt LiGenium, FKZ: 03EFISN106 bzw. FKZ 03EUISN106, Projektträger Jülich (PTJ), BMWi.

Hochfeste Verbindungsstellen für Holzfurnierlagenverbundwerkstoffe (WVC)

- [Mai15] Maier, M.: Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise für bionischen Leichtbau. Dissertation Universität Bremen, 2015.
- [May21] Mayrhofer, T.: Rheologie von Lignin als Ausgangsstoff für biobasierte Kohlenstofffasern, Diplomarbeit, Universität Linz, 2021.
- [Mue15] Müller, C.: Untersuchung von Holzwerkstoffen unter Schlagbelastung zur Beurteilung der Werkstoffeignung für den Maschinenbau. Dissertation 2015.
- [Nie93] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen. 1993.
- [Neu17] Neuhaus, H.: Ingenieurholzbau: Grundlagen-Bemessung-Nachweis-Beispiele, 4. Auflage, Wiesbaden. GWV Fachverlag, 2017.
- [NN21] N.N.: Dehonit Kunstharzpressholz. Firmenauftritt. Unter <https://www.dehonit.de/>. Zugriff am 11.2.2021.
- [Pen23] Penno, E.: Prozesseinflussgrößen zum Fließlochformen in Holzwerkstoffe. Dissertation 2023, TU Chemnitz.
- [Sal90] Salmén, L. On the Interaction Between Moisture and Wood Fibre Materials. MRS Online Proceedings Library 197, 193–201 (1990). <https://doi.org/10.1557/PROC-197-193>
- [Sch20] Schubert, C.: Untersuchung an Einschraubverbindungen für hochgefüllte, extrudierte Holz-Polymer-Werkstoffe zum Einsatz in der Fördertechnik. Dissertation 2020, TU Chemnitz.
- [Sch24] Schubert, C. Kluge, P.: Dynamische Tragfähigkeit des WPC-Strukturhohlprofils unter schwingender Dreipunktbiegebelastung. Holztechnologisches Kolloquium, Dresden, 2024.
- [Wag08] Wagenführ, A.; Frieder, S.: Taschenbuch der Holztechnik. Carl Hanser Verlag München, 2008.
- [Wag12] Wagenführ, André, Scholz, Frieder: Taschenbuch der Holztechnik, 2. Auflage, Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2012.