

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Lösbare Verbindungstechnik für Bauteile aus Wood Polymer Composite (WPC) unter dynamischen Belastungen**

Zuwendungsempfänger:

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

Förderkennzeichen:

**22001814**

Laufzeit:

**01.09.2014 bis 31.08.2017**

Monat der Erstellung:

**04/2018**

Datum der Veröffentlichung:

**17.08.2018**

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.

Zuwendungsempfänger:	TU Chemnitz, Professur Fördertechnik, Forschungsgruppe Anwendungstechnik Erneuerbarer Werkstoffe
Förderkennzeichen:	FKZ: 22001814
Vorhabenbezeichnung:	Lösbare Verbindungstechnik für Bauteile aus Wood Polymer Composite (WPC) unter dynamischen Belastungen
Laufzeit des Vorhabens:	01.09.2014 – 31.08.2017
Bereichszeitraum	01.09.2014 – 31.08.2017
Projektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel
Projektkoordination:	Dipl.-Ing. Christine Schubert (christine.schubert@mb.tu-chemnitz.de)
Inhaltliche Bearbeitung:	Dipl.-Ing. Christine Schubert M. Sc. Armin Schleinitz Dipl.-Ing. Patrick Kluge Dr.-Ing. Sven Eichhorn
Industriepartner	NOVO-TECH GmbH & Co.KG, Aschersleben
Bibliografische Angaben	
Autoren:	Schubert, Christine; Schleinitz, Armin; Kluge, Patrick; Eichhorn, Sven TU Chemnitz, Professur Fördertechnik
Titel:	Lösbare Verbindungstechnik für Bauteile aus Wood Polymer Composite (WPC) unter dynamischen Belastungen  87 Seiten, 74 Abbildungen, 35 Tabellen
Schlagworte:	Holz-Polymer-Werkstoff, WPC, Extrusionsprofile, Durchsteckschraubverbindung, Quergewindebolzen, Direktverschraubung, Einschraubverbindung
Keywords:	Wood Polymer Composite, WPC, extrusion profile, push-through screw connection, cross-thread bolts, self-tapping screws, screw-in connection

---

Projektleiter: TU Chemnitz

### **Projektbeschreibung:**

Im Projekt wurden lösbare Verbindungstechniken für hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe für das statisch-dynamische Belastungskollektiv des Maschinenbaus erarbeitet. Im Fokus der Untersuchungen standen vorgespannte Schraubverbindungen in den konstruktiven Ausführungen als Durchsteckschraubverbindung und Einschraubverbindungen. Die Direktverschraubung und die Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung wurden aus technisch-wirtschaftlicher Sicht für den Werkstoff als Sonderverfahren der Einschraubverbindung favorisiert. Für die benannten Verschraubungsarten wurden Montageempfehlungen, Grenzlastbereiche und Einflussfaktoren der Verbindungen unter Berücksichtigung des Werkstoffes erarbeitet. Abschließend wurden die erarbeiteten Kenntnisse zu lösbaren Verbindungstechniken auf einen Demonstrator in der Fördertechnik übertragen.

### **Projektergebnisse:**

1. Methodische Auswahl lösbarer Verbindungstechniken und Bewertung
2. Materialanalyse und Bewertung handelsüblicher Holz-Polymer-Werkstoffe nach Qualitätskriterien für den Einsatz im Maschinenbau
3. Untersuchung konstruktiver, werkstofftypischer und montagetechnischer Einflüsse auf die Verschraubungsarten:
  - a. Durchsteckschraubverbindung
  - b. Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben (Direktverschraubung)
  - c. Einschraubverbindung mit Quergewindebolzen
4. Charakterisierung der Wirkung äußerer Umwelteinflüsse auf die Verschraubungsarten
5. Übertragung einer lösbaren Verbindungstechnik auf den Demonstrator und Umgestaltung für den Dauerlaufstest

### **Project objective:**

In the project removable connection methods for high filled wood polymer composites for static and dynamic loads were worked out. The focuses of studies were pre-stressed screw connections in a constructive style as push-through screw connection and screw in connection. On the basis of the material and the technical-economic reasons the "direct-screw-connection" and "cross-threaded bolt plug-in screw connection" were favored as a special method of the screw-in connection. Installation recommendations, limit load ranges and influencing factors of the connections based on the material were compiled for the named types of bolting. Finally the compiled knowledges of the removable connections were transferred into demonstrator for conveying systems.

### **Project results:**

1. Methodically selection of removable connection and evaluation
2. The analyse of material and the evaluation of commercial wood polymer products for the use in mechanical engineering
3. Study of constructive, material-typical and assembly-typical effects of the connection methods:
  - a. Push-through screw connection
  - b. direct screw-in connection with self-tapping screws
  - c. screw-in connection with cross-thread bolts
4. Characterization of the effect of external environmental influences on connection methods
5. Transfer one of the connection methods on a demonstrator in the field of conveying systems and the remodelling for durability test.

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen.....	6
1 Aufgabenstellung.....	8
1.1 Problemstellung.....	8
1.2 Zielstellung.....	8
1.3 Lösungsweg und Projektablauf .....	9
2 Stand der Technik.....	11
2.1 Branchenübergreifende lösbare Verbindungstechnik im Maschinen- und Holzbau sowie der Kunststofftechnik .....	11
2.2 Patentrecherche .....	14
2.3 Praktizierte lösbare Verbindungstechnik für Holz-Polymer-Werkstoffe.....	15
3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	19
4 Ergebnisse.....	19
4.1 Konkretisierung der Verbindungstechnik/ Fügeverfahren .....	19
4.1.1 Anforderungsliste.....	19
4.1.2 Werkstoffspezifische Eigenschaften.....	20
4.1.3 Nutzwertanalyse .....	21
4.1.4 Bewertung aktueller Lösungen aus dem Stand der Technik.....	23
4.1.5 Konkretisierung Fügeverfahren (Teilziel 1).....	24
4.2 Dynamischer Kurzzeitversuch .....	24
4.3 Materialauswahl, Probenvorbereitung und Richtungsfestlegung .....	28
4.4 Mechanische Eigenschaften eingesetzter Werkstoffe.....	29
4.4.1 Drei-Punkt-Biegung .....	29
4.4.2 Zugversuch .....	32
4.4.3 Druckversuch.....	32
4.4.4 Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit .....	34
4.5 Durchsteckschraubverbindungen .....	35
4.5.1 Prinzip Fügeverfahren (Grundlagen) .....	35
4.5.2 Anzugversuche und Schadensmechanismus .....	36
4.5.3 Anziehmoment-Vorspannkraft-Kurven .....	39
4.5.4 Vorspannkraftrelaxation.....	39
4.5.5 Nachziehen der Schraubverbindung .....	40
4.5.6 Vorspannkraftverlauf mit Überspannen und Schraubennachzug.....	42
4.6 Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben.....	43
4.6.1 Prinzip Fügeverfahren (Grundlagen) .....	43

4.6.2	Versuchsbeschreibung .....	46
4.6.3	Einfluss der Schraubengeometrie, Kernlochdurchmesser, Werkstoff .....	47
4.6.4	Einfluss der Einschraubrichtung auf die Einschraubtiefe .....	49
4.6.5	Einfluss der Einschraubrichtung auf die Bauteildicke.....	51
4.6.6	Montagedrehzahl .....	52
4.6.7	Montageempfehlungen von gewindeformenden Schrauben in WPC .....	53
4.7	Einschraubverbindungen mit Quergewindebolzen.....	53
4.7.1	Prinzip Fügeverfahren (Grundlagen) .....	53
4.7.2	Versuchsbeschreibung .....	54
4.7.3	Bolzendurchmesser $D_1$ und Eindringtiefe $e$ .....	55
4.7.4	Randabstand $w$ .....	56
4.7.5	Bauteildicke $t$ .....	57
4.7.6	Einfluss der Einschraubrichtung und des Holz-Polymer-Werkstoffes .....	58
4.7.7	Montageempfehlungen für Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung .....	60
4.8	Verbindungsvergleich beider Einschraubverbindungen .....	61
4.8.1	Anziehmoment-Vorspannkraft-Kurven .....	61
4.8.2	Statische Auszugversuche im vorgespannten Zustand .....	62
4.8.3	Dynamische Laststeigerungsversuche im vorgespannten Zustand .....	64
4.8.4	Vorspannkraftrelaxation von Einschraubverbindungen.....	67
4.9	Äußere Einflüsse auf die Tragfähigkeit .....	68
4.9.1	Einfluss der Materialfeuchtigkeit, Kaltwasserlagerung .....	68
4.9.2	UV- Globalwitterung.....	72
4.9.3	Klimawechseltest .....	74
4.9.4	Zusammenfassung äußere Einflüsse .....	76
4.10	Übertragung der Vorzugsvariante auf technische Anwendung .....	76
4.11	Demonstratortest unter praxisnahen Bedingungen.....	81
5	Verwertung .....	83
6	Erkenntnisse von Dritten .....	84
7	Veröffentlichungen.....	84
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	85
9	Literaturverzeichnis .....	86

## Abkürzungen

$A_{ef}$	Effektive tragende Fläche
$A_{proj}$	Projizierte Fläche
B	Bauteilbreite
$D_1$	Bolzendurchmesser
$d_1$	Nenndurchmesser Schraube
$D_2$	Durchmesser Sacklochbohrung
$d_k$	Kernlochdurchmesser = $d_b$
dM	Momentendifferenz
DSV	Durchsteckschraubverbindung
e	Eindringtiefe
ESV	Einschraubverbindung
ESV-GFS	Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben
ESV-QGB	Einschraubverbindungen mit Quergewindebolzen
$f_{ax}$	Statischer Ausziehparameter
$F_{dyn}$	Dynamische Auszugkraft
$F_{klemm}$	Klemmkraft
$F_{max}$	Maximalkraft
$F_o$	Oberlast
$F_{stat}$	Statische Auszugkraft
$F_u$	Unterlast
$F_v$	Vorspannkraft
GFS	Gewindeformende Schraube
HT	Holztechnik
KT	Kunststofftechnik
L	Probenlänge
l	Bolzenlänge
$l_E$	Einschraublänge
LW	Lastwechsel
$M_A$	Anzugsmoment
MB	Maschinenbau
MDF	Mitteldichtefaserplatte
$M_E$	Eindrehmoment
$M_L$	Lösemoment
$M_{\ddot{u}}$	Überdrehmoment
$\mu_H$	Haftreibwert
OSB	Oriented Strand Board
PSE	Platte senkrecht zur Extrusionsrichtung
QGB	Quergewindebolzen
R	Spannungsverhältnis
SSE	Scheibe senkrecht zur Extrusion
SPE	Scheibe parallel zur Extrusionsrichtung
t	Bauteildicke
V	Prüfgeschwindigkeit
VBT	Verbindungstechnik

VBM	Verbindungsmittel
w	Randabstand
WPC	Wood Polymer Composite, deutsch Holz-Polymer-Werkstoff
WVC	Wood Veneer Composite
WVC-RIP	Birkensperrholz Rigaply
WVC-KHP	Kunstharzpressholz

# 1 Aufgabenstellung

## 1.1 Problemstellung

Bauteile aus Holz-Polymer-Werkstoffen haben sich als Extrusionsprofile insbesondere als Substitutionswerkstoff für Tropenhölzer im Deckingbereich etabliert. Trotz guter mechanischer Eigenschaften tangieren die Holz-Polymer-Extrusionsprofile nur den technischen Anwendungssektor. Auf Seiten der WPC-Hersteller besteht zwar die Motivation, mit ihren Profilen in den technischen Anwendungssektor vorzudringen, das Ziel konnte aber noch nicht erreicht werden.

Die Voraussetzungen Holz-Verbundwerkstoffe im technischen Sektor zu etablieren sind, eine reproduzierbare prozesssichere Werkstoffverarbeitung und eine an den Werkstoff angepasste Verbindungstechnik. Hierfür sind für den Werkstoff und für deren Verbindungstechnik berechenbare mechanische Eigenschaften, feste Toleranzbereiche und eine transparente Verfahrensführung notwendig.

Für modulare Förder- und Gestellsysteme im Maschinen- und Anlagenbau ist eine lösbare kraftschlüssige Verbindungstechnik am relevantesten, da stets statisch und dynamisch überlagerte Betriebskräfte von Bauteil A auf Bauteil B übertragen werden müssen. Die Anforderung an eine wirtschaftliche Verbindungstechnik und einfache Montage/ Demontage artgleicher und artfremder Werkstoffe ist zusätzlich gegeben.

Für WPC-Profile stellt die hinsichtlich ihrer Einflussgrößen und Anwendungsgrenzen unerforschte lösbare Verbindungstechnik ein Hindernis dar. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann nicht abgeschätzt werden wie lange eine lösbare Verbindung bei WPC-Bauteilen unter statisch- und dynamischen Belastungskollektiven standhält. Bisher fehlende Montagevorschriften und Untersuchung werkstofftypischer Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit der lösbaren Verbindungen ziehen ein vorzeitiges Versagen der Verbindungsstelle sowohl im Montage- als auch im Betriebszustand nach sich. Trotz der steigenden Anwendung von WPC liegen aktuell keine systematischen Erkenntnisse über das mechanische Verhalten der lösbaren Verbindungstechnik vor. Zur Tragfähigkeit kraftschlüssiger und formschlüssiger Verbindungen existieren für die Werkstoffgruppe keine systematischen Erkenntnisse.

## 1.2 Zielstellung

Die übergeordnete Zielstellung des Vorhabens ist das Ermitteln des mechanischen Verhaltens lösbar verbundener Holz-Polymer-Bauteile unter statisch- und dynamischen Belastungen. Damit soll eine technisch und wirtschaftlich vorteilhafte Verbindungstechnik für den Holz-Polymerwerkstoff erarbeitet werden.

Zentraler Forschungsgegenstand ist es, systematische Zusammenhänge zwischen dem Fügeverfahren, dem notwendigen Verbindungsmittel und dem Holz-Polymer-Werkstoff zu klären, um dem Anwender Montagempfehlungen zu erarbeiten.

Angestrebt wird eine schnell montierbare, lösbare Verbindungstechnik für Holz-Polymer-Werkstoffe, welche den Grenzlastbereich statischer und dynamischer Kennwerte maximiert und somit zur Verbesserung derzeitiger Anwendungen beiträgt. Der Einsatzbereich umfasst



die (Weiter)-Entwicklung technischer Bauteile (z.B. Trag- und Gleitelement) sowie Gestell- und Montagesysteme aus WPC für intralogistische Anlagen. Es ergeben sich die Teilfragestellungen in Tabelle 1.

TABELLE 1: FORSCHUNGSGEGENSTAND UND TEILZIELE DES VORHABENS

<b>Forschungsgegenstand:</b>	<b>Teilziel:</b>
Welche Verbindungstechnik kann bei WPC angewendet werden?	1 Konkretisierung der Verbindungsart / Fügeverfahren
Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Holz-Polymer-Rezeptur und dem zu wählenden Verbindungsmittel?  Sind die Montageempfehlungen auf andere Holz-Polymerwerkstoffe übertragbar?	2 Ermittlung von Vorzugsrezepturen und deren Verbindungsart  Bzw. 3 Übertragbarkeit auf andere Holz-Polymer-Werkstoffe
Welcher Grenzlasterbereich und Versagensmechanismus liegt vor?	4 Festlegung von Einsatzgrenzen
Welches Verbindungsmittel ist das technisch vorteilhafteste unter statischen und dynamischen Belastungen?	5 vorteilhaftes Verbindungsmittel 6 Ableitung Montageempfehlungen
In welchem Maße wirken die Einflussfaktoren (z. B. Zeit, Temperatur, Feuchte, ...) auf die Tragfähigkeit der Verbindung?	7 Qualitative Abminderungsfaktoren zur Auslegung der Verbindung

### 1.3 Lösungsweg und Projektablauf

Das Forschungsvorhaben wurde nach der Trichtermethode (Abbildung 1) bearbeitet, um zielorientiert mit Hilfe festgelegter Kriterien die vorteilhafte lösbare Verbindungstechnik herauszufiltern. Die Beurteilungskriterien werden mit Fortschreiten der Ergebnislage erweitert. Als Ansatzpunkt sind Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln aus dem Maschinen- und Anlagenbau sowie der Holz- und Kunststofftechnik favorisiert.

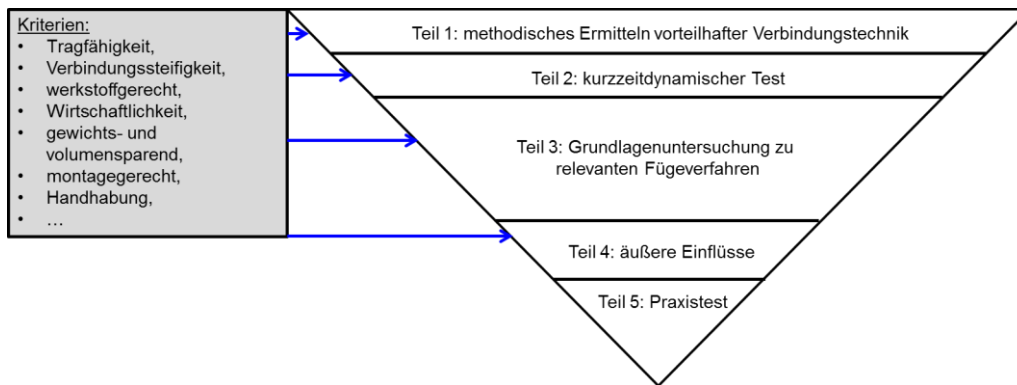


ABBILDUNG 1: LÖSUNGSWEG, SCHEMATISCHES VORGEHEN

Teil 1: Zunächst wurden die Anforderungen und Bewertungskriterien für eine lösbare Verbindungstechnik von Holz-Polymer-Werkstoffen in statisch- und dynamisch beanspruchten Anwendungen festgelegt. Nach Darstellung der Ausgangssituation in Form von Recherchen zum Stand der Technik und Patentrecherchen wurden alle in Frage kommenden lösbaren Fügeverfahren einer Nutzwertanalyse nach DIN 8593 [1] unterzogen. Das daraus hervorgehende Fügeverfahren wurde im folgenden Projektteil detaillierter analysiert.

➔ Zwischenergebnis: Schrauben, Verspannen

Teil 2: Im zweiten Teil des Projektes diente der kurzzeitdynamische Versuch über 100.000 Lastwechsel (LW) dazu, die prinzipielle Anwendbarkeit des Fügeverfahrens unter dynamischer Beanspruchung nachzuweisen und ggf. Schwachstellen in der Montage herauszuarbeiten, die im folgenden Grundlagenteil untersuchungsrelevant sind.

➔ Zwischenergebnis: vorgespannte Einschraubverbindungen Direktverschraubung  
vorgespannte Einschraubverbindungen mit Zusatzelement  
vorgespannte Durchsteckschraubverbindungen

Teil 3: Der dritte Teil des Projektes ist gekennzeichnet durch die Grundlagenuntersuchung der in Teil 2 benannten Fügeverfahren und den eingesetzten Holz-Polymer-Werkstoffen. Hinzugezogen werden Holz-Polymer-Extrusionsprofile verschiedener Hersteller, welche hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in technischen Bereichen werkstofftechnisch analysiert worden. Hierfür wurden Bewertungskriterien für hochwertige Holz-Polymer-Werkstoffe erarbeitet. Für die Tragfähigkeitsuntersuchung der Schraubverbindungen im Montage und Betriebszustand wurden statische Auszugversuche und Montageversuche (Überdreh- und Anzugsversuche) durchgeführt. Zentraler Arbeitsgegenstand war eine EC-Schraubspindel der Firma Bosch/Rexroth. Damit ist zum einen ein definierter Einschraub- und Anziehvorgang der Schraubverbindung möglich und zum anderen die Voraussetzung für Montageparametervariationen gegeben. Ziel der Montageoptimierung war es, die Schraubenvorspannkraft zu maximieren. Nach der Optimierung der Montageparameter jeder Schraubverbindung wurden die Vorzugsvarianten einem dynamischen Laststeigerungsversuch unterzogen, um die dynamischen Lastgrenzen der Verbindung zu erarbeiten.

Teil 4: Für den praktischen Einsatz der Schraubverbindungen in Holz-Polymer-Werkstoffen wurde im vierten Teil der quantitative Einfluss von Temperatur, Zeit, und Feuchtigkeit, als werkstofftypische Besonderheit auf die Tragfähigkeit der Verbindung analysiert. Dabei wurden Relaxationsversuche, Montageversuche und Schraubenauszugversuche an durch äußere Einflüsse geschädigte Proben und ungeschädigten Proben durchgeführt. Die äußeren Einflüsse wurden in den Auslagerungsversuchen UV-Global-Bewitterung, Kaltwasserlagerung und Klimawechseltest auf Basis des Gütesiegels für Holz-Polymer-Werkstoffe abgebildet [2]. Es wurden die montageteknisch optimierten Schraubverbindungen aus Teil 3 den Untersuchungen zugrunde gelegt.

Teil 5: Im Bearbeitungsschwerpunkt 5 wurden die systematischen Zusammenhänge auf eine praktische Anwendung (intra-logistischer Demonstrator) übertragen. Dieser wurde hinsichtlich der Verbindungstechnik überarbeitet und für den zukünftigen Dauerlauf test umgebaut.

## **2 Stand der Technik**

### **2.1 Branchenübergreifende lösbare Verbindungstechnik im Maschinen- und Holzbau sowie der Kunststofftechnik**

Das Fügen ist ein Fertigungsverfahren, welches nach DIN 8593 [1] kategorisiert ist. Werkstoffbedingt können nicht alle Fügeverfahren auf den Holz-Polymer-Werkstoff angewendet werden. Im Schema unter Abbildung 2 sind die Fügeverfahren, die theoretisch für Holz-Polymer-Werkstoffe anwendbar sind, grün hervorgehoben. Die rote Markierung kennzeichnet dabei die lösbaren Fügeverfahren. Demnach sind für das Vorhaben nur die Fügeverfahren der Gruppen 4.1 und 4.3 relevant. Die Fügeverfahren, die den benannten Gruppen zugeordnet sind, liefert Tabelle 2.

Für maschinenbautechnische Anwendungen sind besonders das Schrauben, Verspannen, Klemmen, Einhängen und Pressverbindungen relevant. Etablierte lösbare Fügeverfahren in der Kunststofftechnik sind das Schrauben (Direktverschraubung mit/ ohne Gewindeeinsätze), das federnde Einspreizen (Schnappverbindung) und die Pressverbindung. Die für den Holz- und Möbelbau relevanten Fügeverfahren sind unter anderem das Schrauben, Nageln, Ineinanderschieben, Klammern und die typischen zimmermannsmäßigen Verbindungen. Diese bilden Mischformen aus den Klassifizierungen Verkeilen und Verspannen. Die Schnittmenge der in allen Branchen angewendeten Verfahren ist das Schrauben.

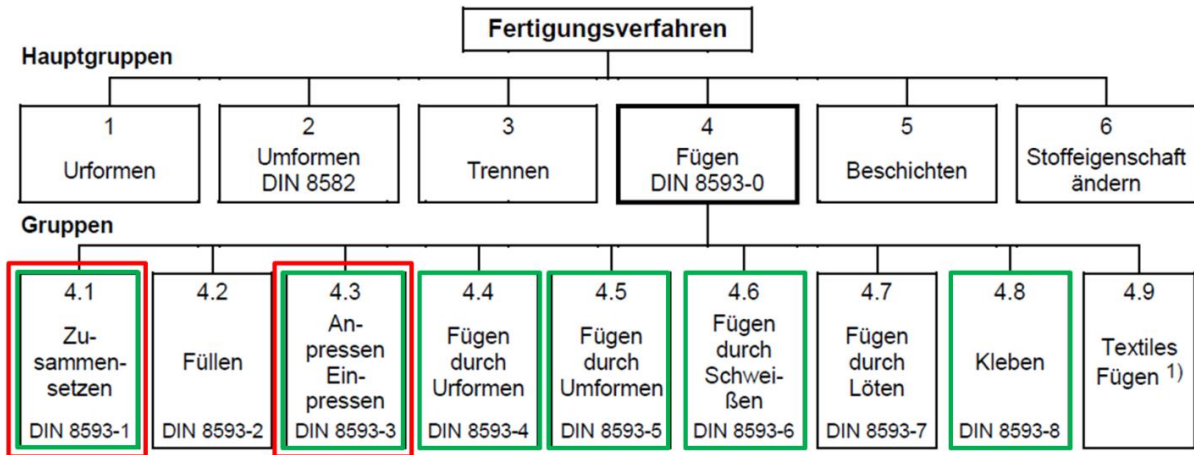
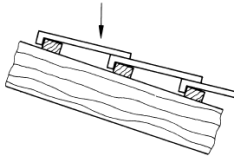
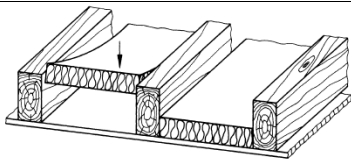
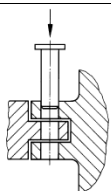
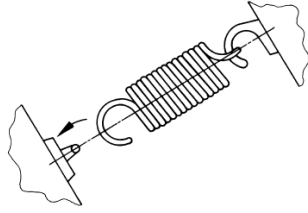
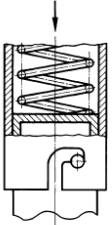
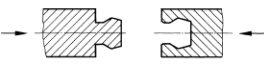
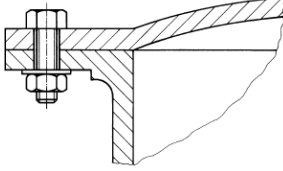
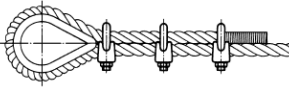
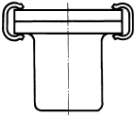
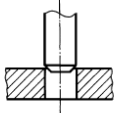
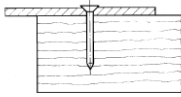
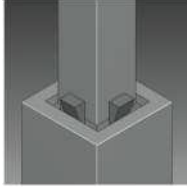
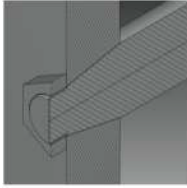


ABBILDUNG 2: RELEVANTE FÜGEVERFAHREN NACH DIN 8593 FÜR WPC [1]

TABELLE 2: RELEVANTE FÜGEVERFAHREN NACH DIN 8593 FÜR DAS VORHABEN

Fügeverfahren	Prinzip/ Beispiel	Branche (Maschinenbau MB Kunststofftechnik KT Holztechnik HT)
<b>4.1 Zusammensetzen [3]</b>		
4.1.1 Auflegen, Aufsetzen	 Bild 1 — Auflegen von Dachziegeln [3]	HT
4.1.2 Einlegen, Einsetzen	 Bild 2 — Einlegen einer Isolierbahn in eine Deckenkonstruktion [3]	HT
4.1.3 Ineinanderschieben	 Bild 3 — Einschieben eines Verbindungsbolzens [3]	HT, MB, KT

4.1.4 Einhängen	 <p>Bild 4 — Zugfeder einhängen [3]</p>	MB
4.1.5 Einrenken	 <p>Bild 5 — Einrenken [3]</p>	MB
4.1.6 federnd Einspreizen	 <p>Bild 7 — Schnappverbindung [3]</p>	KT
<b>4.3 Anpressen/ Einpressen</b>		
4.3.1 Schrauben	 <p>Bild 1 — Schrauben [4]</p>	MB, KT, HT
4.3.2 Klemmen	 <p>Bild 3 — Klemmen mit Drahtseilklemme [4]</p>	MB
4.3.3 Klammern	 <p>Bild 5 — Klammern [4]</p>	HT
4.3.4 Fügen durch Pressverbindung	 <p>Bild 6 — Fügen durch Einpressen [4]</p>	MB, (KT)

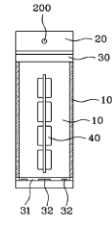
4.3.5 Nageln/ Einschlagen	 <p>Bild 9 — Nageln [4]</p>	HT
4.3.6 Verkeilen	 <p>[4]</p>	HT
4.3.7 Verspannen	 <p>[4]</p>	MB, HT

Lösbare Verbindungen basieren auf den Wirkmechanismen des Kraft- und Formschlusses. Der physikalische Hintergrund kraftschlüssiger Verbindungen ist die Haftreibung. Reine kraftschlüssige Verbindungen sind für Baugruppen mit großem Steifigkeitsunterschied zwischen Werkstoff und Verbindungsmittel ungeeignet. Beim Aufbringen der Vorspannkraft geben die Bauteile wegen ihrer geringen Steifigkeit nach. Dies ist bei Holzwerkstoffen und Kunststoffen der Fall. Zudem zeigen Holz und Kunststoffe ein viskoelastisches Materialverhalten, was bei reinen kraftschlüssigen Verbindungen zum vorzeitigen relaxieren der Vorspannkraft und damit zum Lösen der Verbindung führt. Aus diesem Grund werden für diese Werkstoffe Verbindungen mit einem hohen Formschlussanteil realisiert. Die Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben stellt beispielhaft eine derartige Mischform aus Form- und Kraftschluss dar. Im Bereich der Holztechnik sind die zimmermannsmäßigen Verbindungen, die den Formschluss nutzen, weit verbreitet. Bekannteste Anwendungen sind Gehrungen, Schwalbenschwanz-Verbindungen und Zapfenverbindungen. Meist sind diese jedoch als unlösbare Klebverbindung ausgeführt.

## 2.2 Patentrecherche

Die aktuellen Schutzrechte zur „lösbaren Verbindungstechnik von Holz-Polymer-Werkstoffen“ fasst Tabelle 3 zusammen. Die aufgeführten Patente beinhalten ausschließlich Anwendungen unter geringen statischen Belastungen. Lösungen unter dynamischen Belastungskollektiven sind nicht ausgewiesen.

TABELLE 3: PATENTRECHERCHE LÖSBARE VERBINDUNGSTECHNIK FÜR HOLZ-POLYMERWERKSTOFFE

Patent- Nr.	Titel/ Anmelder	Bemerkung
KR102013050471A	Fix clip for outer wall decorating WPC siding/ Lee Eun Sik [Korea]	<p>Fixierungsclip für WPC-Hausverkleidungen</p>  <p>200: Durchgangsbohrung, entsteht beim Zusammenheften der oberen und unteren Panele</p>
DE202012005778U1	Verbindungstechnik zur Herstellung von Behälter aus WPC-Profilen / Rainer Wolfgang	<p>Behälterbau aus WPC-Terrassenabschnitten Verwendung des Winkelstandardprofils „Hergestellte Behälter, vorwiegend zur Verwendung als Pflanzgefäße“ Fixieren der Behälterteile mit Nieten oder Schrauben</p>
EP2599622 A1	Verbundprofil aus Holz und holzfaserverstärktem Kunststoff und Verwendung eines derartigen Profils / Extruwod GmbH	<p>Verbindung erfolgt mittels Kleben, Formschluss oder Reibschluss Verbindung zwischen Holz und WPC durch Formschluss (Schnapp- Clipsverbindung) realisiert</p>

### 2.3 Praktizierte lösbare Verbindungstechnik für Holz-Polymer-Werkstoffe

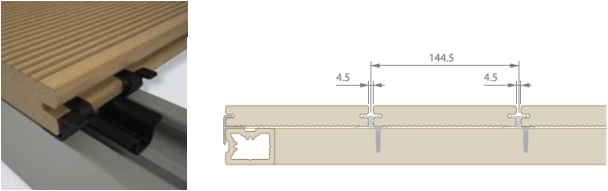
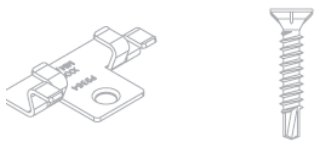
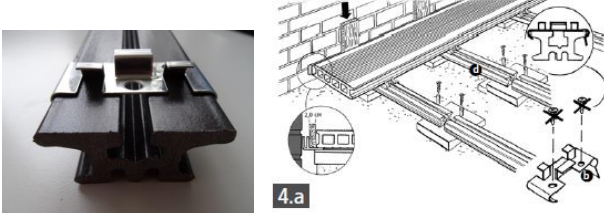
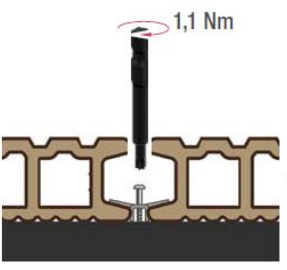


Die auf dem Markt etablierten Verbindungstechniken für Holz-Polymer-Werkstoffe orientieren sich stets an den praktizierten Anwendungsfall. Für WPC sind dies ausschließlich statisch beanspruchte Bauteile, im konkreten Terrassendecks, Zaunsysteme und Gestellsysteme. Jeder Hersteller bietet für seine Anwendung ein produktspezifisches Komplettsystem an, welches aus den Extrusionsprofilen und der produktspezifischen Verbindungstechnik, inklusive Montageanleitung und technischem Datenblatt besteht. Entsprechende Montageempfehlungen beziehen sich ausschließlich auf das spezifische Produkt. Das sind beispielsweise einzuhaltende Montageabstände und Gefälle sowie teilweise Bearbeitungshinweise.

Für das Verlegen des Terrassenbelages ist immer eine Unterkonstruktion aus Holz-Polymerprofilen oder anderen Werkstoffen notwendig. Der Terrassenbelag wird grundsätzlich verdeckt über Montageclips auf der Unterkonstruktion montiert. Die Clips sind alle als eine Nut-Feder-Verbindung ausgeführt, unterscheiden sich aber von Hersteller zu Hersteller in ihrem produktspezifischen Aussehen [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11]. Sie werden in der Regel mit gewindeformenden/ -schneidenden Schrauben (z. B. Holzschrauben) an der Unterkonstruktion angeschraubt.

In tragenden Bauelementen wie z.B. Unterkonstruktionssysteme, Treppen, Stege, Sitzbänke werden Schraubverbindungen als Einschraub- und Durchsteckverbindungen ausgeführt. Eine einheitliche Schraubengröße und Gewindegeometrie ist nicht festgelegt. Sie unterscheiden sich in Abhängigkeit der Hersteller. Eine Übersicht eingesetzter Verbindungstechniken für Terrassendecks fasst Tabelle 4 zusammen.

Die Verbindungstechnik technischer Profile der Firmen item und Hiendl ist in Tabelle 5 dargestellt. Die Verbindungstechnik der item Vierkantprofile orientiert sich dabei an dem Baukastenprinzip der nahezu baugleichen Aluminiumprofile.

**TABELLE 4: LÖSBARE VERBINDUNGSTECHNIK EINGESETZTER TERRASSEDECKSYSTEME**

Hersteller	Gestaltung Montageclip	eingesetzter Schraubentyp
Inoutic [5]	 <p>Unterschiedliche Varianten je nach Unterkonstruktion (Hartholz, Alu, WPC)</p>	 <p>Gewindeformende Schraube mit Bohrkopf</p>
Kosche [6]	 <p>Montageclip aus Kunststoff oder Metall</p>	<p>Gewindeformende Edelstahlschraube Schraube 4x20-V2A</p>
Rehau [9]		 <p>Gewindeformende Schraube</p>
Möller [7]		<p>Schrauben nur beim Anfangsclip vorgesehen Gewindeformende Schrauben</p>





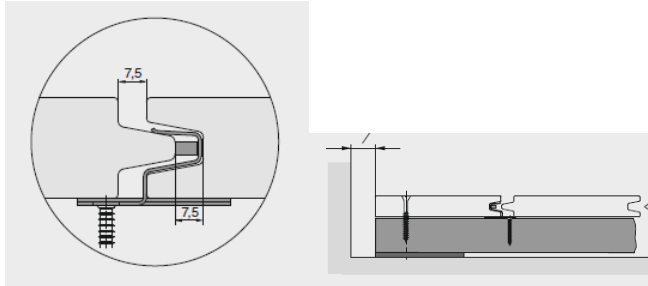

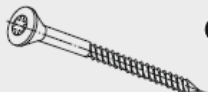
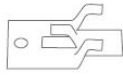











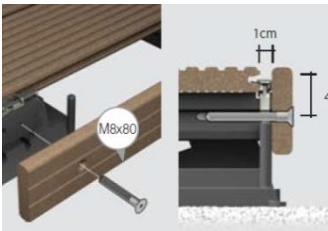

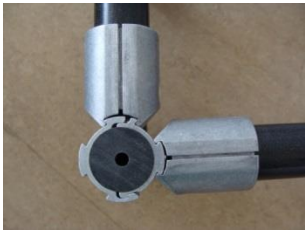





	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Anfangsclip</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Montageclip</p> </div> </div>	
<p>Weralit [10]</p>		<div style="text-align: center;">  <p>12 Senkkopfschraube 4,0 x 30</p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  <p>13 Senkkopfschraube 4,0 x 50</p> </div>
<p>Mydeck [8]</p>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">   </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">   </div> <div style="display: flex; align-items: center;">   </div> </div>	 <p style="text-align: center;">Gewindeformende Holzschrauben für Harthölzer mit Frässchaft C1 5x60 TX25 bei sichtbarer Verschraubung</p>
<p>NOVO- Tech [11]</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>Rastklammer-Rand 2-teilig</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Clip inkl. Schraube</p>  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>Rastklammer 2-teilig, inkl. Schraube</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Randclip inkl. Schraube</p>  </div> </div>	<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Befestigungsschraube M8 x 80 für Glattkantbrett, mit Mutter und Scheibe</p> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div> <p style="text-align: center;">Einschrauben der M8 Schraube ohne Gewindeschneiden</p>

TABELLE 5: LÖSBARE VERBINDUNGSTECHNIK FÜR WPC IN TECHNISCHEN PROFILEN

Firma / Profil	Verbindungstechnik	Firma / Profil	Verbindungstechnik
Item / Rundprofil [12]	 Welle-Nabe-Pressverbindung	Hiendl / Rundprofil [13]	
Item / Vierkantprofil [12]	 Durchsteckschraubverbindung mit Winkelprofil und Nutensteine	Hiendl / Vierkantprofil [13]	
Item / Vierkantprofil [12]	 Einschraubverbindung mit Nutscheibe und gewindeformender Schraube	Hiendl / Vierkantprofil [13]	

Eine dynamisch beanspruchte Verbindungstechnik stellt die Schraubverbindung am Hängefördersystem [14] dar. Die Verbindung wurde als Einschraubverbindung mit Gewindeeinsätzen ausgeführt, vgl. Abbildung 3. Für die Auslegung der Schraubverbindung unter dynamischer Dauerlast wurde der dynamische Bemessungsfaktor aus Untersuchungen zu WVC zugrunde gelegt [15]. Ob der dynamische Bemessungsfaktor für WVC auf WPC übertragen werden kann ist offen. Zudem kann mit einer besseren Verbindungstechnik die Anzahl der Einschraubstellen minimiert werden.



ABBILDUNG 3: INSERTVERBINDUNG IM HÄNGEFÖRDERSYSTEM

### **3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das FuE-Projekt wurde federführend von der Arbeitsgruppe Anwendungstechnik erneuerbarer Werkstoffe der Professur Fördertechnik des Institutes für Fördertechnik und Kunststoffe an der TU Chemnitz bearbeitet. Die Firma NOVO-TECH GmbH & Co. KG in Aschersleben, Hersteller der megawood® Produkte unterstützte das Vorhaben projektbegleitend. Für die UV-Globalbewitterung im Aufgabenteil 4 des Projektes wurde das Sächsische Textilforschungsinstitut e.V. eingebunden.

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Konkretisierung der Verbindungstechnik/ Fügeverfahren**

#### **4.1.1 Anforderungsliste**

Tabelle 6 fasst die Anforderungen an die lösbare Verbindungstechnik für Bauteile aus Holz-Polymer-Werkstoffen unter statisch- und dynamischem Belastungskollektiv für Anwendungen in der technischen Intralogistik zusammen. Die Kriterien sind nach Forderungen (Muss-Bestimmung) und Wünschen klassifiziert (Kann-Bestimmung). Die Forderungen stellen gleichzeitige die Kriterien zur Beurteilung der Varianten dar.

TABELLE 6: ANFORDERUNGSLISTE

	Anforderung	Forderung (F) / Wunsch (W)
1	<i>Mechanische Anforderungen</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hohe stat. und dyn. Verbindungsfestigkeit</li> <li>▪ Gewährleistung der Betriebssicherheit</li> <li>▪ hohe stat. und dyn. Verbindungssteifigkeit</li> <li>▪ kein Selbstlösen im Betriebszustand</li> </ul>	F F F F
2	<i>Montagetechnische Anforderungen</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ zerstörungsfreie Demontage</li> <li>▪ mögliche Wiederholmontage</li> <li>▪ einfache Handhabung im industriellen Umfeld</li> <li>▪ manuelle Nachstellbarkeit (Vorspannkraftabfall kompensieren)</li> <li>▪ Zugänglichkeit der Verbindungsstelle</li> <li>▪ Möglichkeit zur Vor-Ort-Fertigung/ Montage</li> <li>▪ einheitliche VBT für längs/quer Verbindungen</li> </ul>	F W F F F W F
3	<i>Wirtschaftliche Anforderungen</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ geringer Fertigungsaufwand/ Fertigungskosten</li> <li>▪ geringe Anzahl an notwendigen Befestigungselementen</li> </ul>	F F
4	<i>Werkstofftechnische Anforderungen*</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ eine an werkstoffspezifischen Materialeigenschaften angepasste Verbindungstechnik</li> </ul>	F
5	<i>Leichtbautechnische Anforderungen</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ geringer einzunehmender Bauraum</li> <li>▪ geringes Gewicht der VBT</li> </ul>	F F
6	<i>Sonstige Anforderungen</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ handelsübliche Befestigungselemente</li> <li>▪ genormte Befestigungselemente</li> </ul>	W W

\*Erläuterung zu werkstofftechnische Anforderungen in Kapitel 4.1.2

#### 4.1.2 Werkstoffspezifische Eigenschaften

Die Auswahl des Fügeverfahrens und die resultierenden Verbindungseigenschaften sind stets durch werkstoffspezifische Eigenschaften limitiert. Holz-Polymer-Werkstoffe, mit ihren Ausgangsprodukten Holz und Kunststoff, zeigen viskoelastische Materialeigenschaften. Aus diesem Grund ist auch im Bereich der Verbindungstechnik mit Spannungsrelaxation und Kriechneigung zu rechnen.

Wie bei den Ausgangsstoffen liegt ein großer Steifigkeitsunterschied zwischen Verbindungsmittel und Werkstoff vor. Aus diesem Grund wird die aufzubringende Vorspannkraft in einer Verbindung limitiert sein. Durch die Verarbeitung zeigt das hochgefüllte WPC anisotrope Materialeigenschaften und einen hohen Verdichtungsgrad. Der

hohe Verdichtungsgrad hat zur Folge, dass stiftförmige Verbindungsmittel nicht bzw. sehr erschwert in das Material eingeschlagen oder eingedreht werden können.

Im Gegensatz zu anderen Holzwerkstoffen liegt das Material nach der Herstellung darrtrocken vor. Es wird direkt nach der Extrusion Feuchtigkeit aufnehmen und Quellen aber nicht Schwinden. Die Feuchtigkeitsaufnahme/-Abgabe ist durch die Kunststoffkomponente zusätzlich gebremst.

### 4.1.3 Nutzwertanalyse

Die Anwendbarkeit der jeweiligen Fügeverfahren aus Kapitel 1 wurden mittels einer Nutzwertanalyse nach festgelegten Kriterien in Abbildung 4 bewertet. Die Kriterien mit der höchsten Gewichtung sind: Kraftübertragung, Wirtschaftlichkeit, Werkstoffgerechtigkeit und Beanspruchung. Die gesamten Einzelkriterien sind im sogenannten Zielsystem in Abbildung 4 dargestellt. In Tabelle 7 ist das Ergebnis der Nutzwertanalyse dargestellt. Die Fügeverfahren sind aufsteigend nach ihrer erreichten Punktzahl gegliedert. Die geeignetsten Fügeverfahren auf den Plätzen 1 - 3 sind das Schrauben, das Verspannen und das Fügen durch Pressverbindungen.

TABELLE 7: ERGEBNIS NUTZWERTANALYSE

Platz	Fügeverfahren	Punktzahl (von 10)
1	4.3.1 Schrauben	7,77
2	4.3.7 Verspannen	7,03
3	4.3.4 Fügen durch Pressverbindung	6,84
4	4.3.2 Klemmen	6,23
5	4.1.5 Einrenken	6,08
6	4.1.3 Ineinanderschieben	6,05
7	4.1.2 Einlegen/ Einsetzen	6,02
8	4.1.6 Federnd Einspreizen	5,93
9	4.3.6 Verkeilen	5,87
10	4.3.5 Nageln/ Einschlagen	5,69
11	4.1.1 Auflegen/Aufsetzen	5,54
12	4.1.4 Einhängen	5,17
13	4.3.3 Klammern	4,95

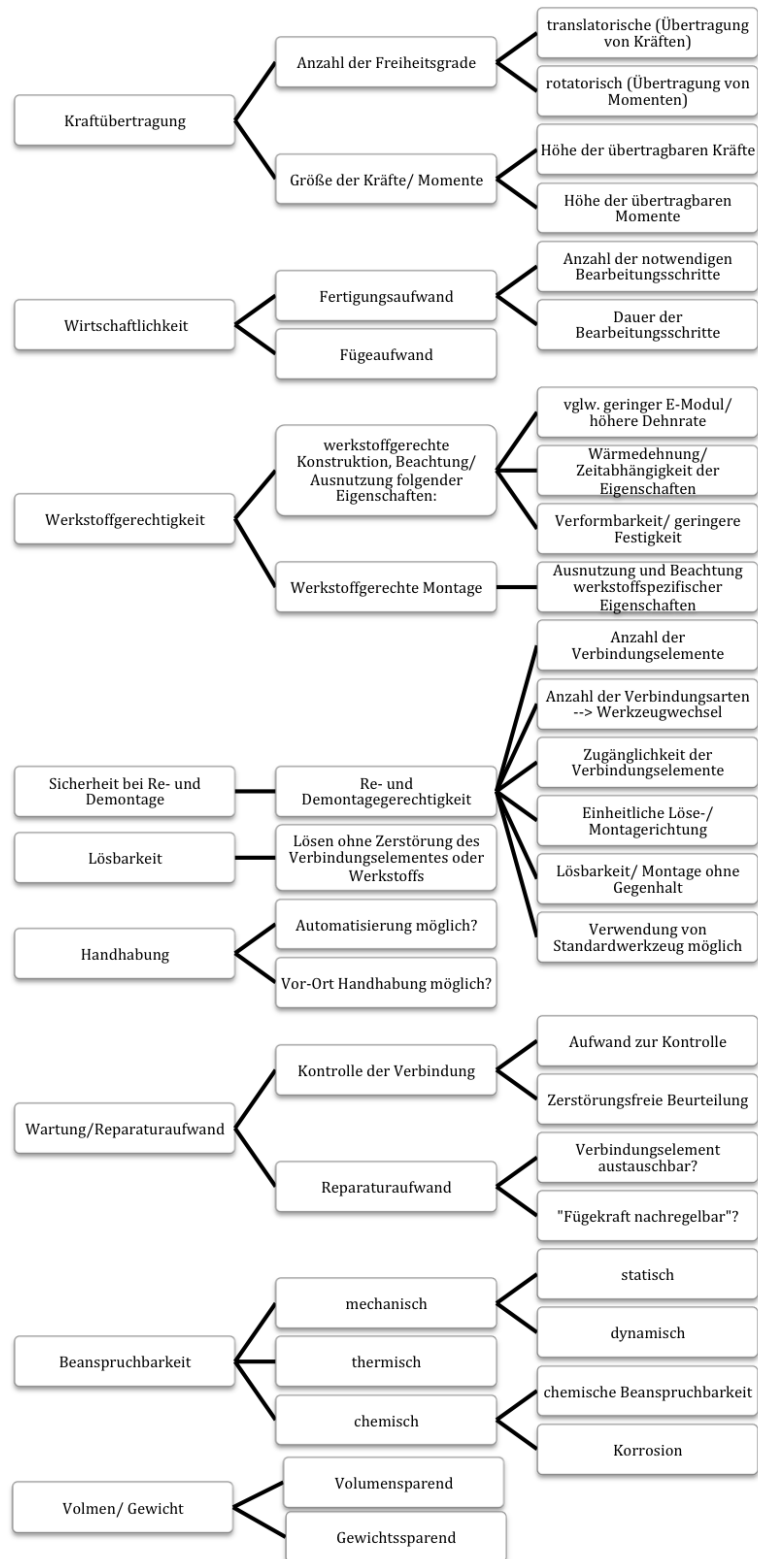


ABBILDUNG 4: ZIELSYSTEM DER NUTZWERTANALYSE

#### 4.1.4 Bewertung aktueller Lösungen aus dem Stand der Technik

Die Verbindungstechnik der technischen Profile aus Kapitel 2.3 wurde nach den Kriterien Montageaufwand, Anzahl der Verbindungsmittel und Gewicht der Verbindungsmittel bewertet. Tabelle 8 zeigt die Gegenüberstellung der Fügeverfahren zu handelsüblichen Profilen der Firma Item. Das Bezugssystem für die Bewertung ist die Baugruppe Eckverbinder in zwei Richtungen. Es wird deutlich, dass die Baugruppe über eine Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben sehr schnell montierbar ist. Die geringe Anzahl der notwendigen Verbindungsmittel (gewindeformende Schraube und Nutscheibe) erlaubt eine preiswerte und leichte Fügeverbindung.

TABELLE 8: BEWERTUNG ITEM-VERBINDUNGSTECHNIK

Baugruppe	Verbindungsmittel (VM)	Anzahl VM	Gewicht VM	Montage
<b>Welle-Nabe-Pressverbindung</b> 		12	224 g	aufwendig
<b>Eckverbinder mit Durchsteckschraubverbindung</b> 		7	66,4 g	einfach
<b>Einschraubverbindung</b> 		2	27,9 g	einfach + schnell



#### 4.1.5 Konkretisierung Fügeverfahren (Teilziel 1)

Im Abgleich der an die Verbindungstechnik gestellten Anforderungen mit der Nutzwertanalyse, dem werkstoffspezifischen Eigenschaftsprofil und der Bewertung derzeitiger Verbindungstechniken aus dem Stand der Technik wird das Fügeverfahren Schrauben favorisiert. Aufgrund der wirkenden statisch-dynamischen Betriebskräfte sind ausschließlich vorgespannte Schraubverbindungen relevant. Damit wird das Verspannen mit berücksichtigt.

Schraubverbindungen für Befestigungszwecke unterteilen sich in Durchsteck- (DSV) und Einschraubverbindungen (ESV, auch Sacklochverschraubung genannt). Beide Ausführungen sind in maschinenbautechnischen Anwendungen relevant.

Einschraubverbindungen sind durch weitere Unterscheidungsmerkmale kategorisierbar, welche insbesondere durch die Materialeigenschaften der zu fügenden Bauteile bestimmt werden.

- ESV mit / ohne Zusatzelement
- ESV mit / ohne vorherigem Gewindeschneiden
- ESV vorgespannt / nicht vorgespannt

Für hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe werden Einschraubverbindungen favorisiert, die ohne vorheriges Gewindeschneiden direkt in den Werkstoff eingeschraubt werden (Direktverschraubung) und sich vorspannen lassen. Für eine sichere Wiederholmontage werden zusätzlich Einschraubverbindungen mit Zusatzelement betrachtet. Das Zusatzelement kann eine Gewindemuffe (Insert), eine Einschlagmutter oder ein Quergewindebolzen sein.

Die Besonderheit der Direktverschraubung ist, dass sie die Eigenschaften aus geringer Verbindungsmittellanzahl, geringem Montageaufwand, Nachstellbarkeit und hoher mechanischer Belastbarkeit vereinen. Die Begrifflichkeit entstammt der Leichtmetall- und Kunststoffbranche. Im Holz- und Möbelbau ist der Begriff mit Holzschraubverbindung bzw. Schraubverbindung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln gleichbedeutend.

#### 4.2 Dynamischer Kurzzeitversuch

Ziel des Versuches ist es, die vorteilhafte Verschraubungsart für Bauteile aus Holz-Polymer-Werkstoffen unter dynamischer Beanspruchung zu separieren, und ggf. untersuchungsrelevante Schwachstellen aufzuzeigen. Es wurden die Schraubverbindungen Durchsteckschraubverbindung und Einschraubverbindung mit / ohne Zusatzelement getestet. Für die Einschraubverbindung mit Zusatzelement wurden zunächst Gewindeeinsätze hinzugezogen, da diese bereits zur praktischen Anwendung im Hängefördersystem kamen. Abbildung 5 liefert die schematische Unterteilung, der konstruktiven Gestaltung der getesteten Schraubverbindungen. Alle Schraubverbindungen wurden vergleichend mit der Schraubengröße M6 getestet. Die konstruktive Gestaltung der Schraubverbindungen zeigt Abbildung 6 am Beispiel der Durchsteckschraubverbindung. Tabelle 9 fasst die jeweils verwendeten Verbindungsmittel zusammen.

Der dynamische Kurzzeitversuch wurde über eine maximale Lastwechselzahl von 100.000 LW an einschnittigen Schraubverbindungen senkrecht zur Stiftachse unter wechselnder



sinusförmiger dynamischer Belastung durchgeführt. Zentrale Fragestellung des Versuchs ist, welche Schraubverbindung die belastbarste unter dynamischer Beanspruchung ist. Die Verbindung versagt sobald die Vorspannkraft im Klemmkontakt einen kritischen Wert unterschreitet und sich die verschraubten Bauteile gegeneinander verschieben können. Daraus resultieren die Beurteilungskriterien des Versuches, dem Abfall der Vorspannkraft und der Wegänderung bei charakteristischen Lastwechselzahlen. Zur Messung der Vorspannkraft und dem definierten Aufbringen dieser wird ein Ringkraftsensor mit verschraubt (Abbildung 5).

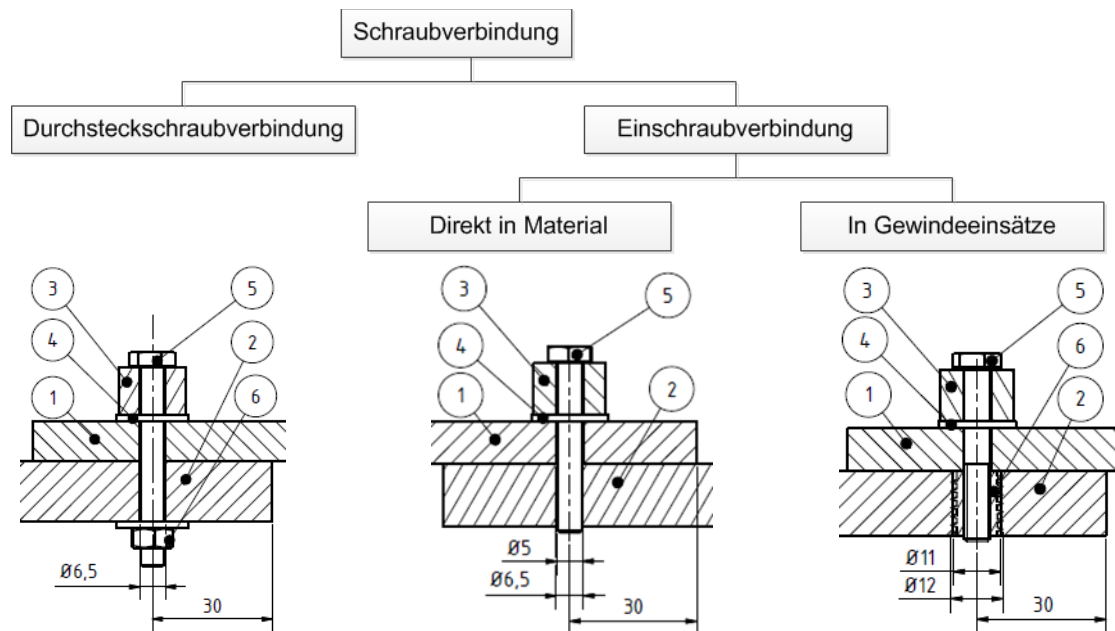


ABBILDUNG 5: Einteilung untersuchter Schraubverbindung und konstruktiver Aufbau (1 Anbauteil WPC, 2 unteres Bauteil WPC  $T=15\text{mm}$ , 3 Ringkraftsensor, 4 Unterlegscheibe DIN 440R, 5 M6 Schraube, 6 Mutter bzw. Gewindeeinsatz)

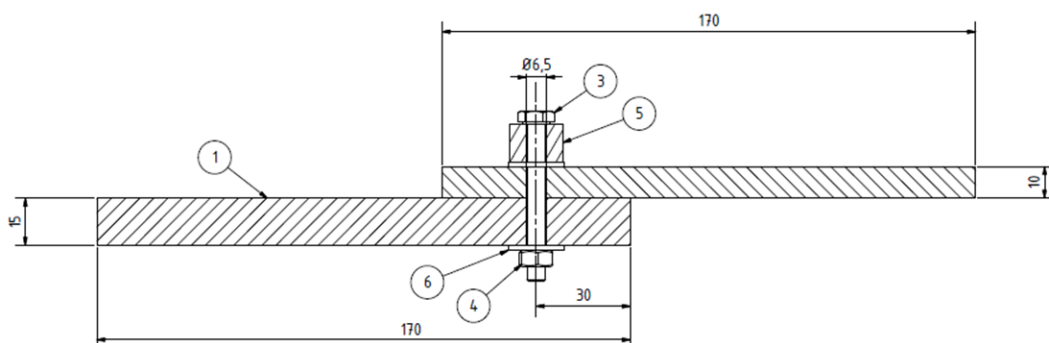


ABBILDUNG 6: Konstruktive Gestaltung der einschneidigen Verbindung, (1 unteres Bauteil WPC, 3 M6-Schraube, 4 Mutter, 5 = Ringkraftsensor, 6 = Scheibe DIN 440R)

TABELLE 9: Eingesetzte Verbindungsmittel und Vorbohrung

Schraubverbindung	Verbindungsmittel
Durchsteckschraubverbindung	Schraube DIN 931 M6x50 8.8; Mutter DIN 394 M6; Scheibe DIN 9021 6,4
Einschraubverbindung	Schraube DIN 931 M6x40 8.8; Scheibe DIN 9021 6,4
Einschraubverbindung mit Gewindeeinsätze	Insert Typ SK Fa. Rampa M6 $D_a = 12\text{ mm}$ ; $L = 15\text{ mm}$ M6x40 8.8

Zur Montage und Auslegung der dynamischen Betriebskraft waren folgende Vorversuche notwendig.

- Montageversuch der Inserts, Bestimmung der Vorbohrung
- Montageversuch/Überdrehversuch → Messung der maximal aufzubringenden Montagevorspannkraft
- Haftreibwertmessung → Berechnung der Klemmkraft der Verbindung aus  

$$F_{Klemm} = F_v * \mu_H$$
- Statischer Zugversuch → Auslegung  $F_{dyn} = 0,5 - 0,8 * F_{stat}$

Den Versuchsablauf fasst Abbildung 7 zusammen. Mit der Verschraubungslehre konnte sichergestellt werden, dass a) beide Platten parallel ausgerichtet sind, b) die Schraube weitestgehend zentrisch in der Bohrung liegt und c) alle Verbindungen reproduzierbar montiert werden. Zwischen Montage und Versuchsstart lag eine Zeitdifferenz von 5 Minuten, um die Relaxationszeit in den Verbindungen vergleichbar zu halten. Der dynamische Versuch wurde mit den in Tabelle 10 benannten Einstellungen kraftgesteuert durchgeführt. Über die Versuchsdauer wurden für jeden Lastwechsel die maximalen Wege und die Kraftamplitude aufgezeichnet.

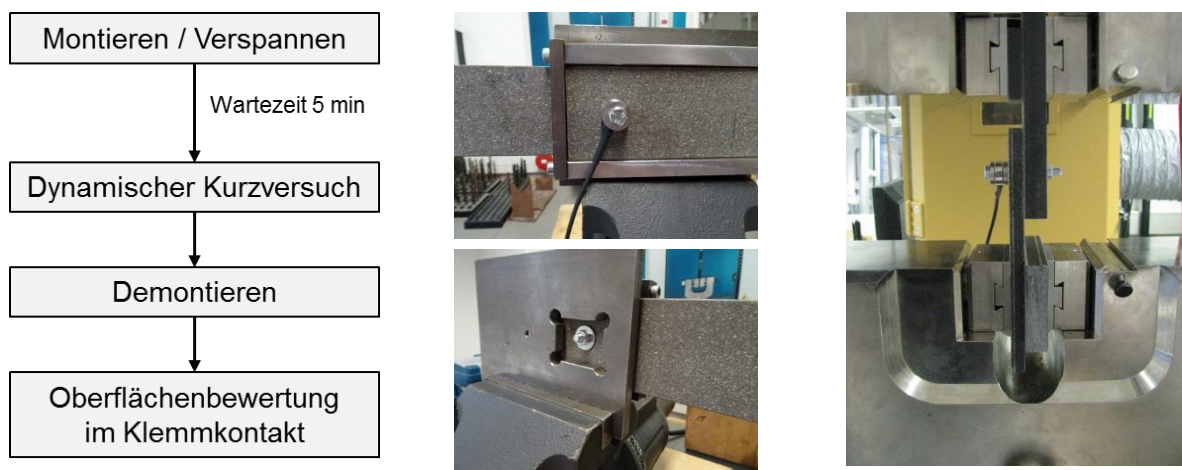


ABBILDUNG 7: VERSUCHSABLAUF KURZZEITDYNAMISCHER TEST

TABELLE 10: PARAMETEREINSTELLUNG DYNAMISCHER KURZZEITVERSUCH

Parameter	Wert
Vorspannkraft	4300 N (Festlegung)
Einspannlänge	110 mm
Frequenz	3 Hz
Kraftamplitude	678 N (Schwellbelastung)
Versuchsende	Max. 100000 LW
Einzelversuche n	3

Abbildung 8 zeigt die Weg-Lastwechselkurven der im dynamischen Kurzzeitversuch getesteten Schraubverbindungen. Die schlagartige Wegänderung zeigt dabei das Rutschen

der Verbindung und damit das Versagen des Kraftschlusses an. Die getesteten DSV hielten alle über 100000 LW der Belastung von 678 N stand. Es fand weder eine schlagartige Wegänderung statt, noch zeigte der Vorspannkraftverlauf über die Versuchsdauer auffällige Effekte. Eine Verschiebung der Platten gegeneinander sowie Verschleißspuren im Klemmkontakt sind aus der Oberflächenbewertung des Klemmkontaktes nicht hervorgegangen.

Dem gegenüber versagten die ESV mit und ohne Inserts teilweise. Jeweils 2 der getesteten Einschraubverbindungen mit/ohne Insert hielten über 100000 LW stand, andere versagten innerhalb von 350 bis 55700 Lastwechsel. Die große Streubreite der ESV ist auf den noch nicht optimalen Montageprozess zurückzuführen.

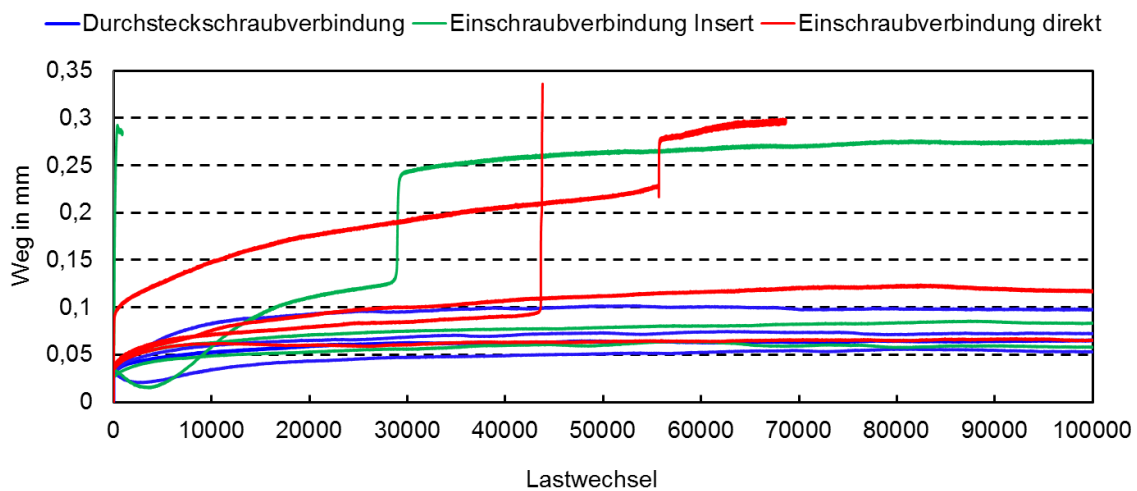


ABBILDUNG 8: WEG-LASTWECHSELKURVEN GETESTETER SCHRAUBVERBINDUNGEN, MATERIALFEUCHTE CA. 1%

### **Zwischenfazit (Teilziel 1)**

Für dynamisch beanspruchte Verbindungen ist eine vorgespannte Schraubverbindung notwendig um die Verbindung berechenbar zu gestalten. Das Versagen der kraftschlüssigen Verbindungen ist durch den Verlust der Vorspannkraft im Klemmkontakt bestimmt. Es ist notwendig für die Einschraubverbindungen sowohl mit und ohne Zusatzelement die Verankerungsfestigkeit zu erhöhen, um die Tragfähigkeit und die übertragbare Vorspannkraft zu maximieren. Die Tatsache, dass die getesteten ESV teilweise über 100.000 LW standhielten aber auch bereits bei geringen Lastwechselzahlen versagten, zeigt die Notwendigkeit auf, den Fügeprozess (Schrauben) näher zu analysieren.

Durch das Herausarbeiten konstruktiver Schraubparameter unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften soll die Tragfähigkeit erhöht und die Ergebnisstreuung hinsichtlich des Fügeprozesses verringert werden. Hierfür sind neben den Durchsteckschraubverbindungen, Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben (Direktverschraubung) und Einschraubverbindungen mit Zusatzelement untersuchungsrelevant. Als Zusatzelement werden anstatt der bisher eingeschraubten Gewindeeinsätze Quergewindebolzen eingesetzt. Der Kraftübertragungsmechanismus und die Werkstoffbeanspruchung eines Inserts und einer Direktverschraubung sind ähnlich. Daher kann die Grundlagenuntersuchung zu gewindeformenden Schrauben die eingeschraubten Gewindeeinsätze mit abdecken. Der Einsatz von QGB in Holz-Polymer-Werkstoffen bringt

aufgrund der Lochleibungsbeanspruchung der Verbindung und der hohen Druckfestigkeit des Materials Vorteile mit sich.

### 4.3 Materialauswahl, Probenvorbereitung und Richtungsfestlegung

Für die Grundlagenuntersuchung der Werkstoffauswahl und der Fügeprozesse wurden Halbzeuge verschiedener Holz-Polymer-Werkstoffhersteller eingesetzt. Es handelte sich dabei ausschließlich um handelsübliche, extrudierte Vollprofile deutscher und amerikanischer Hersteller. Die entsprechende Halbzeugauswahl fasst Tabelle 11 zusammen. Die Werkstoffe unterscheiden sich im Wesentlichen im eingesetzten Holzanteil, dem Matrixmaterial und dem Extrusionsprozess. Tabelle 11 fasst die Werkstoffzusammensetzung der untersuchten Halbzeuge auf Basis vorhandener Datenblätter zusammen. Das Matrixmaterial wurde, sofern nicht in den Datenblättern angegeben über die dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) ermittelt. Darüber hinaus wurden erste Qualitätsmerkmale wie Gefügehomoogenität optisch über die Auflichtmikroskopie analysiert.

TABELLE 11: WERKSTOFFDATEN UNTERSUCHTER WPC-EXTRUSIONSPROFILE

WPC- Hersteller	Matrix	Fasern	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	
1	PVC	56% Holz	1,38	WPC-1
2	PE	Laubholz	1,2	WPC-2
3	PE	70% Kiefer/Tanne	1,17	WPC-3
4	PE-HD	70%	1,23	WPC-4
5	PE-HD	70%	1,25	WPC-5
6	PP	60% Holz	1,16	WPC-6



Um Oberflächenabweichungen, Geometrieschwankungen und Rauheiten zu vereinheitlichen, wurden alle Halbzeuge beidseitig symmetrisch plan gefräst. Zur Berücksichtigung des werkstoff- und fertigungsbedingten Richtungseinflusses der Halbzeuge wurde die Festlegung nach Abbildung 9 getroffen [16]. Die Versuchswerkstoffe wurden in ein und demselben Raumklima konditioniert. Dies lag in der Regel bei 20°C, 30% rel. LF. Die resultierende Materialfeuchte lag in Abhängigkeit des Holz-Polymer-Werkstoffes bei 0,67% bis 1,1 %.

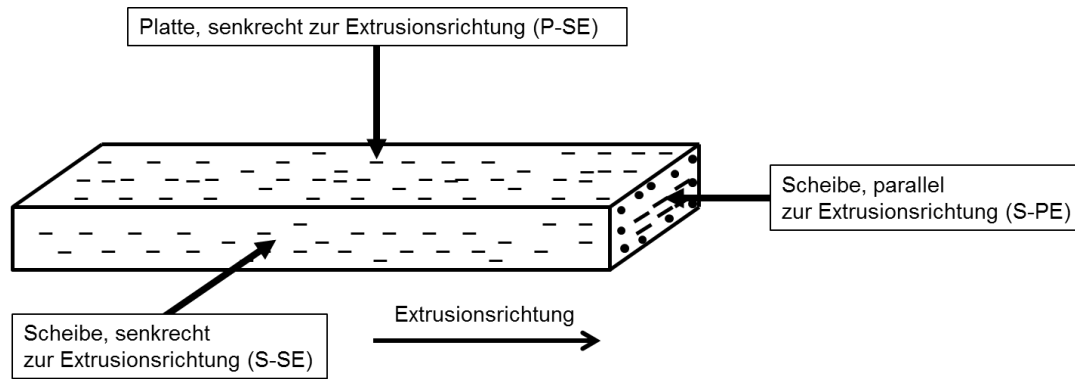


ABBILDUNG 9: RICHTUNGSFESTLEGUNG DER EXTRUSIONSPROFILE

## 4.4 Mechanische Eigenschaften eingesetzter Werkstoffe

### 4.4.1 Drei-Punkt-Biegung

Die Dreipunktbiegung stellt den für die Anwendung im Maschinenbau relevantesten Belastungszustand dar. Es wurden die Proben in Platten- und Scheibenrichtung senkrecht zur Extrusionsrichtung geprüft. Gemäß Schnittplan (Abbildung 10) wurden Einzelproben mit quadratischem Querschnitt von (15 x 15) mm aus den WPC-Profilen gesägt. Die Unterteilung erfolgte in 6 lokale Profilbereiche und 4 Abschnitte in Extrusionsrichtung. Die Einzelproben der unbearbeiteten Holzwerkstoffe OSB-3, MDF und Spanplatte wurden im einheitlichen Stützweitenverhältnis von 15 geprüft. Der Versuchsaufbau orientierte sich an DIN EN 310 [17] mit den Prüfbedingungen nach Abbildung 10. Das Biege-E-Modul wurde als Sekantenmodul zwischen 10% und 40% von  $F_{max}$  bestimmt.

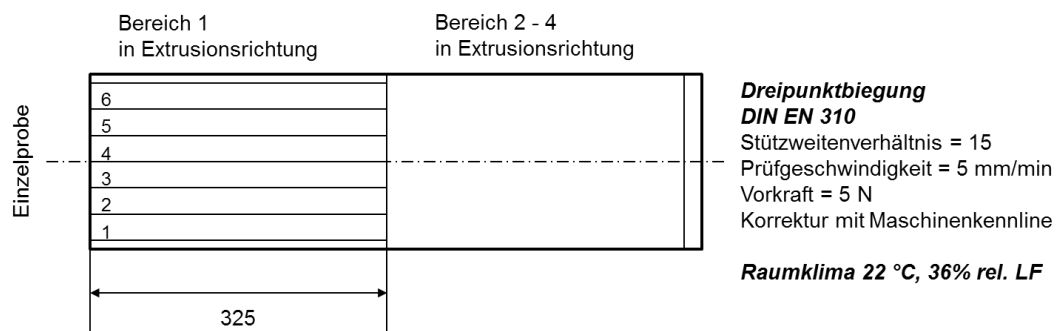
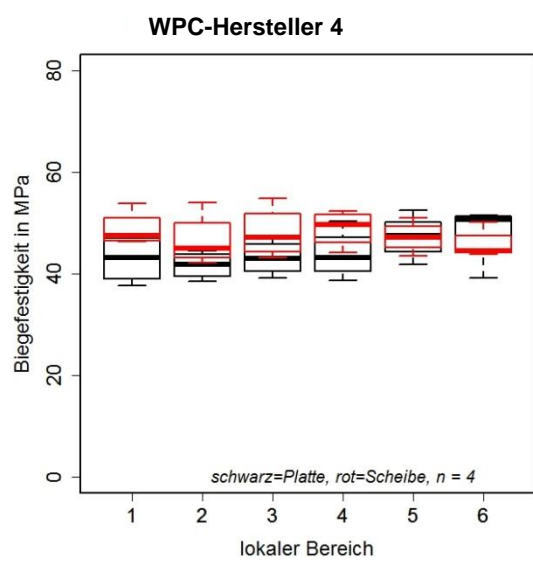
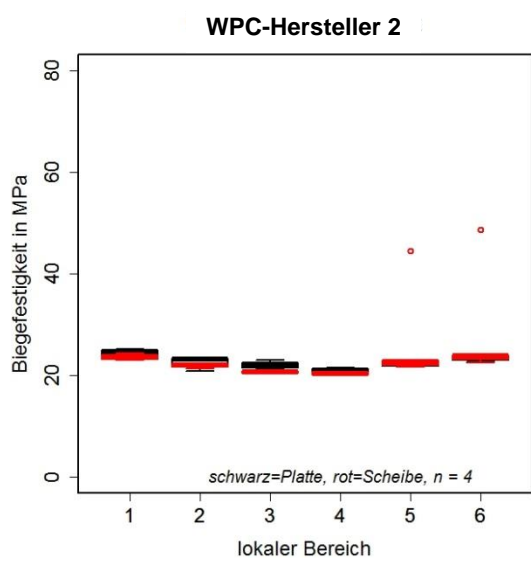
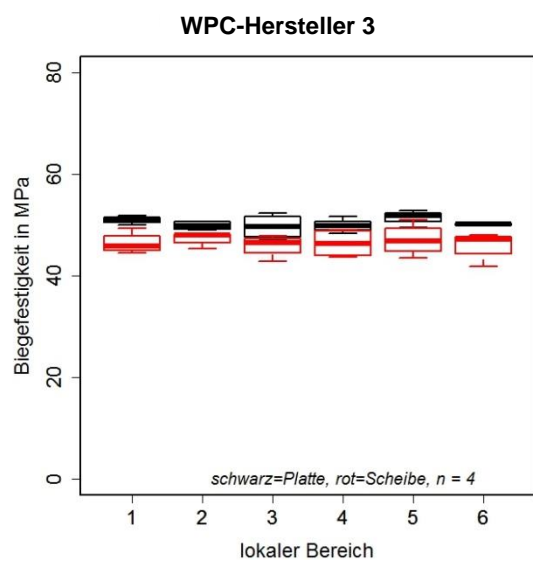
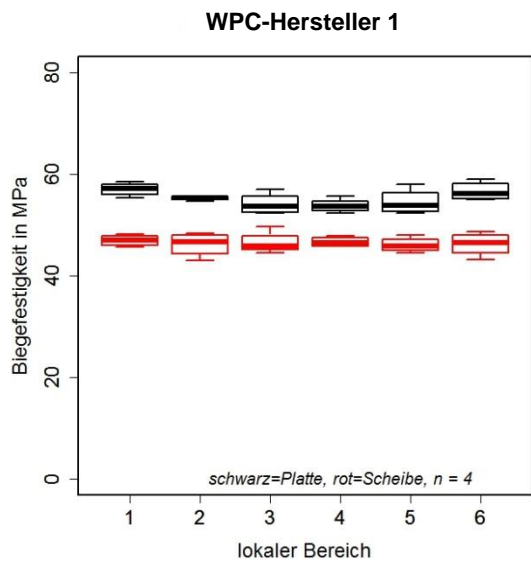
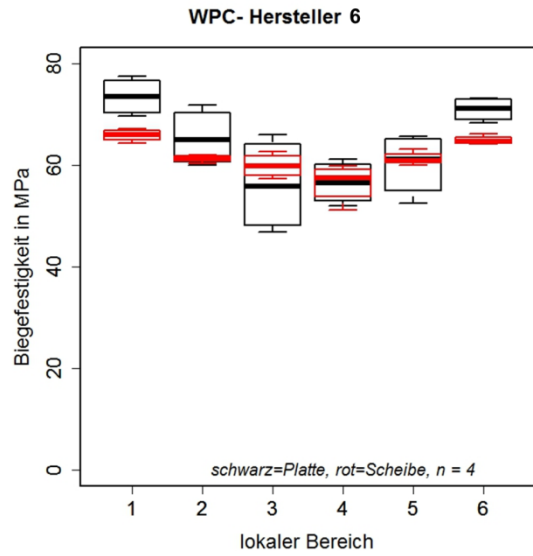
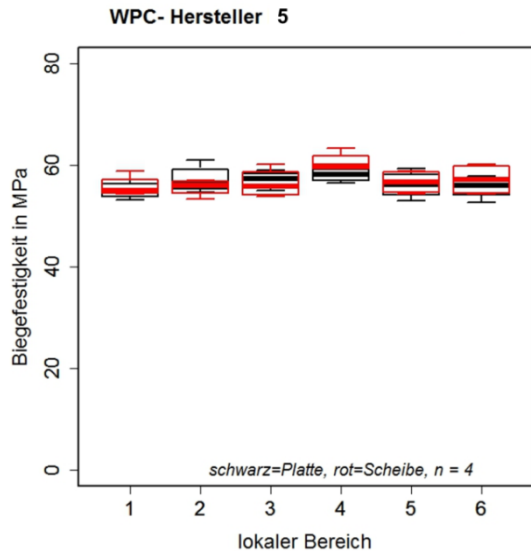


ABBILDUNG 10: SCHNITTPLAN UND VERSUCHSBEDINGUNGEN DREIPUNKTBIEGUNG

Mittels der Verteilung lokaler mechanischer Eigenschaften über die Profilbreite ist die Bauteilqualität beurteilt worden. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die lokalen Biegefestigkeiten eines Bauteils hoher und geringer Qualität. Die Untersuchung auf Fehlstellen, in Form von Faseranhäufungen im Material und Faserhaftungsproblemen, zeigte zudem Schwachstellen in Form von Faserauszügen und Faseragglomeraten der Produkte von Hersteller 2 und 3 auf.



**ABBILDUNG 11: LOKALE BIEGEFESTIGKEITEN VERSCHIEDENER WPC-HERSTELLER**



Abbildung 12 zeigt den WPC-Herstellervergleich anhand ihrer spezifischen Biegeeigenschaften (= auf die Dichte bezogen). Die Leistungsfähigkeit handelsüblicher WPC-Profile schwankt in einem weiten Bereich. WPCs minderer Qualität erreichen nicht einmal die Festigkeit des Matrixmaterials. Spitzenwerte liegen bei fast 80 MPa. WPC-Extrusionsprofile liegen hinsichtlich ihrer dichtenormierten Biegesteifigkeit auf dem Niveau von MDF und OSB-3. Der Vorteil von WPC liegt im Vergleich zu den Holzwerkstoffen im nahezu isotropen Materialverhalten senkrecht zur Verarbeitungsrichtung.

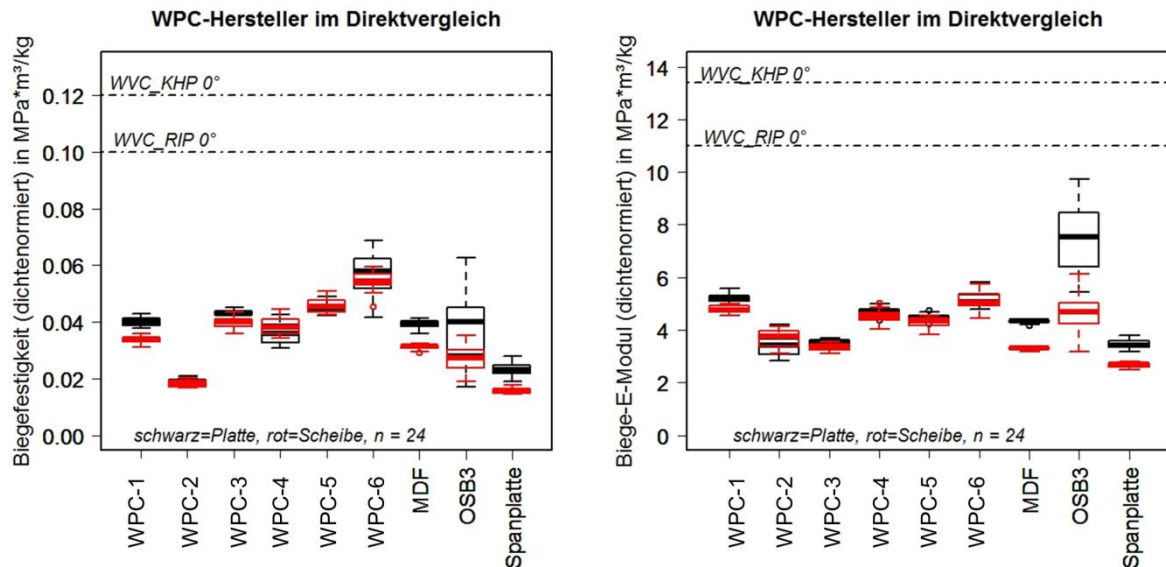


ABBILDUNG 12: SPEZIFISCHE BIEGEFESTIGKEIT UND SPEZIFISCHE BIEGESTEIFIGKEIT GETESTETER WERKSTOFFE, VERGLEICHSWERTE AUS [18], KHP = KUNSTHARZPRESSHOLZ, RIP = BIRKENSPIRRHOLZ RIGAPLY JEWEIS IN 0°-RICHTUNG

Aufgrund der schlechten Biegefestigkeit und des inhomogenen Gefüges (s. Abbildung 13) werden die Holz-Polymer-Werkstoffe der Hersteller 2 und 3 nicht näher analysiert. Sie scheiden bereits nach der Biegeprüfung für maschinenbautechnische Anwendungen aus.

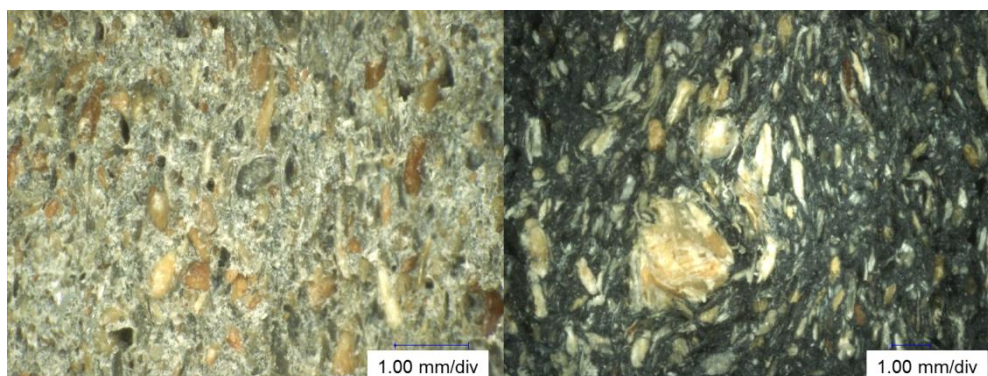


ABBILDUNG 13: MATERIALFEHLER IM HOLZ-POLYMER-WERKSTOFF - FASERAUSZÜGE NACH BIEGEPRÜFUNG WPC-2 (LINKS) UND FASERAGGLOMERATE WPC-3 (RECHTS)

#### 4.4.2 Zugversuch

Der Zugversuch wurde an Schulterzugstäben in Anlehnung an die DIN EN 527-4 [19] in Scheibenrichtung parallel zur Extrusionsrichtung durchgeführt. Die Zugstäbe wurden aus den plangefrästen Platten herausgefräst. Die Probendicke betrug 10 mm. Die E-Modulbestimmung erfolgte, wie für Holzwerkstoffe üblich zwischen 10 – 40%  $F_{max}$ . Abbildung 14 und Tabelle 12 stellen die Zugeigenschaften der getesteten Holz-Polymer-Werkstoffe gegenüber. Die Prüfgeschwindigkeit entsprach 10 mm/min. Die Feuchtigkeit der geprüften Proben lag bei 0,67 – 1,1%.

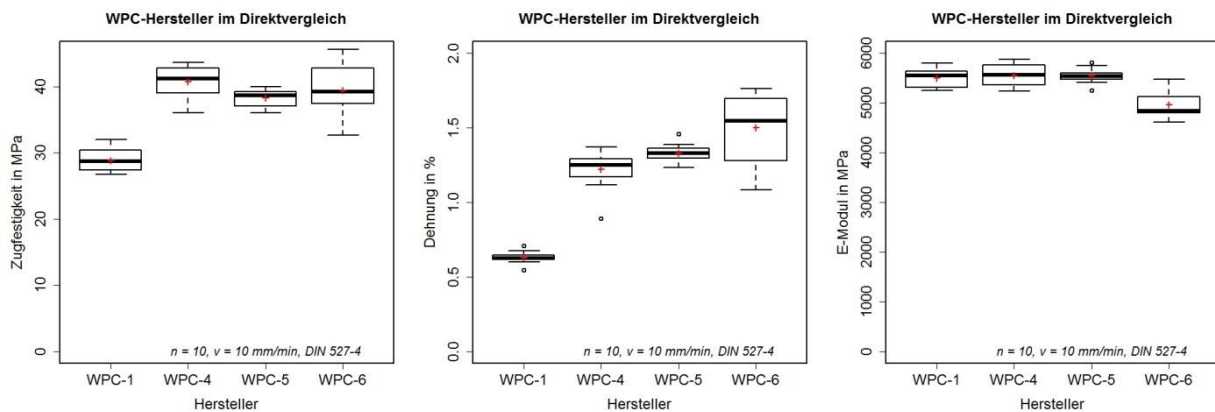


ABBILDUNG 14: MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN IM EINACHSIGEN ZUGVERSUCH, RICHTUNG S-PE

TABELLE 12: ZUGEIGENSCHAFTEN MITTELWERTE, PRÜFRICHTUNG SCHEIBE-PARALLEL ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG

Hersteller	WPC-1	WPC-4	WPC-5	WPC-6
Zugfestigkeit [MPa]	28,8	40,7	38,3	39,4
E-modul [MPa]	5509	5558	5551	4969
Bruchdehnung [%]	0,62	1,21	1,33	1,5

#### 4.4.3 Druckversuch

Ziel des einachsigen Druckversuches war es, das Druckverformungsverhalten zu analysieren und eine maximal zulässige Vorspannkraft für WPC abzuschätzen. Der Versuch wurde an Würfelproben mit einer Kantenlänge von  $a = 15$  mm für WPC und  $a =$  Plattendicke für Holzwerkstoffe durchgeführt. Die WPCs der Hersteller 2 und 3 wurden aufgrund ihrer schlechten Prozesssicherheit nicht geprüft. Für die Holzwerkstoffe wie auch für die WPCs wurde die Belastungsrichtung unterschieden. Je Belastungsrichtung wurden 12 Einzelproben geprüft. Die aufgezeichneten Messkurven wurden mit der Maschinenkennlinie korrigiert. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 2 mm/min und 10 mm/min. Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Druckverformungskurven verschiedener WPCs im Vergleich zu den getesteten Holzwerkstoffen. Darin wird deutlich, dass WPC durch seine hohe Drucksteifigkeit und Druckfestigkeit deutliche Vorteile gegenüber anderen Holzwerkstoffen aufzeigt. Das Versagen der Holz-Polymer-Werkstoffe ist unabhängig von der Belastungsrichtung durch einen Spröbruch bei Erreichen des Kraftmaximum gekennzeichnet, vgl. Abbildung 16. Abbildung 17 und Tabelle 13 fassen die ermittelten Druckeigenschaften sowohl für  $v = 2$  mm/min als auch für 10 mm/min zusammen.



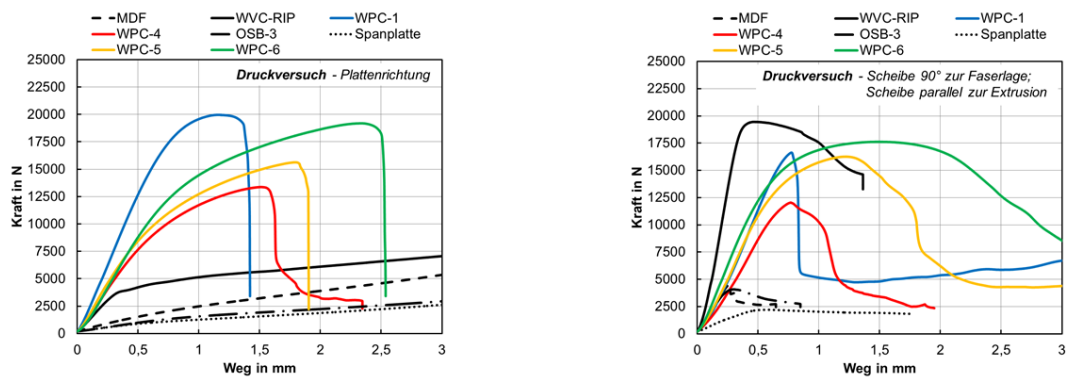


ABBILDUNG 15: DRUCK-VERFORMUNGSKURVEN DER GETESTETEN WPCS UND HOLZWERKSTOFFE V = 2 MM/MIN



ABBILDUNG 16: VERSAGENSVERHALTEN DRUCKPROBEN WPC-5 IN DEN RICHTUNGEN P-SE, S-PE, S-SE (V.L.N.R.)

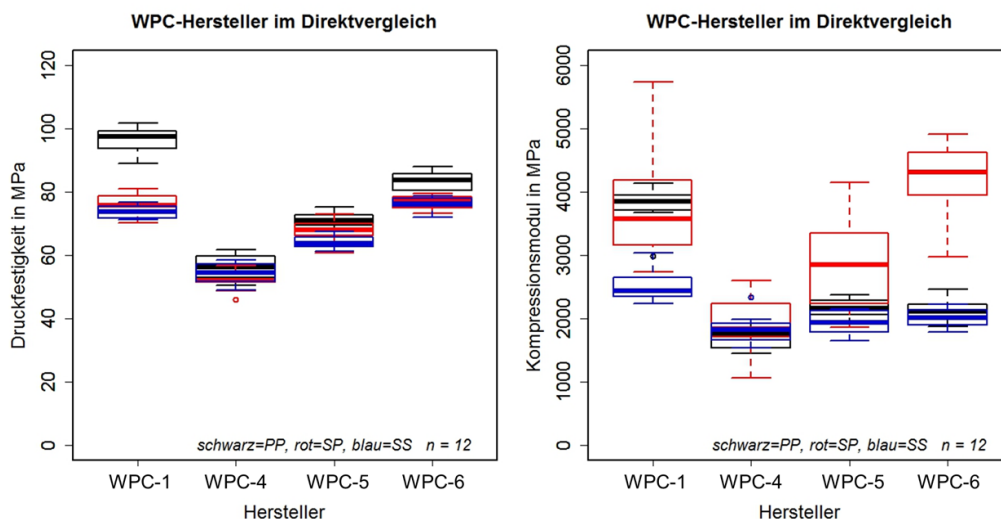


ABBILDUNG 17: DRUCKEIGENSCHAFTEN GETESTETER HOLZ-POLYMERWERKSTOFFE BEI V = 2 MM/MIN, PP = PLATTE PARALLEL ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG, SP = SCHEIBE PARALLEL ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG, SS = SCHEIBE SENKRECHT ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG (VERGLEICH ABBILDUNG 9)

TABELLE 13: DRUCKEIGENSCHAFTEN IN ABHÄNGIGKEIT DER PRÜFGESCHWINDIGKEIT, PRÜFRICHTUNG SCHEIBE-PARALLEL ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG

<b>Prüfgeschwindigkeit V = 2 mm/min</b>				
Hersteller	WPC-1	WPC-4	WPC-5	WPC-6
Druckfestigkeit bei Bruch [MPa]	76,16	52,45	67,8	76,7
Kompressionsmodul [MPa]	3766	1898	2883	4218
Stauchung bei Bruch [%]	3,1	4,2	5,6	7,3
<b>Prüfgeschwindigkeit V = 10 mm/min</b>				
Druckfestigkeit bei Bruch [MPa]	76,4	64,6	70,2	85,4
Kompressionsmodul [MPa]	3656	3472	4075	4272
Stauchung bei Bruch [%]	3,3	3,9	4,9	6,5

#### 4.4.4 Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit

Die Lochleibungsfestigkeit beschreibt den Widerstand der Lochwandung gegenüber dem Eindringen eines zylindrischen Körpers. Insbesondere für Quergewindebolzen-Steckschraubverbindungen ist dieser Festigkeitskennwert relevant. Die Berechnung der Lochleibungsfestigkeit erfolgt vereinfacht nach Formel 1 [20]. In der Berechnung wird die vom Bolzen projizierte Fläche berücksichtigt.

$$f_h = \frac{F_{max}}{d * t}$$

Die Versuchsdurchführung wurde in Anlehnung an die DIN EN 383 [18] gestaltet. Untersucht wurde die Scheibenbeanspruchung parallel zur Extrusionsrichtung (S-PE). Für die getesteten Bolzendurchmesser  $D_1 = 10$ ,  $D_1 = 12$ ,  $D_1 = 15$  mm wurde die Probekörpergeometrie in Abbildung 18 festgelegt. Diese orientierte sich an den konstruktiven Abmaßen der Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung. Die Probendicke entsprach dem Fräsmaß in Dickenrichtung von  $t = 15$  mm.

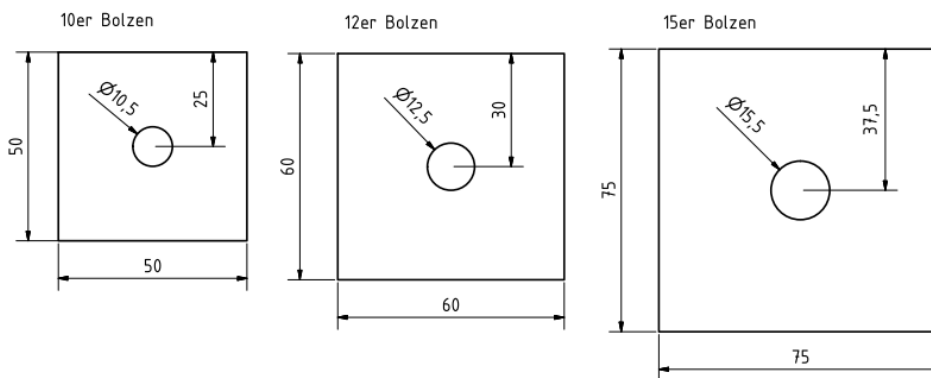


ABBILDUNG 18: PROBEKÖRPERGEOMETRIE WPC-5 IN ABHÄNGIGKEIT DES BOLZENDURCHMESSERS, PRÜFRICHTUNG S-PE

Die ermittelte Lochleibungsfestigkeit bei 1,5 mm/min fasst Tabelle 14 in Abhängigkeit der Bolzendurchmesser und der getesteten Holz-Polymer-Werkstoffe zusammen.

Das Versagensverhalten ist darüber charakterisiert, dass bei anliegender Höchstlast die maximale Verformung erreicht wurde und nach Überschreiten der Maximallast teilweise ein Spaltversagen vom Bolzengrund entlang der Belastungsrichtung ausging. Das Versagensbild zeigt Abbildung 19.

TABELLE 14: LOCHLEIBUNGSFESTIGKEIT DER HOLZ-POLYMER-WERKSTOFFE (RICHTUNG S-PE)

Hersteller	WPC-1	WPC-4	WPC-5			WPC-6
Bolzendurchmesser	12	12	10	12	15	12
Lochleibungsfestigkeit [MPa]	108,3	73,95	103,3	103	91,61	113,7
Verformung bei Fmax [mm]	0,59	0,6	0,8	0,82	0,8	1,18



ABBILDUNG 19: LOCHLEIBUNGSVERSAGEN BEI  $F_{MAX}$  (LINKS) NACH ÜBERSCHREITEN  $F_{MAX}$  (RECHTS) SPALTBRUCH

## 4.5 Durchsteckschraubverbindungen

### 4.5.1 Prinzip Fügeverfahren (Grundlagen)

Für die vorgespannte Durchsteckschraubverbindung sind die Grundlagen der VDI 2230 [21] zu entnehmen. Die Tragfähigkeit der Verbindung ist durch das Kraft-Verformungsverhältnis der zu verspannenden Werkstücke und der Schraube bestimmt. Grundlage hierfür bildet das Hook'sche Gesetz, welches die elastische Nachgiebigkeit der zu verspannenden Bauteile voraussetzt. Für Holzwerkstoffe ist dabei die undefinierbare Grenze zwischen elastischer und plastischer Verformung zu berücksichtigen. Das Vorspannen der Schraubverbindung ist einem Federsystem gleichzusetzen (unter der Voraussetzung der elastischen Verformung). Beim Anziehen der Schraube längt sich diese um den Betrag  $x$ , während die zu verspannenden Bauteile um einen Betrag  $y$  gestaucht werden. Dadurch resultiert im Klemmkontakt die Montagevorspannkraft. Die Schraube erfährt eine Zugkraft und die zu verspannenden Bauteile eine Druckkraft. Aufgetragen werden die Kraft-Verformungsverhältnisse der vorgespannten Schraubverbindung im Vorspannungsschaubild (Abbildung 20 links). Sowohl für den Montage- als auch den Betriebszustand sind die wirkenden Einzelkräfte darstellbar und unter Berücksichtigung der wirkenden Betriebskräfte (Zug/Druck) die Restklemmkraft in der Klemmfuge berechenbar. Es bildet das Grundelement der beanspruchungsgerechten Auslegung vorgespannter Schraubverbindungen.

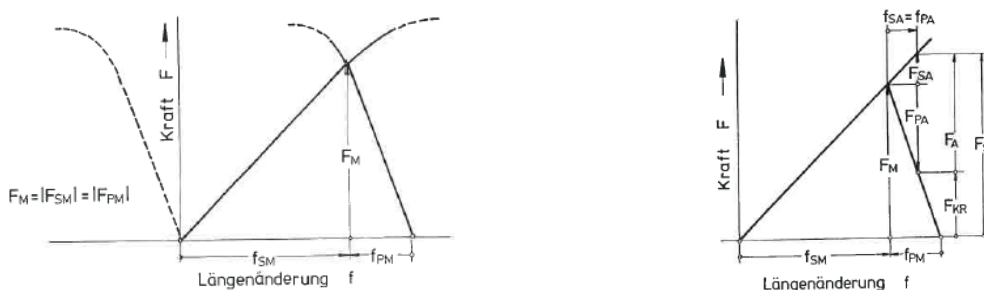


ABBILDUNG 20: VERSpannungsschaubild im Montagezustand (links) und im Betriebszustand mit einer Zugkraft als Betriebskraft [22]

Querkraftbeanspruchte Schraubverbindungen (auch gleitfest vorgespannte Verbindungen) sind durch die in der Trennfuge wirkende Klemmkraft bestimmt. Die Klemmkraft errechnet sich aus dem Produkt der Vorspannkraft und des Haftreibwertes. Die Erhöhung der Tragfähigkeit ist zum einen über eine hohe Vorspannkraft möglich. Für eine Vorspannkraft in

Durchsteckschraubverbindungen ist eine hohe Druckfestigkeit und Steifigkeit der zu verspannenden Bauteile gefordert. Hier setzt für Holz-Polymer-Werkstoffe die Grundlagenuntersuchung der Durchsteckschraubverbindung an.

Es stehen folgende Fragen im Fokus:

- Wie versagen DSV in Holz-Polymer-Werkstoffen?
- Welche maximale Vorspannkraft ist übertragbar?
- Welche Anzugsmomente sind notwendig?
- Wie stark relaxiert die Durchsteckschraubverbindung?
- Welche montagetechnischen Maßnahmen wirken der Relaxation entgegen?

#### 4.5.2 Anzugversuche und Schadensmechanismus

Die Anzugversuche dienten dazu, den Schadensmechanismus der Durchsteckschraubverbindungen festzustellen und die maximal zulässige Flächenpressung der DSV zu ermitteln. Getestet wurden die Werkstoffe WPC-1, WPC-4, WPC-5 und WPC-6 sowie ausgewählte Holzwerkstoffe und Kunststoffe. Den Verbindungsaufbau und die verwendeten Verbindungsmittel liefert Abbildung 21.

Es wurden ausschließlich die Schraubengröße M6 in den maschinenbaurelevanten Festigkeitsklassen 8.8 - 12.9 verwendet. Um die Flächenpressung im Klemmkontakt zu variieren wurden kleinere Scheiben nach DIN 9021 mit  $A = 212 \text{ mm}^2$  und größere Scheiben für Holzkonstruktionen nach DIN 440 R A =  $327,8 \text{ mm}^2$  verwendet. Die Schraubverbindungen wurden mit unterschiedlichen Vorspannkraften im Bereich von 9 – 17 kN angezogen und nach dem Lösen die Verbindungsstelle hinsichtlich plastischer Deformation beurteilt.

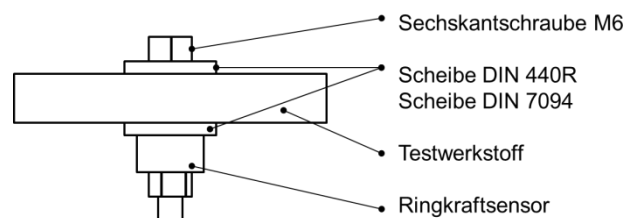


ABBILDUNG 21: VERBINDUNGSMITTEL UND VERSUCHSAUFBAU VERSCHRAUBUNGSVERSUCHE DSV

Tabelle 15 stellt das Versagensverhalten der Holz-Polymerwerkstoffe den getesteten Holzwerkstoffen gegenüber. Holzwerkstoffe werden ausschließlich verdichtet, indem sich die Zellhohlräume und Faserzwischenräume schließen. Die Unterlegscheibe arbeitet sich dabei in das Material ein. Die Schraube wird nicht weiter vorgespannt, da die gesamte Energie aus dem Anzugsmoment in die plastische Deformation des Werkstoffes umgesetzt wird.




Der Schadensmechanismus von WPC ist dem des Matrixmaterials gleichzusetzen. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass das Material unter der Unterlegscheibe an die Gewindegänge der Schraube fließt. Es bilden sich ein plastischer Verformungskegel und eine „Direktverschraubung“ aus. Ursache hierfür ist neben der aufgetragenen Druckkraft die ansteigende Temperatur im Reibkontakt unter der Unterlegscheibe. In diesem Fall ist die Funktionalität der DSV nicht mehr gegeben und stellt somit das Ausfallkriterium während der Montage der DSV von WPC dar.

Die resultierende Verformung in der Verbindungsstelle von WPC war nicht zu erfassen, da ausschließlich die Rauheitsspitzen im Reibkontakt abgetragen wurden. Tabelle 16 stellt die zulässige und nicht mehr zulässige plastische Deformation in der Verbindungsstelle gegenüber. Bei den Holzwerkstoffen betrug die plastische Deformation bei 9 kN Vorspannung ca. 0,59 – 1,39 mm.

Anschließend wurden alle WPC-Werkstoffe hinsichtlich dieses Schadensmechanismus untersucht sowie die entsprechende Vorspannkraft bestimmt um daraus die Flächenpressung zu berechnen. Tabelle 18 fasst das Ergebnis zusammen. Die Grüne Kennzeichnung in Tabelle 17 kennzeichnet, welche Schrauben mit den geforderten Vorspannkraften nach VDI 2230 [21] angezogen werden können.

Bei Verwendung von großen Unterlegscheiben aus dem Holzbau ist es möglich die Festigkeitsklassen von 8.8 – 12.9 unter den nach VDI geforderten Vorspannkraften anzuwenden. Dies stellt im Vergleich zu Holzwerkstoffen eine deutliche Verbesserung dar.

**TABELLE 15: SCHADENSMECHANISMUS IN DSV FÜR HOLZWERKSTOFFE, THERMOPLASTE UND WPC**

Holzwerkstoff	Thermoplast	WPC
		
Spanplatte und OSB-3 bei 5 kN A = 327,8 mm <sup>3</sup> (p= 15,25 MPa)	PE-HD bei 13 kN A = 327,8 mm <sup>2</sup> (p= 39,6 MPa)	WPC-1 bei 11 kN A = 212 mm <sup>2</sup> (p= 51,8 MPa)

**TABELLE 16: ZULÄSSIGE UND NICHT ZULÄSSIGE PLASTISCHE DEFORMATION**

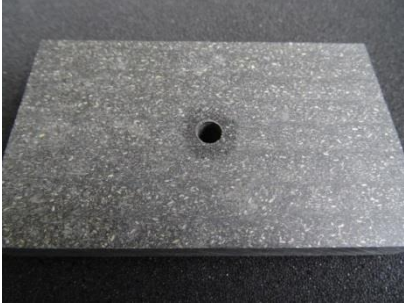
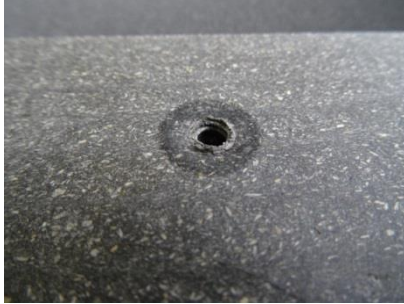





	
Zulässige plastische Deformation Rauheitsspitzen abgearbeitet	Nicht zulässige plastische Deformation Druckfließen des Materials an Gewindeflanken

TABELLE 17: ANWENDBARE SCHRAUBENGRÖßEN UND VORSPANNKRÄFTE NACH VDI

	Scheiben nach DIN 9021			Scheiben nach DIN 7094 (DIN 440 R)		
Fläche	A = 212 mm <sup>2</sup>			A = 327,8 mm <sup>2</sup>		
FK Schraube	M6 8.8	M6 10.9	M6 12.9	M6 8.8	M6 10.9	M6 12.9
Vorspannkraft	9,9 kN	14,5 kN	17 kN	9,9 kN	14,5 kN	17 kN
Pressung	46,7 MPa	68,4 MPa	80,2 MPa	30,2 MPa	44,23 MPa	51,8 MPa
OSB-3						
Spanplatte						
PE-HD						
WPC-1						
WPC-4						
WPC-5						
WPC-6						

TABELLE 18: VORSPANNKRAFT IM SCHADENSFALL

Werkstoff	Schadensfall	Vorspannkraft [kN]	Pressung [MPa] (A = 212 mm <sup>2</sup> )
PE-HD		8	37,7
WPC-1		17	80,2
WPC-4		11	51,9
WPC-5		12	56,6
WPC-6		17	80,2



### 4.5.3 Anziehmoment-Vorspannkraft-Kurven

Die Vorspannkraft ist die qualitätsbestimmende Größe in Schraubverbindungen. Sie wird aber im Anwendungsfall nicht direkt gemessen sondern über das Anzugsmoment aufgebracht. Aus diesem Grund ist es notwendig die Anziehmomente als Montagegröße im Schraubfall zu bestimmen. Zwischen Anziehmoment und Vorspannkraft liegt, unter Voraussetzung linearelastischen Verhaltens, ein linearer Zusammenhang vor, dessen Proportionalität über den Haftreibungswert im Gewinde und unter dem Schraubenkopf geregelt ist.

Die Anziehmomenten-Vorspannkraft-Kurven wurden an WPCs und ausgewählten Holzwerkstoffen bestimmt. Als Referenzwerkstoff wurden Versuche an Stahl hinzugezogen. Abbildung 22 zeigt die ermittelten Anzugsmomente der Holz-Polymerwerkstoffe. Aus den Diagrammen kann für die geforderte Vorspannkraft das Anziehmoment abgelesen werden. Die Mittelwerte sind in Tabelle 19 aufgeführt.

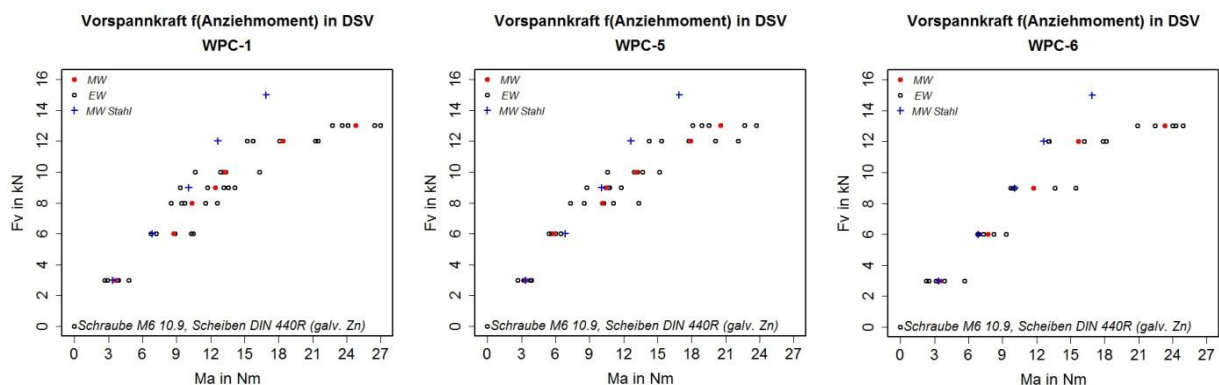


ABBILDUNG 22: ANZIEHMOMENT-VORSPANNKRAFTKURVEN DER HOLZ-POLYMER-WERKSTOFFE, MW = MITTELWERTE, EW = EINZELWERTE

TABELLE 19: MITTELWERTE DER ANZIEHMOMENTE AUS ABBILDUNG 22

Vorspannkraft $F_v$ in kN	Anziehmoment $M_A$ in Nm		
	WPC-1	WPC-5	WPC-6
3	3,6	3,4	3,5
6	8,7	5,8	7,7
8	10,3	10,1	
9	12,4	10,5	11,7
10	13,3	13,1	
11			
12	18,4	17,9	15,7
13	24,8	20,6	23,3

### 4.5.4 Vorspannkraftrelaxation

Ziel des Versuches war es die Vorspannkraftrelaxation der WPCs im benannten Schraubfall darzustellen. Der Zeitraum wurde so gewählt, dass Unterschiede erkennbar waren, aber die Versuchszeit nicht zu lange andauerte. Getestet wurden sowohl ausgewählte Holzwerkstoffe, WPCs und deren Matrixmaterial. Es wurden DSV an einer Werkstoffplatte

ausgeführt. Die verwendeten Verbindungsmittel und der Versuchsaufbau ist in Kapitel 2.3.1 beschrieben worden. Die Schrauben wurden bis zur Kopfaufgabe mit Hand angeschraubt und darüber hinaus mit der Schraubspindel vorspannkraftgesteuert auf 9 kN angezogen. Über die gesamte Versuchsdauer von 10 Minuten wurde die Vorspannkraft aufgezeichnet. Im Ergebnis wird deutlich, dass die WPCs unterschiedlich stark relaxieren (Abbildung 23). Dies liegt im Matrixmaterial begründet. Sehr vorteilhaft ist die geringe Relaxation im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen (Abbildung 24). Hervorzuheben ist WPC-1 auf PVC-Basis, dessen Relaxationsneigung sogar geringer ist als die des hochverdichteten Kunstharzpressholzes (WVC-KHP).

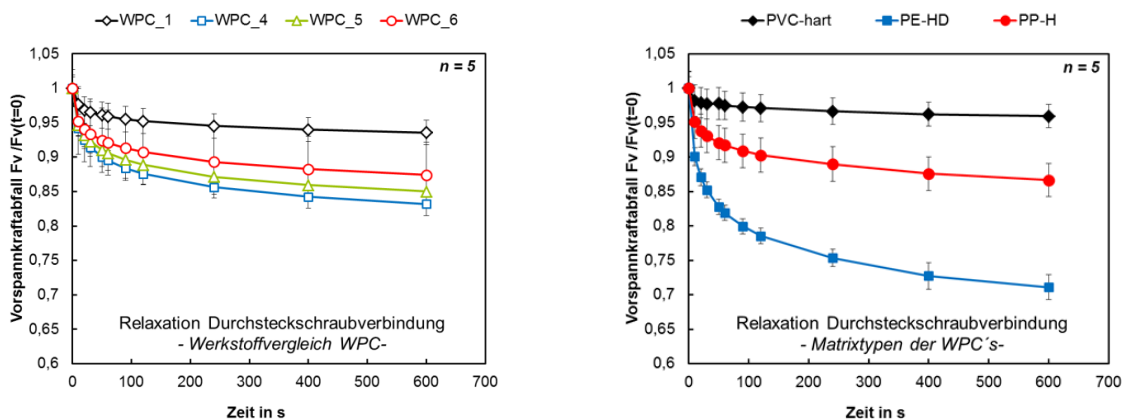


ABBILDUNG 23: VORSpannkraftRELAXATION VON DSV IN DEN HOLZ-POLYMERWERKSTOFFEN (LINKS) UND DEN MATRIXMATERIALIEN (RECHTS)

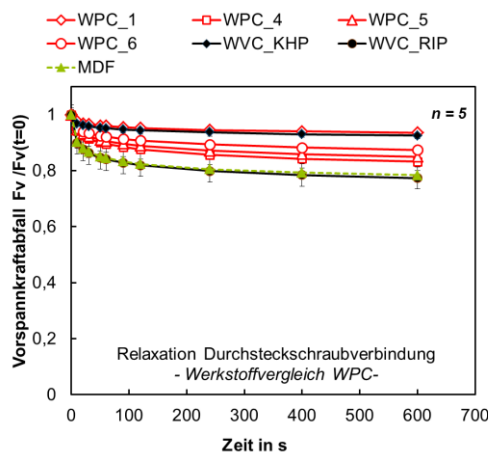


ABBILDUNG 24: VORSpannkraftRELAXATION VON DSV IN HOLZWERKSTOFFEN UND HLZ-POLYMERWERKSTOFFEN (WVC-KHP = WOOD VENEER COMPOSITE, HOCHVERDICHETES KUNSTHARZPRESSHOLZ, WVC\_RIP = BIRKENSPERRHOLZ RIGAPLY)

#### 4.5.5 Nachziehen der Schraubverbindung

Für Holzwerkstoffe ist es üblich vorgespannte Durchsteckschraubverbindungen mehrmals nachzuziehen um dem Vorspannkraftabfall entgegenzuwirken. Strukturell wird der Holzwerkstoff dabei verdichtet. Diese Methode wurde auf WPC übertragen, trotz dass WPC bereits ein homogen verdichteter Werkstoff ist. Ziel des Nachziehversuches ist es die Anzahl des Nachziehens zu ermitteln und den Einfluss auf die Vorspannkraftrelaxation darzustellen. Hierfür wurde jeweils die DSV auf 9 kN angezogen und in 2-minütigen Abständen auf die



Ausgangsvorspannkraft von ca. 9 kN nachgezogen. Dies wurde so lang wiederholt bis die Kraftdifferenz unter 200 N lag. Abbildung 25 stellt beispielhaft den Vorspannkraftverlauf von Stahl, Birkenperrholz (WVC-RIP) und einem WPC dar. Tabelle 20 fasst die Anzahl des Nachziehens der WPCs zusammen. Den Einfluss des Nachziehens auf die Relaxationsneigung von WPC zeigt Abbildung 26.

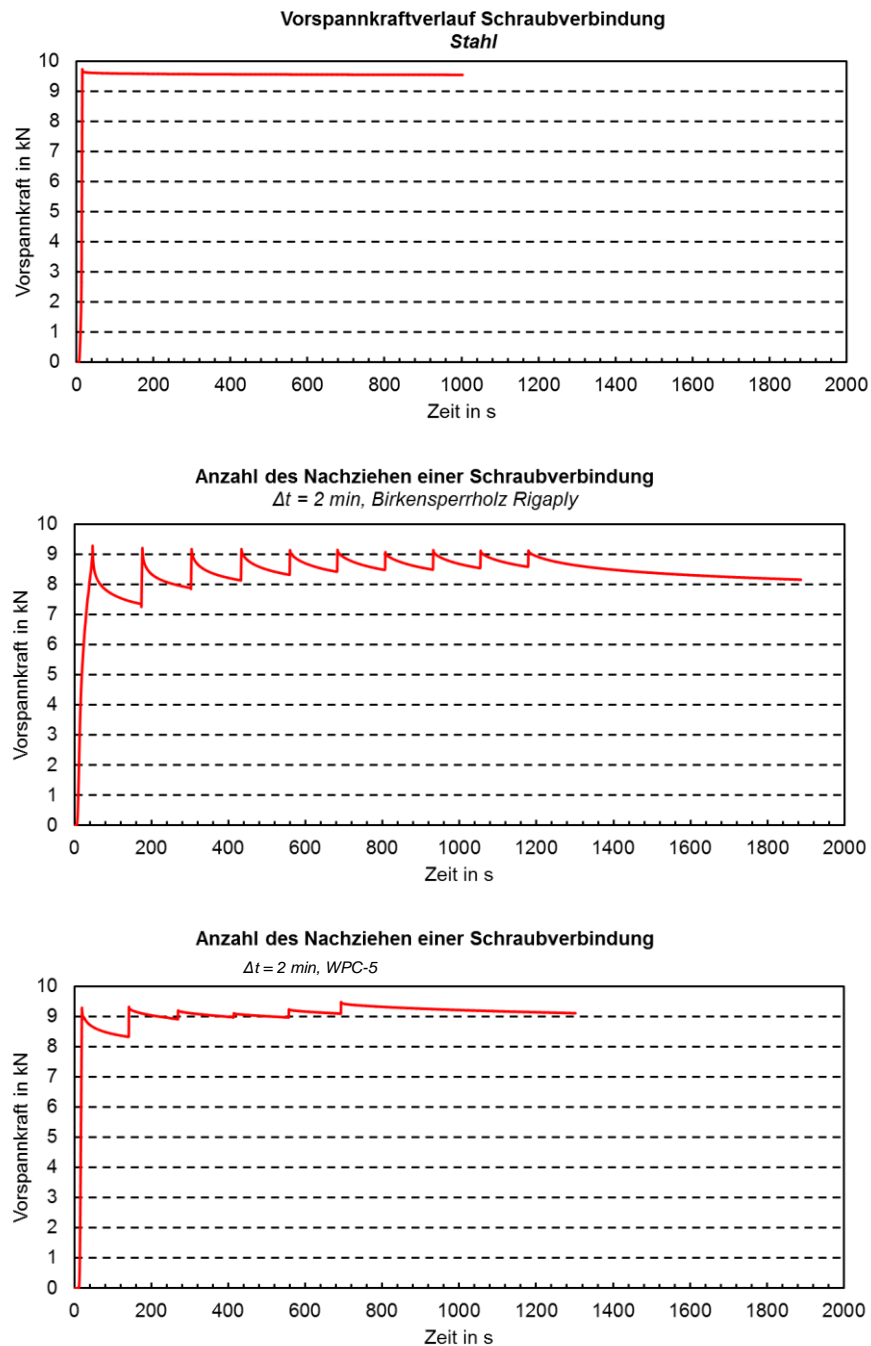


ABBILDUNG 25: VORSPANNKRAFTVERLAUF MIT NACHZIEHEN DER DSV FÜR BIRKENSPERRHOLZ (MITTE) UND HOLZ POLYMERWERKSTOFF WPC-5 (UNTEN), STAHLVERSCHRAUBUNG ALS REFERENZ (OBEN)

TABELLE 20: ANZAHL DES NOTWENDIGEN NACHZIEHENS

Werkstoff (n = 5)	Anzahl Nachziehen	Konstante Kraftdifferenz nach 2 min [kN]
WPC-4	3 - 4	0,227
WPC-5	2 - 4	0,193
WPC-6	2 - 3	0,192
WPC-1	1	0,161
PE	3 - 8	0,45
PVC	1	0,058
PP	2 - 3	0,2

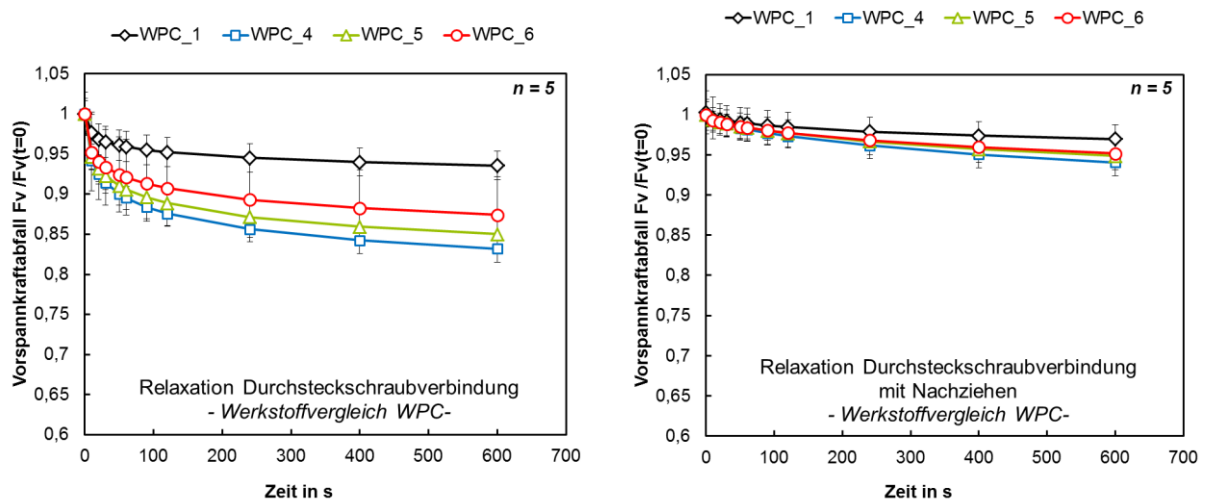


ABBILDUNG 26: VORSpannkraftverlauf mit und ohne nachziehen der DSV

#### 4.5.6 Vorspannkraftverlauf mit Überspannen und Schraubennachzug

Über einen Zeitraum von 200 h wurde die Vorspannkraft in Durchsteckschraubverbindungen überwacht. Die Versuchsdauer orientierte sich nach den von Niemz [23] durchgeführten Relaxationsversuchen an Holzwerkstoffen.

Die Schraubverbindungen wurden gezielt im überelastischen Bereich bei 13,5 kN verspannt und mehrmals nachgezogen. Das Verschrauben erfolgte vorspannkraftgesteuert mittels Schraubspindel bei  $n = 5$  U/min. Der Versuchsaufbau und die Verbindungsmittel gleichen den vorangegangenen Verschraubungsversuchen (siehe Abbildung 21). Die Materialfeuchtigkeit lag bei ca. 1%.

Das Ergebnis in Abbildung 27 zeigt für WPC eine maximale Relaxation über 200h auf 70%. Für Holzwerkstoffe wurde in [24] und [23] eine maximale Relaxation auf 60% über den Testzeitraum von 200 h festgestellt.



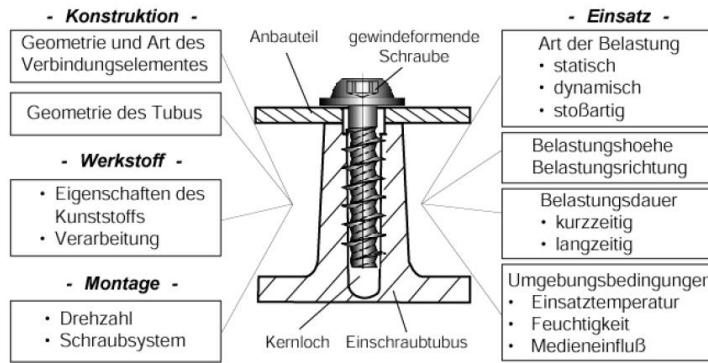


ABBILDUNG 28: EINFLUSSPARAMETER AUF DIE DIREKTVERSCHRAUBUNGEN IN KUNSTSTOFFEN [31]

Abbildung 29 stellt den schematischen Montageprozess anhand des Drehmomenten- und Vorspannkraftverlaufes in Abhängigkeit des Einschraubweges beim Direktverschrauben einer gewindeformenden Schraube am Beispiel eines Spritzgussbauteiles nach DVS 2241-1 dar. Der Drehmoment- und Vorspannkraftverlauf beschreibt die charakteristischen Prozessphasen a) Eindrehen (ohne Vorspannung), b) Anziehen (Aufbringen der Vorspannkraft, Kopfauflage) und c) Überdrehen (Versagen der Verbindung) der Direktverschraubung. Das Eindrehen der Schraube bis zur Kopfauflage ist durch das Eindrehmoment  $M_E$  charakterisiert. Es nimmt linear mit zunehmender Einschraubtiefe zu. Das Moment, welches beim Erreichen der gewünschten Vorspannkraft anliegt, wird als Anzugsmoment  $M_A$  definiert. Als Richtwert für die Höhe des Anziehmomentes gilt:

$$M_A = M_E + \frac{1}{2} \dots \frac{1}{3} (M_{\ddot{U}} - M_E) \quad (2), [31]$$

Im Falle des Überdrehens der Schraube versagt die Verbindung durch Abscheren des geformten Muttergewindes entlang der Schraubenumhüllenden sofern vorher das Schraubenbruchmoment nicht erreicht worden ist. Dieses Versagen während der Montage wird mit dem Überdrehmoment  $M_{\ddot{U}}$  beschrieben. Ab diesem Punkt nimmt die Vorspannkraft rapide ab. Als Kriterium für eine hohe Montagesicherheit sollte eine große Momentendifferenz  $\Delta M$  zwischen Einschraub- und Überdrehmoment sichergestellt sein. Die Momentendifferenz kennzeichnet den Arbeitsbereich der Schraube [28].

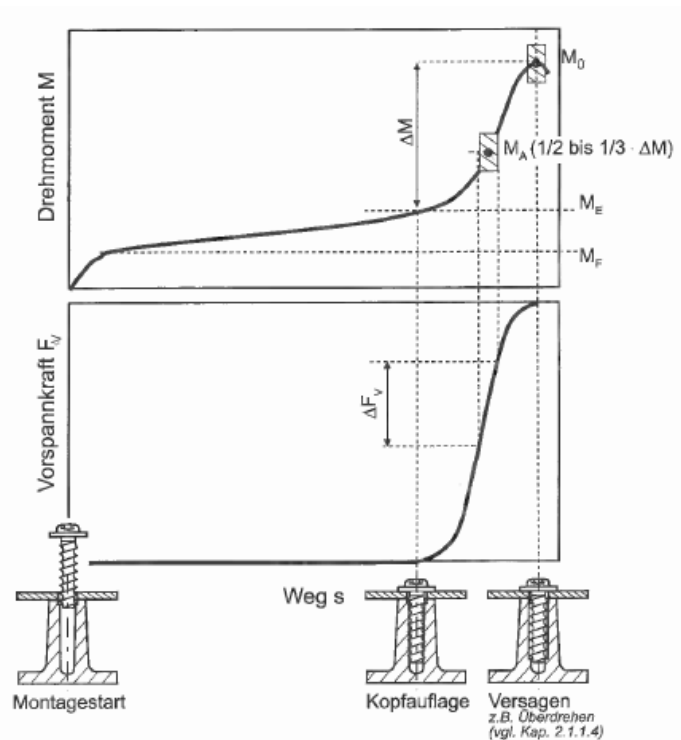


ABBILDUNG 29: MOMENTEN- UND VORSpanNKRAFTVERLAUF BEIM MONTAGEPROZESS [31]

Für den Anwendungsfall der Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben (Direktverschraubung) in Holz-Polymer-Halbzeugen ist die Verbindungsstelle nicht als Tubus ausgeformt, sondern als gebohrte Einschraubstelle. Sowohl im Montage- als auch im Betriebszustand können je nach Auslegung der Verbindung die Schadensszenarien Schraubenbruch, Schraubenauszug und Rissentstehung entlang der Schraubachse auftreten. Um gegen diese Schadensszenarien zu dimensionieren sind entsprechende Untersuchungsreihen unter Berücksichtigung der Werkstoffeigenschaften des Holz-Polymer-Halbzeuges angedacht, die Einfluss auf die Tragfähigkeit der Direktverschraubung nehmen:

TABELLE 21: EINFLUSSPARAMETER DIREKTVERSCHRÄUBUNG WPC

Konstruktive Parameter	Gewindegeometrie Kernlochdurchmesser $d_K$ Einschraublänge $l_E$ Bauteildicke $t$
Montagetechnische Parameter	Montagedrehzahl
Werkstofftypische Parameter	Einschraubrichtung Holz-Polymer-Werkstoff Materialfeuchtigkeit Viskoelastizität

In erster Linie steht dabei der Montageprozess im Fokus, um die Tragfähigkeit und die maximal übertragbare Vorspannkraft der Verbindung zu erhöhen. Entsprechende Grundlagen zu Optimierungskriterien und Versuchsdurchführung dieses Fügeverfahrens liefern die gesamten Literaturstellen [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31].

## 4.6.2 Versuchsbeschreibung

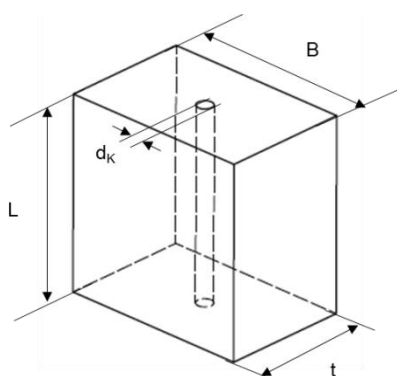
Zur Ermittlung konstruktiver Einflussparameter auf die Direktverschraubung von hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen wurden dem Stand der Technik entsprechende Montageversuche (Überdrehversuch ohne/ mit Kopfreibung und integrierter Vorspannkraftmessung) und statische Schraubenauszugsversuche parallel zur Schraubachse hinzugezogen [31] [32].

Als untersuchungsrelevant galten Schraubentypen, die nach aktuellem Stand der Technik bereits in hochgefüllte WPC-Extrusionsprofilen eingesetzt werden und handelsüblich zur Verfügung stehen [10], [11], [7], [9]. Zusätzlich wurden gewindeformende Schrauben für Duroplaste und eine gewindefurchende Schraube für Leichtmetalle (metrische Kompatibilität) mit in die Untersuchung einbezogen. Bei der Schraubenauswahl wurde auf einen nahezu einheitlichen Gewindenennndurchmesser  $d_1 = 6$  mm geachtet. Folgende Schraubentypen wurden für hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe untersucht:

- Schraube für Thermoplaste STS® plus Fa. Schriever;  $d_1 = 6$  mm
- Schraube für Holzwerkstoffe Eckverbinder KOKF Fa. Rampa;  $d_1 = 6,3$  mm
- Schraube für Leichtmetalle EJOT ALtracs® Plus;  $d_1 = 6$  mm (metrische Kompatibilität)
- Schraube für Duroplaste SLS® Fa. Schriever;  $d_1 = 6$  mm

Es wurden die Holz-Polymer-Werkstoffe WPC-1, WPC-5, WPC-6 untersucht, wobei die Hauptuntersuchungen an dem Werkstoff WPC-5 der Halbzeugarten Decking und Bohle durchgeführt wurden. Zusätzlich wurden handelsübliche extrudierte PE-HD, PP und PVC-hart Platten (Dicke 15 mm) in die Untersuchung mit eingebunden. Die grundsätzliche Probekörpergeometrie der Untersuchungsreihen zu ESV mit gewindeformenden Schrauben stellt Tabelle 22 dar.

TABELLE 22: PROBEKÖRPERGEOMETRIE + ABMAßE JE VERSUCHSREIHE



Versuchsreihe	B [mm]	t [mm]	L [mm]	$d_k$ [mm]
I Schraubentyp	60	80	15	5
II Vorbohrung	60	40	15	Var.
III Einschraublänge	60	40	40;60	aus
IV Bauteildicke	60	Var.	40;60	Versuchsreihe II

Für die definierte Schraubmontage und die Untersuchung relevanter Montagegrößen wurde mit einer servomotorisch betriebenen Schraubspindel der Firma Bosch Rexroth gearbeitet. Die zusätzliche Ausstattung mit einem externen Messaufbau zur Messung der Vorspannkraft während der Schraubmontage ermöglichte das vorspannkraftgeregelte Anziehen der Schraubverbindung. Erfasst werden die Kenngrößen Drehmoment, Drehwinkel, Zeit, Vorspannkraft und Momentendifferenz aus Eindreh- und Überdrehmoment. Der

Versuchsaufbau ist in Abbildung 30 dargestellt. Es wurden folgende Montageversuche durchgeführt.

- Überdrehversuch ohne Kopfreibung und Vorspannkraftmessung
- Überdrehversuch mit Kopfreibung und Vorspannkraftmessung
- Anzugversuch (vorspannkraftgesteuert)



ABBILDUNG 30:VERSCHRAUBUNGSPRÜFSTAND MIT SCHRAUBSPINDEL BOSCH REXROTH (LINKS) UND PROBEINEINSPANNUNG FÜR MONTAGEVERSUCHE (RECHTS)

Die Bestimmung des statischen Ausziehparameters, als übliche Kenngröße für Holzwerkstoffe, erfolgte im statischen Auszugversuch in Anlehnung an die DIN 320 [32]. Der Gesamtabstand der Probekörperabstützung wurde einheitlich auf 40 mm festgelegt. Die Verbindungsmittel wurden mit 50 N vorbelastet und mit 10 mm/min aus dem Probekörper gezogen. Im Rahmen dieser Versuche wurde die Maximallast beim Versagen bestimmt und das Versagensverhalten beurteilt. Die Materialfeuchtigkeit lag bei 1,2 % bis 1,7%. Die Berechnung des statischen Ausziehparameters  $f_{ax}$  erfolgte nach [24] (S. 157).

#### 4.6.3 Einfluss der Schraubengeometrie, Kernlochdurchmesser, Werkstoff

In Abbildung 31 sind die statischen Ausziehparameter  $f_{ax}$  der untersuchten Schraubentypen in den Holz-Polymer-Werkstoffen dargestellt. Für die Berechnung des stat. Ausziehparameters wurde die effektiv im Grundwerkstoff verankerte, tragende Fläche zugrunde gelegt, deren Berechnung nach [24] erfolgte. Der stat. Ausziehparameter der getesteten WPC-Typen liegt trotz der unterschiedlichen Rezepturzusammensetzung der Halbzeuge in einem ähnlichen Bereich. Im Vergleich zu anderen in der Fördertechnik eingesetzten Holzwerkstoffen (WVC Birkenperrholz  $f_{ax} = 30 \text{ N/mm}^2$  [24]) kann ein fast vierfach höherer stat. Ausziehparameter erreicht werden. Vermutlich ist der Hauptgrund in der deutlich höheren Rohdichte der Holz-Polymer-Werkstoffe im Vergleich zu konventionellen Holzwerkstoffen zu sehen.

Unabhängig vom Schraubentyp ist das Vorbohren der Einschraubstelle zwingend erforderlich. Ein Einschrauben ohne Vorbohren wie es beispielsweise in Holzwerkstoffen angestrebt wird, ist in den hochverdichteten Holz-Polymer-Werkstoffen nicht möglich. Beim Eindrehen der Schraube (selbst mit Bohrspitze) ist es nicht möglich den hochverdichteten Holzwerkstoff zu verdrängen. Infolge hoher Radialspannungen reißt die Einschraubstelle vollständig auf.

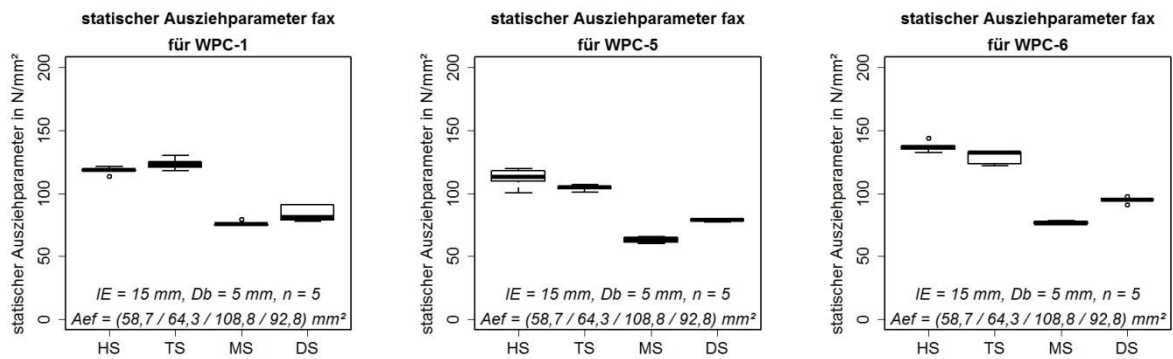


ABBILDUNG 31: STATISCHE AUSZIEHPARAMETER  $F_{Ax}$  DER UNTERSUCHTEN SCHRAUBENTYPEN (HS = SCHRAUBE FÜR HOLZWERKSTOFFE, TS = SCHRAUBE FÜR THERMOPLASTE, MS = SCHRAUBE FÜR LEICHTMETALLE, DS = SCHRAUBE FÜR DUROPLASTE), LE = EINSCHRAUBLÄNGE, DB = DK = KERNLOCHDURCHMESSER

Um die Fragestellung der vorteilhaften Schraubengeometrie und des notwendigen Kernlochdurchmessers zu klären, schließen sich die Ergebnisse des Überdrehversuches ohne Kopfreibung in Abbildung 32 an. Die Versuche dienten dazu, den optimalen Schraubentyp mit entsprechendem Kernlochdurchmesser zu ermitteln, bei dem eine hohe Momentendifferenz zwischen Eindreh- und Überdrehmoment und eine hohe Vorspannkraft erreicht werden kann.

Nahezu unabhängig vom Vorbohrdurchmesser erreicht der Schraubentyp für Thermoplaste eine hohe Momentendifferenz, die durch das geringe Eindrehmoment und hohe Überdrehmoment erreicht wird. Die Tatsache, dass die größten Vorspannkraften in WPC mittels Schrauben für Thermoplaste aufgebracht werden können, verstärkt das Argument für diese Schraubenauswahl.

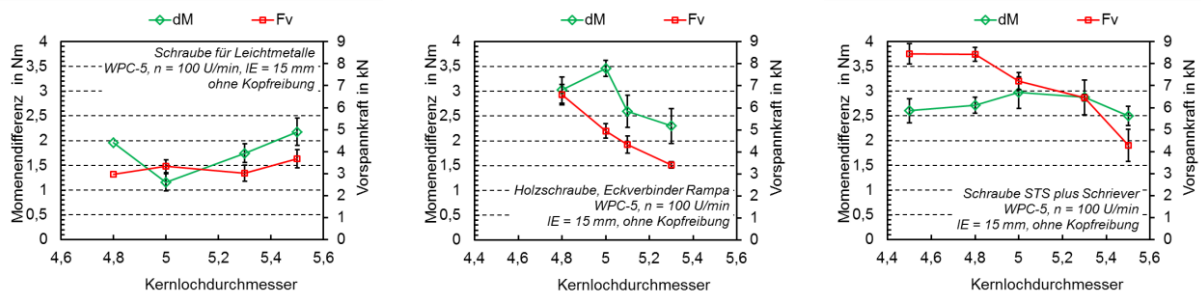


ABBILDUNG 32: MONTAGEPARAMETER IM ÜBERDREHVERSUCH OHNE KOPFREIBUNG UNTERSCHIEDLICHER SCHRAUBENTYPEN UND KERNLOCHDURCHMESSER IN WPC-5

Der Werkstoffvergleich wurde ausschließlich am Schraubentyp für Thermoplaste STS durchgeführt, da dieser aus theoretischen Vorbetrachtungen und den Ergebnissen im Überdreh- und Schraubenauszugversuch als vorteilhafter Schraubentyp für Holz-Polymer-Werkstoffe hervorgeht. Abbildung 33 stellt den Einfluss des Kernlochdurchmessers in den untersuchten Holz-Polymer-Werkstoffen dar. Zusätzlich sind die Montagegrößen des jeweiligen Matrixmaterials mit dargestellt. Hierfür wurde der vom Schraubenhersteller empfohlene Kernlochdurchmesser für das jeweilige Matrixmaterial zugrunde gelegt [33]. Im Vergleich zum ungefüllten Matrixmaterial weisen alle WPC-Werkstoffe höhere Momentendifferenzen und höhere Vorspannkraften auf. Der optimale Vorbohrdurchmesser



verschiebt sich im Vergleich zum ungefüllten Matrixmaterial hin zu größeren Werten, mit Ausnahme des WPC-1 auf PVC-Basis.

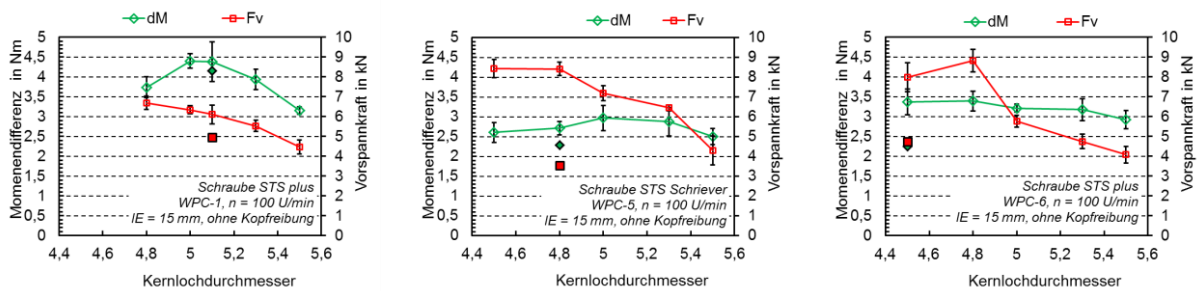


ABBILDUNG 33: MONTAGEPARAMETER IM ÜBERDREHVERSUCH OHNE KOPFREIBUNG DER SCHRAUBE FÜR THERMOPLASTE IN VERSCHIEDENEN WPC-WERKSTOFFEN, GEFÜLLTE SYMBOLE = MATRIXMATERIAL MIT MONTAGEEMPFEHLUNGEN NACH [31]

Die Auswahl des optimalen Kernlochdurchmessers ist stets ein Kompromiss der Montagegrößen Vorspannkraft und Momentendifferenz. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende optimale Kernlochdurchmesser ableiten:

- WPC-1 (PVC-Basis) →  $d_k = 5,1 \text{ mm}$  ( $0,85 \cdot d_1$ )
- WPC-5 (PE-Basis) →  $d_k = 5 \text{ mm}$  ( $0,83 \cdot d_1$ )
- WPC-6 (PP-Basis) →  $d_k = 4,8 \text{ mm}$  ( $0,8 \cdot d_1$ )

#### 4.6.4 Einfluss der Einschraubrichtung auf die Einschraubtiefe

Die Ergebnisse der Montageparameter in Abhängigkeit der Einschraubtiefe reihen sich in die bekannten Sachverhalte des Standes der Technik ein. Mit zunehmender Einschraubtiefe nimmt das Überdrehmoment bis zum Erreichen des Schraubenbruchmomentes (leere Punkte in Abb. 5) zu, wo hingegen das Eindrehmoment nahezu konstant bleibt bzw. einen geringen Anstieg erfährt. Die mit der Einschraublänge zunehmende Momentendifferenz ermöglicht damit das Aufbringen höherer Anziehungsmomente, respektive Vorspannkraften. Bei der Auswahl der notwendigen Einschraubtiefe sollte jedoch das Bruchmoment der Schraube nicht unbeachtet bleiben. Ab einer Einschraublänge von  $l_E = 40 \text{ mm}$  ist der Grenzbereich der Schraubenbelastbarkeit erreicht, wodurch die Schraube bereits während der Montage versagt.

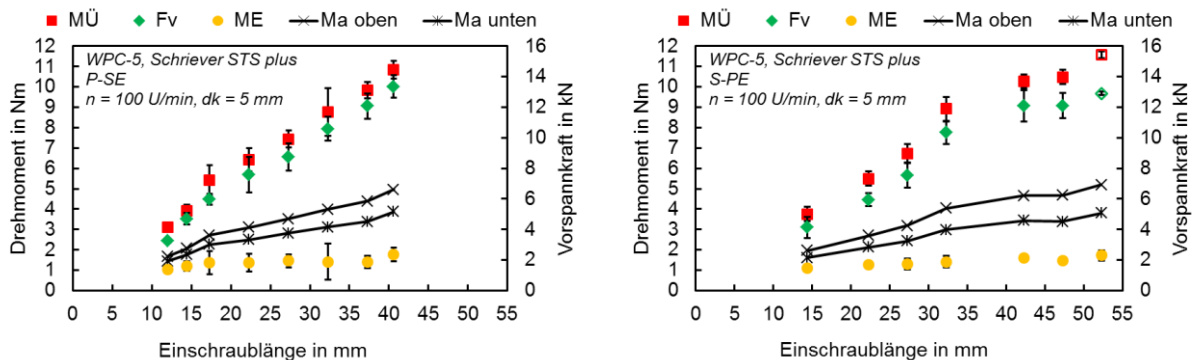


ABBILDUNG 34: MONTAGEPARAMETER IM ÜBERDREHVERSUCH OHNE KOPFREIBUNG MIT VARIIERENDEN EINSCHRAUBLÄNGEN, SCHRAUBE FÜR THERMOPLASTE, LEERE SYMBOLE = SCHRAUBENBRUCH, BERECHNUNG ANZIEHMOMENT NACH FORMEL 2

Der wesentliche Unterschied stellt sich in Bezug auf die Einschraubrichtung ein. Generell werden in Plattenrichtung senkrecht zur Extrusion höhere Vorspannkraften erreicht als in

Scheibenrichtung. Dies ist durch die senkrecht zur Schraubachse verlaufende Faserorientierung zu erklären, die ein gutmütigeres Schubversagen beim Überdrehen der Schraube nach sich zieht als die parallel zur Schraubachse verlaufende Faserorientierung (Abbildung 34).

Die Querschnittsbilder des abgescherten Gewindes beider Verschraubungsrichtungen zeigt Abbildung 35. Liegt die Einschraubrichtung senkrecht zum Faserverlauf können höhere Kräfte übertragen werden, da sich die Gewindeflanken besser zwischen den einzelnen Fasern verankern. Das Schadensbild nach dem Überdrehversuch in Abb. 6 zeigt einen eckigen Rissverlauf entlang der Gewindegänge, welcher mit Herausreißen einzelner Fasern einhergeht.

Liegt die Einschraubrichtung parallel zum Faserverlauf scheren die Gewindegänge beim Überdrehen vollständig ab. Es entsteht während des Gewindeabscherens eine glatte Trennebene.

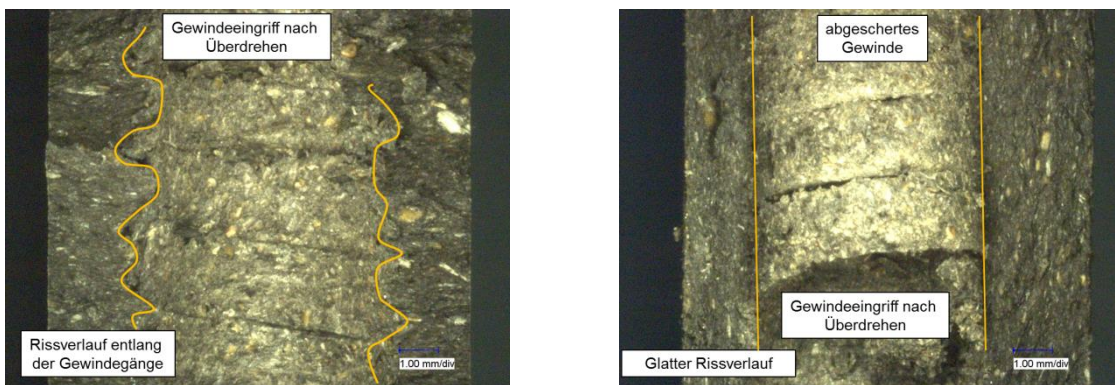


ABBILDUNG 35: BRUCHBILD NACH ÜBERDREHVERSUCH, EINSCHRAUBRICHTUNG PARALLEL ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG (LINKS), EINSCHRAUBRICHTUNG SENKRECHT ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG (RECHTS)

Abbildung 36 stellt die maximal übertragbare Vorspannkraft in Abhängigkeit der 3 Einschraubrichtungen PSE, SPE und SSE für die Konstruktionsbohle WPC-5 dar. Es zeigt sich, dass in beiden Scheibenrichtungen kein Unterschied hinsichtlich der maximal übertragbaren Vorspannkraft vorhanden ist. Der Unterschied zwischen Platten- und Scheibenrichtung liegt hingegen bei etwa 17%.

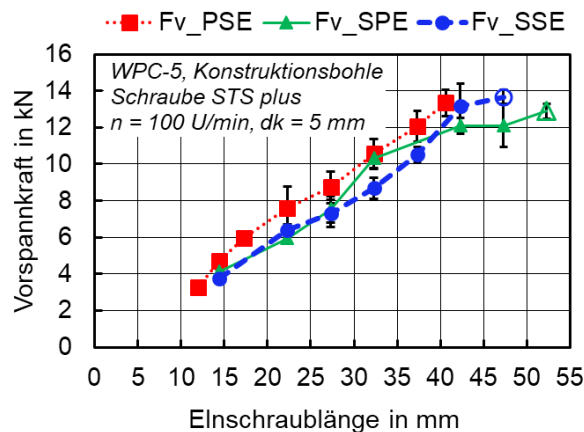


ABBILDUNG 36: MAXIMAL ÜBERTRAGBARE VORSpanNKRAFT IM ÜBERDREHVERSUCH FÜR DIE DREI EINSCHRAUBRICHTUNGEN

#### 4.6.5 Einfluss der Einschraubrichtung auf die Bauteildicke

Ziel der Versuchsreihe ist es, die Mindestbauteildicke zu ermitteln, ab der kein Rissversagen der Einschraubstelle während der Montage eintritt. Hierfür wurde eine ausreichend große Einschraubtiefe gewählt und die Bauteildicke zwischen 10 mm bis 20 mm variiert. Die Untersuchung der Montagegrößen bei variiert Bauteildicke sind für die Einschraubrichtung Platte senkrecht zur Extrusion und Scheibe parallel zur Extrusion in Abbildung 37 dargestellt.

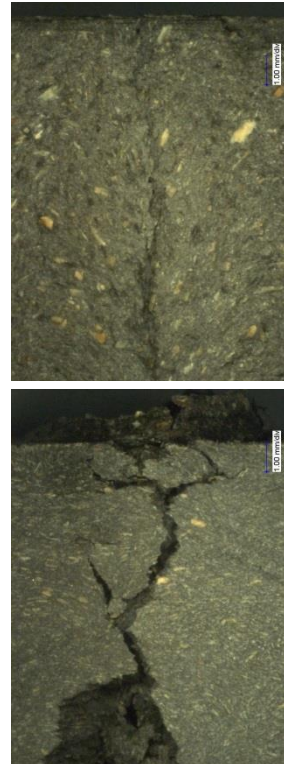
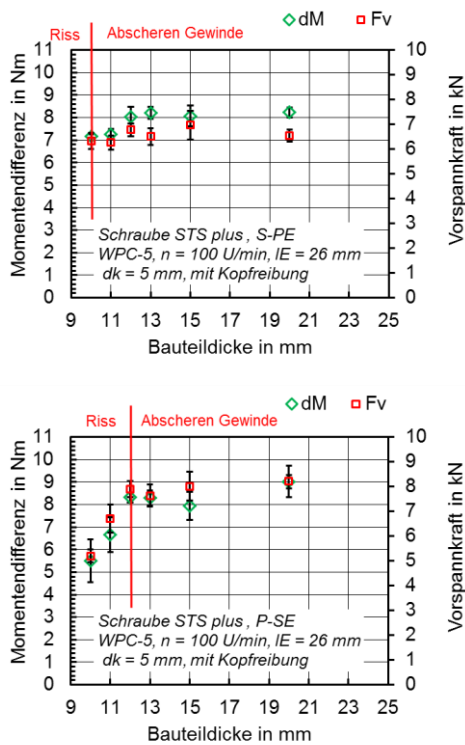


ABBILDUNG 37: MONTAGEPARAMETER (LINKS) UND OBERFLÄCHIGER RISSVERLAUF (RECHTS) IM ÜBERDREHVERSUCH MIT KOPFREIBUNG MIT UNTERSCHIEDLICHEN BAUTEILDICKEN, EINSCHRAUBRICHTUNG PARALLEL ZUR EXTRUSION (OBEN) EINSCHRAUBRICHTUNG SENKRECHT ZUR EXTRUSION (UNTEN)

Der Schadensverlauf während des Überdrehversuches zeigte, dass die Rissentstehung mit der Gewindeabschereung des porösen Materials einhergeht. Das Abschereung des geformten Gewindes führt zu einer lokalen Span- und Faseranhäufung die eine Vergrößerung der Radialspannung nach sich zieht und bei entsprechend kleinen Bauteildicken zur Rissbildung entlang der Schraubachse beiträgt. Dies ist beim Einschrauben in Extrusionsrichtung (S-PE) bis zur Bauteildicke von 10 mm und beim Einschrauben senkrecht zur Extrusionsrichtung (P-SE) bis 12 mm aufgetreten.

Die Ursache des richtungsabhängigen Spaltverhaltens der Einschraubstelle ist vermutlich auf die richtungsabhängige Spaltfestigkeit des Materials zurückzuführen. Die Gewindeflanken initiieren im Material mit Faserverlauf parallel zur Gewindeflanke (senkrecht zur Schraubachse) Spalttrisse, die das Aufreißen der Einschraubstelle selbst bei größeren Bauteildicken nach sich zieht.

Verläuft die Faserorientierung senkrecht zur Gewindeflanke (parallel zur Schraubachse) wirken die Holzfasern möglicherweise als Risshemmer. In der Folge reißt die Einschraubstelle erst bei geringerer Bauteildicke auf.

Für die einfache Montage von extrudierten Profilen ohne vorgeformten Tubus sollte die Richtungsabhängigkeit jedoch vernachlässigt und Bauteildicken größer gleich 13 mm gewählt werden. Dies entspricht mindestens dem 2,2-fachen des Nenndurchmessers der Schraube.

#### 4.6.6 Montagedrehzahl

Für Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben wurde der Einfluss der Montagedrehzahl auf die maximal erreichbare Vorspannkraft, der Momentendifferenz aus Eindreh- und Überdrehmoment sowie die Relaxationsneigung direkt nach Verschraubungsende untersucht.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine hohe Montagedrehzahl für geringe Montagezeiten sinnvoll. Bei Polymeren kann es dabei jedoch zu Festigkeitsverlusten auf Grund der hohen Temperaturentwicklung in der Verschraubungsstelle kommen [28]. An dieser Stelle wurde ein Kompromiss erarbeitet.

Im ersten Test wurden Drehzahlen zwischen 5 – 600 U/min im einstufigen Montagetest untersucht. Einstufig bedeutet, dass die Montagedrehzahl beim Eindrehen bis zur Schraubkopfauflage und dem Anziehen gleich ist. Dabei zeigte sich, dass mit zunehmender Montagedrehzahl die maximal übertragbare Vorspannkraft in der Verbindung sinkt (Abbildung 38).

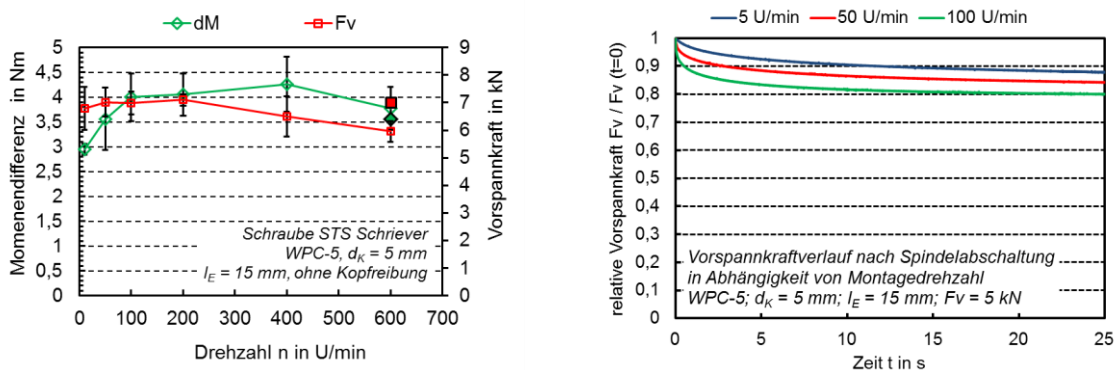


ABBILDUNG 38: EINFLUSS DER MONTAGEDREHZAHL AUF DIE MONTAGEPARAMETER, GEFÜLLTE SYMBOLE = ZWEISTUFIGE SCHRAUBMONTAGE (LINKS) UND AUF DIE VORSpanNKRAFTRELAXATION (RECHTS)

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde die zweistufige Schraubmontage getestet. Das Eindrehen der Schraube bis zur Kopfauflage erfolgt bei 600 U/min, das Anziehen der Schraubverbindung bei 100 U/min. In der zweistufigen Schraubmontage liegt die Vorspannkraft auf dem gleichen Niveau wie beim einstufigen Verfahren bei 100 U/min. Die Prozesszeit kann jedoch durch das schnellere Eindrehen deutlich gesenkt werden. Aus diesen Gründen ist die zweistufige Schraubmontage aus technischer und wirtschaftlicher Sicht auch für hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe sinnvoll. Um die Anziehdrehzahl weiter zu optimieren, wurde die Relaxationsneigung (Abbildung 38) für die Drehzahlen 5 U/min, 50 U/min und 100 U/min direkt nach Montagestopp betrachtet. Dabei ist der Vorspannkraftabfall direkt nach Montagestopp bei hohen Drehzahlen stärker ausgebildet als bei geringen Anziehdrehzahlen. Aus diesem Grund sollte das Anziehen der Schraubverbindung so langsam wie möglich erfolgen.

## 4.6.7 Montageempfehlungen von gewindeformenden Schrauben in WPC

Schraubengewinde:	Spezialgewinde für Thermoplaste
Kernlochdurchmesser:	$d_k = 0,8 \dots 0,85 d_1$ (abh. vom Holz-Polymer-Werkstoff)
Einschraublänge:	$l_E < 5 d_1$
Bauteildicke	$t > 2,2 d_1$

Für den Einfluss der Werkstoffanisotropie zeigten die Montageversuche einen Abminderungsfaktor von 0,83. Es werden in Plattenrichtung senkrecht zur Extrusion größere Vorspannkkräfte übertragen als in Scheibenrichtung. Dies wird in der Berechnung über den Abminderungsfaktor A berücksichtigt.

## 4.7 Einschraubverbindungen mit Quergewindebolzen

### 4.7.1 Prinzip Fügeverfahren (Grundlagen)

Die Quergewindebolzen-Steckschraubverbindungen sind übliche lösbare Verbindungstechniken aus dem Holz- und Möbelbaubereich. Im Vergleich zu Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben besteht durch das Zusatzelement Quergewindebolzen die Möglichkeit der sicheren Wiederholmontage.

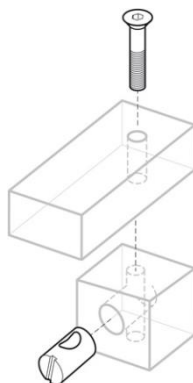


ABBILDUNG 39: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER QUERGEWINDEBOLZEN-STECKSCHRAUBVERBINDUNG [32]

Das Prinzip der Verschraubung und die resultierende Werkstoffbeanspruchung von Schraubverbindungen mit Quergewindebolzen ähneln denen der vorgespannten Durchsteckschraubverbindungen (DSV). Der Quergewindebolzen, als verborgenes metallisches Zusatzelement im Bauteil, übernimmt die Funktion der Mutter. Der QGB wird in eine senkrecht zur Schraube liegende Bohrung eingefügt. Zwischen Bolzen und Bauteil liegt ein Formschluss vor, der dafür sorgt, dass beim Festziehen der Schraube kein Kontern auf der Gegenseite der Verbindung notwendig ist. Daher sind Quergewindebolzen mit Steckschrauben in Eckstößen montagetechnisch vorteilhaft anzuwenden.

Beim Anziehen der Verbindung werden die Schraube auf Zug und der Bauteilwerkstoff auf Druck beansprucht. Im Bereich des Quergewindebolzens erfährt der Bauteilwerkstoff eine zusätzliche Lochleibungsbeanspruchung. Die Lochleibungsfestigkeit berechnet sich aus dem

Verhältnis von Druckkraft zu der vom Bolzendurchmesser projizierten Fläche. Die Lochleibungsfestigkeit ist neben den geometrischen Einflüssen (Bolzendurchmesser, Bauteildicke) von der Druckfestigkeit des Bauteilwerkstoffes abhängig.

Dimensionierungsvorschriften für vorgespannte QGB-Steckschraubverbindungen sind nicht bekannt. Es existieren aber Bemessungsvorschriften für Bolzenverbindungen bzw. Stabdübelverbindungen sowohl im Holzbau als auch im Faserverbundbereich [35], [36], [31], die als Ausgangspunkt für die Optimierung des Fügeverfahrens Anwendung finden. Entsprechende Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit und dem Versagen der Bolzenverbindung sind in Abbildung 40 dargestellt. In Abhängigkeit der konstruktiven Einflussgrößen (Bolzendurchmesser, Eindringtiefe, Randabstand, Bauteildicke) treten die Schadenszenarien in Bolzenverbindungen auf. Ob diese ebenfalls bei QGB-Steckschraubverbindungen im Holz-Polymer-Werkstoff auftreten gilt es zu untersuchen. Die Untersuchungsgrößen sind in Tabelle 23 aufgestellt.

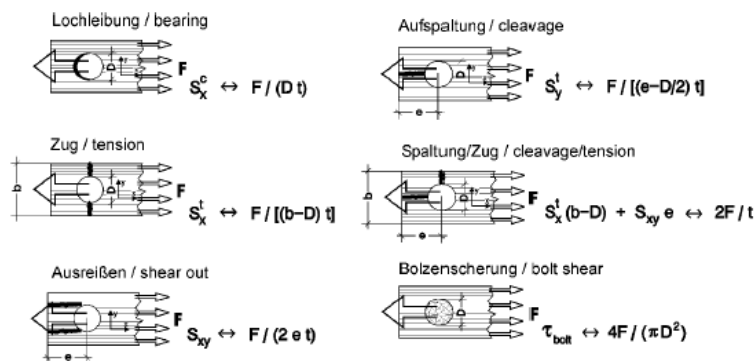


ABBILDUNG 40: VERSAGENSMECHANISMEN UND DEREN BERECHNUNG VON BOLZENVERBINDUNGEN FÜR FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE NACH [36]

TABELLE 23: EINFLUSSPARAMETER QUERGWINDEBOLZEN-STECKSCHRAUBVERBINDUNG IN WPC

Konstruktive Parameter	Bolzendurchmesser $D_1$ Eindringtiefe $e$ Randabstand $w$ ( $b$ in Abb. 38) Bauteildicke $t$
Werkstofftypische Parameter	Einschraubrichtung Holz-Polymer-Werkstoff Materialfeuchtigkeit Viskoelastizität

#### 4.7.2 Versuchsbeschreibung

Zur Ermittlung konstruktiver und werkstofftypischer Einflussparameter (Kapitel 4.7.1.) auf die QGB-Steckschraubverbindung der Holz-Polymer-Werkstoffe wurden statische Auszugversuche der Quergewindebolzen in Anlehnung an die [30] durchgeführt. Sie dienen als Montagevorversuche für eine vorgespannte Schraubverbindung. Aus diesem Grund wurde der Versuchsaufbau in Abbildung 41 um eine 10 mm dicke Gegenplatte mit zentrischer Durchgangsbohrung  $D = 7,5$  mm erweitert. Sie stellt das Anbauteil während der Schraubmontage dar. Zur Ermittlung der maximal übertragbaren Vorspannkraft und des



Überdrehmomentes wurde der Überdrehversuch mittels Schraubspindel durchgeführt. Die Beschreibung des Versuches ist Kapitel 4.6.2. zu entnehmen.

Analog zu den Fügeversuchen mit gewindeformenden Schrauben in Kapitel 4.6 wurden die Versuche an plan gefrästen Vollprofilen der Hersteller WPC-1, WPC-5, WPC-6 sowohl senkrecht als auch parallel zur Extrusionsrichtung durchgeführt.

Um die konstruktiven Einflussgrößen herauszuarbeiten wurden diese in der jeweiligen Versuchsreihe gemäß Abbildung 41 rechts variiert. Als Verbindungsmittel wurden M6-Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 und M6-Quergewindebolzen der Außendurchmesser 10 mm, 12 mm, 15 mm und 20 mm verwendet. Die statischen Auszugversuche wurden mittels M6 Gewindestange 12.9 durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 10 mm/min.

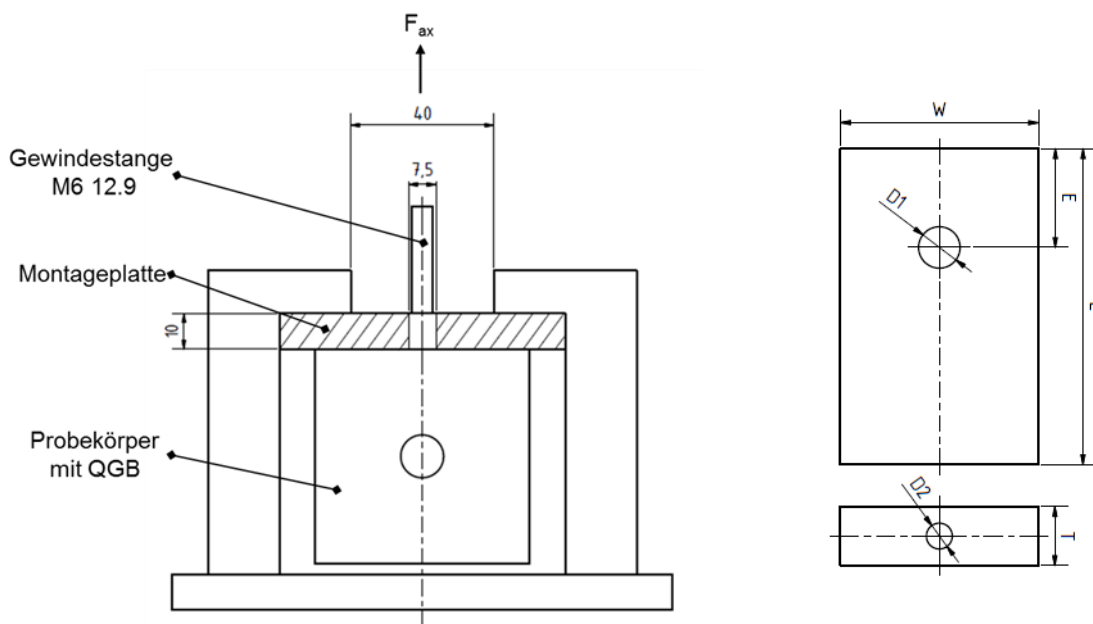


ABBILDUNG 41: VERSUCHSAUFBAU (LINKS) UND PROBEKÖRPERGEOMETRIE (RECHTS) DES STATISCHEN AUSZUGVERSUCHES

### 4.7.3 Bolzendurchmesser $D_1$ und Eindringtiefe $e$

Die Ergebnisse der Auszugskraft in Abhängigkeit des Eindringtiefen/Durchmesser-Verhältnisses ( $e/D_1$ -Verhältnis) zeigen, dass die Auszugskraft mit größeren Bolzendurchmessern aufgrund der größeren tragenden Fläche zunimmt (Abbildung 42). Bezogen auf die projizierte tragende Fläche erreichen die Bolzen  $D_1 = 10 \text{ mm} - 15 \text{ mm}$  annähernd gleiche Auszugsfestigkeiten, wobei die Auszugsfestigkeit des QGB mit  $D_1 = 20 \text{ mm}$  um 10 MPa geringer ist. Unabhängig vom Bolzendurchmesser steigen die Auszugskräfte mit größerer Eindringtiefe an. Dies ist ebenfalls an einem veränderlichen Schadensmechanismus zu erkennen. Grundsätzlich ist das Versagen eine Kombination aus Spaltbruch entlang der Schraubachse und Lochleibungsversagen im Bolzengrund. Der konstante Bereich der Auszugskräfte zeigt den zunehmenden Lochleibungsanteil im Versagensbild an. Ein reines Lochleibungsversagen trat erst ab einem  $e/D_1$ -Verhältnis von größer gleich 3 bzw. 5 auf. Das Lochleibungsversagen geht dabei nicht mit den maximal erreichten Auszugskräften einher. Das Versagen ist in Abhängigkeit der Eindringtiefe für den Bolzen  $D_1 = 10 \text{ mm}$  in Abbildung 42 dargestellt.

Um große Bolzendurchmesser für die Tragfähigkeit der Verbindung nutzen zu können, sind entsprechende Bauteildimensionen notwendig. Beispielsweise ist für den

Bolzendurchmesser  $D_1 = 20$  mm eine Eindringtiefe von  $e = 80$  mm notwendig, um die maximale Tragfähigkeit zu erreichen. Entsprechende Bauteilgrößen sind in diesem Fall gefordert. Um eine technisch-technologisch sinnvolle Bolzenauswahl zu treffen werden folgende Beurteilungskriterien eingeführt (Tabelle 24):

- $F_{\max} >$  geforderte Vorspannkraft nach [21] für M6 Schrauben 10.9  
(= 13,2 kN mit  $\mu_H = 0,2$ )
- Max. Auszugskraft / proj. Fläche (Relation zur tragenden Fläche)
- Max. Auszugskraft / Eindringtiefe ( $e$ ) (Relation zur Bauteildimension)

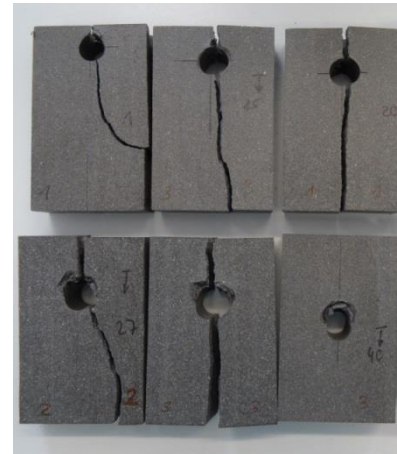
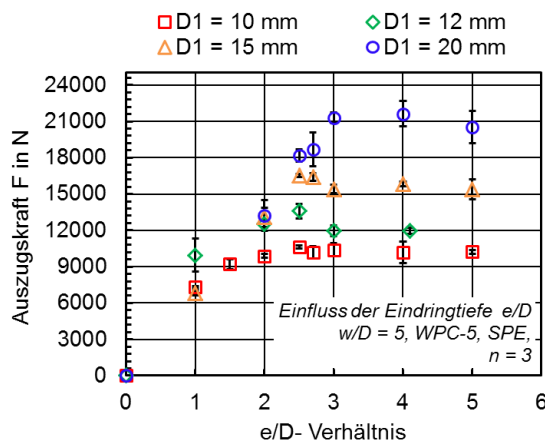


ABBILDUNG 42: AUSZUGSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT DES  $e/D_1$ -VERHÄLTNISS (LINKS) UND SCHADENSMECHANISMEN AM BEISPIEL DES QGB  $D_1 = 10$  MM MIT ZUNEHMENDER EINDRINGTIEFE  $e$  (RECHTS)

Die Auswertung der Beurteilungskriterien fasst Tabelle 24 zusammen. Auf Basis der benannten Kriterien geht hervor, dass der Bolzendurchmesser  $D_1 = 12$  mm für Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen am vorteilhaftesten ist, da alle Bewertungskriterien erfüllt werden.

TABELLE 24: BEURTEILUNG DER TECHNISCH-TECHNOLOGISCHEN BOLZENAUSWAHL (G = GUT, M = MITTEL, S = SCHLECHT)

Beurteilungskriterium	1			2	3
Bolzendurchmesser [mm]	$F_{\max}$ [N]	$e$ [mm]	$A_{\text{proj}}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{\max}/e$ [N/mm]
10	10640 (S)	25	116,8	91,0 (M)	425,6 (M)
12	13590 (G)	30	146,8	92,56 (G)	453 (G)
15	16530 (G)	37,5	181,8	90,91 (M)	440,8 (M)
20	21630 (G)	80	266,8	81,06 (S)	270,4 (S)

#### 4.7.4 Randabstand $w$

Die Untersuchung variierender Randabstände  $w$  im statischen Auszugversuch zeigte das vorteilhafte  $w/D_1$ -Verhältnis = 5 für QGB-Steckschraubverbindung in hochgefüllten Holz-Polymerwerkstoffen auf. Dies ist unabhängig vom Bolzendurchmesser. Abbildung 43 stellt die entsprechende Untersuchungsreihe für die Bolzendurchmesser  $D_1 = 10 - 15$  mm dar. Das  $e/D_1$ -Verhältnis wurde ausgehend von den Ergebnissen des Bolzendurchmessers und der Eindringtiefe aus Kapitel 4.7.3 auf 2,5 festgelegt. Das Versagensbild in Abhängigkeit des Randabstandes stellt Abbildung 44 dar.





ABBILDUNG 43: VERSAGENS-BILD DER QGB-STECKSCHRAUBVERBINDUNG MIT ZUNEHMENDEM W/D-VERHÄLTNIS AM BEISPIEL DES BOLZENDURCHMESSERS  $D_1 = 10$  MM

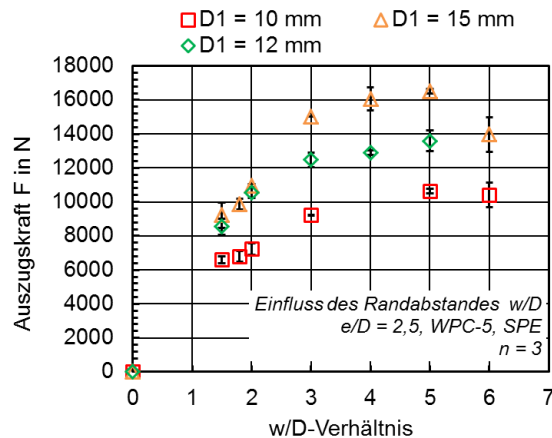


ABBILDUNG 44: AUSZUGSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT DES W/D-VERHÄLTNISSES

#### 4.7.5 Bauteildicke t

Die Untersuchung der Bauteildicke wurde an der Konstruktionsbohle des Herstellers WPC-5 durchgeführt. Hierfür wurde die Bohle symmetrisch auf die Nenndicken 15 mm bis 40 mm gefräst. In dieser Versuchsreihe wurden ausschließlich die QGB  $D_1 = 12$  mm,  $l = 40$  mm getestet. Alle Bauteildicken versagten während der Auszugsversuche durch Spaltbruch, welcher ab Probendicken von 20 mm durch zusätzliches Lochleibungsversagen überlagert wurde. Bei einer Bauteildicke von  $t = 40$  mm versagten zusätzlich die Quergewindebolzen durch Biegung. Abbildung 45 stellt die erreichten Auszugskräfte und die auf die tragende Fläche normierte Auszugskraft dar. Auffallend ist, dass die Auszugsfestigkeit mit zunehmender Bauteildicke abfällt. Als Ursache hierfür werden lokal unterschiedliche Druckfestigkeiten über die Bauteildicke vermutet.

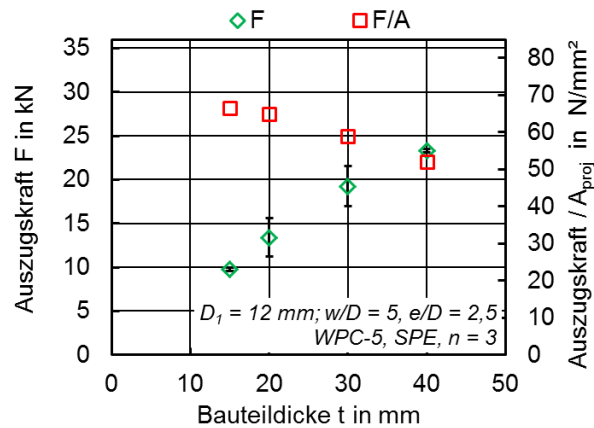


ABBILDUNG 45: AUSZUGSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT DER BAUTEILDICKE

#### 4.7.6 Einfluss der Einschraubrichtung und des Holz-Polymer-Werkstoffes

Abbildung 46 stellt die Auszugskräfte in Abhängigkeit des Eindringtiefen/Durchmesserhältnisses aller getesteten Holz-Polymer-Werkstoffe senkrecht und parallel zur Extrusionsrichtung zusammen. Die konstruktiven Parameter wurden ausgehend von den Versuchen an WPC-5 auf  $D_1 = 12 \text{ mm}$ ;  $w/D_1 = 5$ ;  $L = 60 \text{ mm}$  festgelegt.

Bei allen getesteten Holz-Polymer-Werkstoffen zeigte sich, dass bei einer Einschraubrichtung senkrecht zur Extrusionsrichtung größere Auszugskräfte erreicht wurden, wobei die Differenz beider Einschraubrichtungen zwischen 500 N (WPC-6) und 2000 N (WPC-1) schwankt. Die maximal erreichten Auszugskräfte und die entsprechenden  $e/D_1$ -Verhältnis fasst Tabelle 25 zusammen. Da sowohl senkrecht als auch parallel zur Extrusionsrichtung die maximale Auszugskraft bei gleichem  $e/D_1$ -Verhältnis erreicht wurde, ist die Einschraubrichtung in Bezug auf die Eindringtiefe bei allen Holz-Polymer-Werkstoffen vernachlässigbar. Um die geringeren Auszugskräfte in Scheibenrichtung parallel zur Extrusion zu berücksichtigen ergeben sich die Abminderungsfaktoren der Anisotropie in Tabelle 25.

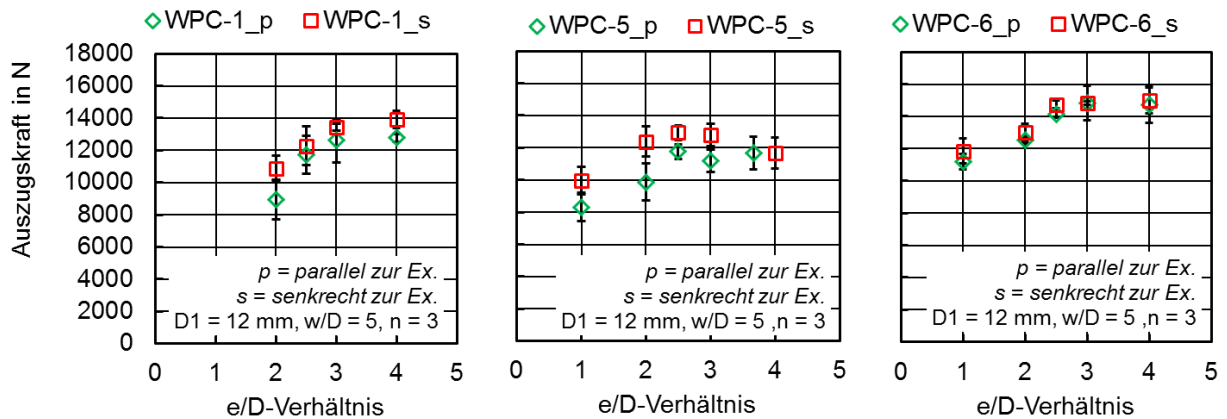


ABBILDUNG 46: AUSZUGSKRAFT IN ABHÄNGIGKEIT DES E/D<sub>1</sub>-VERHÄLTNISSES DER WPC-WERKSTOFFE, EINSCHRAUBRICHTUNG SENKRECHT (S) UND PARALLEL (P) ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG

TABELLE 25: MAXIMAL ERREICHTE AUSZUGSKRÄFTE BEI ENTSPRECHENDEM E/D<sub>1</sub>-VERHÄLTNIS DER WPC-WERKSTOFFE, EINSCHRAUBRICHTUNG SENKRECHT (S) UND PARALLEL (P) ZUR EXTRUSIONSRICHTUNG

Hersteller	WPC-1		WPC-5		WPC-6	
	s	p	s	p	s	p
F <sub>max</sub> in kN	13,5	12,5	13	11,5	14,5	14
F <sub>max</sub> bei e/D <sub>1</sub>	3	3	2,5	2,5	3	3
Abminderungsfaktor A = Anisotropie	1	0,93	1	0,88	1	0,96

Für die Montageversuche (Überdrehversuche und Anziehversuche) wurden die QGB-Verbindungen nach den jeweiligen e/D<sub>1</sub>-Verhältnissen der WPC-Werkstoffe in Tabelle 25 montiert. Im Montageversuch mit Kopfreibung wurden die maximal übertragbare Vorspannkraft und das Überdrehmoment im Versagensfall ermittelt. Abbildung 47 zeigt das Lochleibungsversagen der im Überdrehversuch geschädigten Proben. Zusätzlich wurden in Einzelversuchen die Vorspannkraft in Abhängigkeit der Anzugsmomente im Vergleich zur Stahlverschraubung ermittelt.

Die Verschraubungen wurden parallel zur Extrusionsrichtung ausgeführt. Das Anziehen der Schraube erfolgte sehr langsam mit 5 U/min. Die erhaltenen maximalen Vorspannkraft und Überdrehmomente liefert Abbildung 48. Die Anzugsmoment-Vorspannkraft-Kurven sind in den Diagrammen Abbildung 48 ersichtlich.



ABBILDUNG 47: LOCHLEIBUNGSVERSAGEN DER PROBEN IM ÜBERDREHVERSUCH WPC-5, WPC-1, WPC-6 (V.L.N.R.)

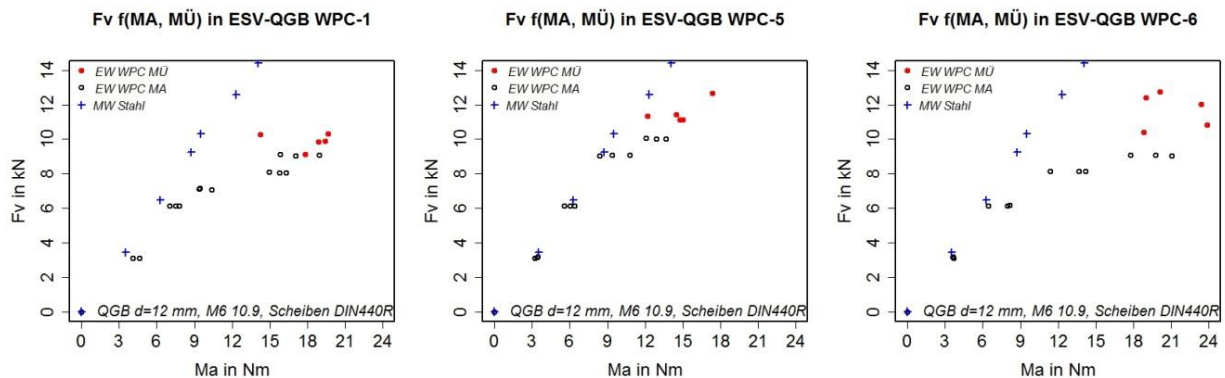


ABBILDUNG 48: ANZIEHMOMENT-VORSPANNKRAFTKURVEN DER ESV-QGB'S IN DEN HOLZ-POLYMER-WERKSTOFFEN

Für die Verschraubung von Werkstoffen und Verbindungsmittel gleicher Nachgiebigkeit besteht zwischen Anziehmoment und Vorspannkraft ein linearer Zusammenhang [22]. Der Proportionalitätsfaktor ist der Haftreibungwert. Dieser Zusammenhang setzt linear elastisches Materialverhalten der zu verspannenden Bauteile voraus, siehe blaue Kennpunkte für Stahl in Abb. 48. Da im vorliegenden Verschraubungsfall WPC eine deutlich geringere Nachgiebigkeit als die Verbindungsmittel aus Stahl haben und viskoelastisches Materialverhalten vorliegt, resultiert die Abweichung vom idealen Verschraubungsfall.

Die Kurvenverläufe der ESV-QGB-Verschraubung aller WPCs zeigen, dass der lineare Zusammenhang nur bis zu einer Grenzvorspannkraft (ca. 6 – 8 kN) vorliegt. Über diesem Kraftwert hinaus überwiegt die plastische Deformation des Werkstoffes bis hin zum Versagen der Verbindung. In diesem Fall geht während des Anziehvorganges Energie zum Verspannen verloren, die in die plastische Deformation des Bauteils umgesetzt wird. Dadurch nimmt das Anzugsmoment der Schraube bis zum Bruchmoment zu, ohne dabei die Vorspannung in der Verbindung zu erhöhen. Der Holz-Polymer-Werkstoff des Herstellers WPC-5 zeigt einen ausgeprägten linearen Bereich, der vorteilhaft für die Schraubmontage zu bewerten ist.

#### 4.7.7 Montageempfehlungen für Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung

Bolzendurchmesser:	$D_1 = 12 \text{ mm}$
Eindringtiefen/Durchmesserverhältnis:	$e/D_1 = 2,5 \dots 3$
Randabstand/Durchmesserverhältnis:	$w/D_1 = 5$

Abminderungsfaktor A = Anisotropie  $A = 0,88 \dots 0,96$  (siehe Tabelle 25)

## 4.8 Verbindungsvergleich beider Einschraubverbindungen

Der Verbindungsvergleich wurde ausschließlich an dem Holz-Polymer-Werkstoff WPC-5 durchgeführt. In den mechanischen Versuchen wurde sich ausschließlich auf die Belastungsrichtung parallel zur Schraubachse beschränkt. Um das Potential beider Verbindungsarten miteinander zu vergleichen, wurde die im Werkstoff verankerte Fläche annähernd gleich gewählt. Die tragende Fläche beträgt  $A_{\text{eff}} = 146,7 \pm 0,1 \text{ mm}^2$ . Die entsprechenden konstruktiven Kenngrößen beider Einschraubverbindungen liefert Tabelle 26.

TABELLE 26: EINGESetzte VERBINDUNGSMITTEL UND MONTAGEPARAMETER DER EINSCHRAUBVERBINDUNGEN (ESV)

Verbindungsart	Parameter	Verbindungsmittel
ESV-GFS	$d_k = 5 \text{ mm}$ , $l_E = 34,2 \text{ mm}$ , $t = 15 \text{ mm}$	STS plus $d = 6 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ , 10.9
ESV-QGB	$e = 30 \text{ mm}$ , $d_2 = 6,5 \text{ mm}$ , $t = 15 \text{ mm}$ , $w = 60 \text{ mm}$	M6 x 65 mm 10.9 QGB M6 $D_1=12$ , $l = 16 \text{ mm}$

Sofern nicht anders angegeben wird die festgelegte tragende Verankerungsfläche und die Einschraubrichtung S-PE für die Versuche in den Kapiteln 4.8.1 – 4.9.4 zugrunde gelegt.

### 4.8.1 Anziehmoment-Vorspannkraft-Kurven

Da im Anwendungsfall die Schraubverbindung nicht mittels definierter Vorspannkraft angezogen wird sondern über das Anziehmoment, wurden Anziehversuche durchgeführt. Im Verbindungsaufbau wurde darauf geachtet, dass die Anzahl der Reibstellen gleich gewählt wurden. Es wurden für beide Verbindungsarten die Anziehmomente bei definierter Montagevorspannkraft bestimmt. Durch das Mitverschrauben des Ringkraftsensors und der vorspannkraftgeregelten Spindelabschaltung ist die definierte Montagevorspannkraft einstellbar gewesen. Das Einschrauben der gewindeformenden Schraube erfolgte mit 100 U/min bis zur Kopfauflage, das Anziehen beider Schraubverbindungen hingegen mit 5 U/min. Je Charge wurden 5 Einzelmessungen durchgeführt.

Die Anziehmoment-Vorspannkraft-Kurven beider Verbindungsarten stellt Abbildung 49 dar. Dabei zeigt sich, dass

- die QGB-Steckschraubverbindung geringere Überdrehmomente und damit geringere Belastbarkeit aufweist als die ESV-GFS.
- die Direktverschraubung um 2 kN größere maximale Vorspannkraft erreicht als die QGB-Steckschraubverbindung.
- der Kurvenverlauf der QGB-Steckschraubverbindung ab einer Vorspannkraft von 10 kN vom ursprünglichen linearen Verlauf abweicht.
- die Streuungen der Einzelwerte bei beiden Verbindungen nahezu gleich sind.

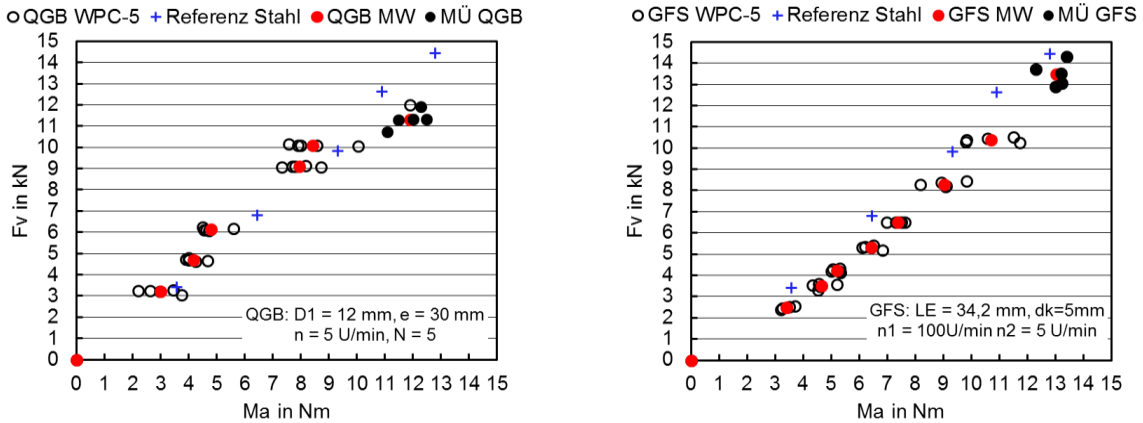


ABBILDUNG 49: ANZUGMOMENT-VORSPANNKRAFT-KURVEN DER EINSCHRAUBVERBINDUNGEN ESV-QGB (LINKS) UND ESV-GFS (RECHTS) IM VERGLEICH

### 4.8.2 Statische Auszugversuche im vorgespannten Zustand

Der statische Auszugversuch an verspannten Proben diente dazu, die statische Tragfähigkeit und die Verbindungssteifigkeit der vorgespannten Einschraubverbindungen zu ermitteln. Dabei wurden die Vorspannkraft beider Einschraubverbindungen zwischen 0 kN – 9 kN variiert. Die definierte Schraubmontage erfolgte mittels Schraubspindel. Es wurden Probekörper der Maße 100 x 60 x 15 mm verwendet. Die Einschraubrichtung lag parallel zur Extrusionsrichtung. Die Proben wurden mit einer 5 mm dicken Stahlplatte als Anbauteil verspannt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 10 mm/min. Den Versuchsaufbau stellt Abbildung 50 dar. Je Versuchscharge wurden 5 Einzelproben getestet. Die Verbindungssteifigkeit wird aus der Kraft-Verformungs-Kurve zwischen 10% und 40%  $F_{max}$  berechnet. Die Versuchsabfolge wurde so gestaltet, dass direkt vor jeder Einzelprüfung die Probe mit definierter Vorspannkraft montiert wurde. Der Ringkraftsensor im Klemmkontakt der Schraubverbindung diente dabei zur Aufbringung der definierten Montagevorspannkraft.

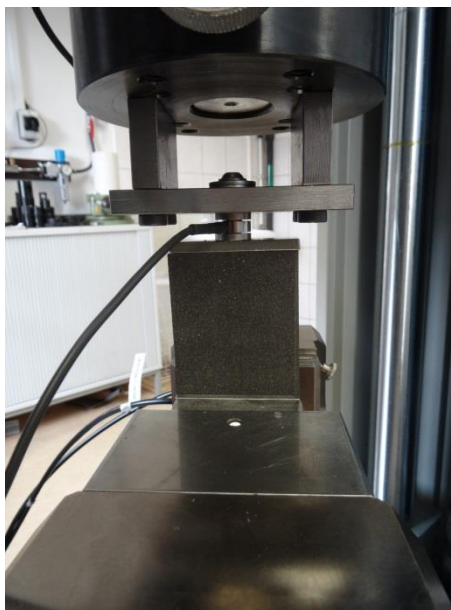


ABBILDUNG 50: VERSUCHSAUFBAU DES STATISCHEN AUSZUGVERSUCHES AN VERSPANNTEN SCHRAUBVERBINDUNGEN

Die Diagramme in Abbildung 51 zeigen die maximale Zugkraft und die Steifigkeit der Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben und der Einschraubverbindung mit Quergewindebolzen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Verbindungssteifigkeit nicht um die Verformung des Prüfaufbaus korrigiert wurde. Die korrigierten Steifigkeiten sind um das Zwei- bis Dreifache größer.

Die statischen Auszugskräfte der Verbindung liegen unabhängig von der aufgetragenen Montagevorspannkraft bei 10 kN für ESV-QGB und 14 kN für ESV-GFS. Bei gleicher zugrunde gelegter Verankerungsfläche beider Verbindungsarten zeigt die ESV mit gewindeformenden Schrauben eine höhere statische Tragfähigkeit auf.

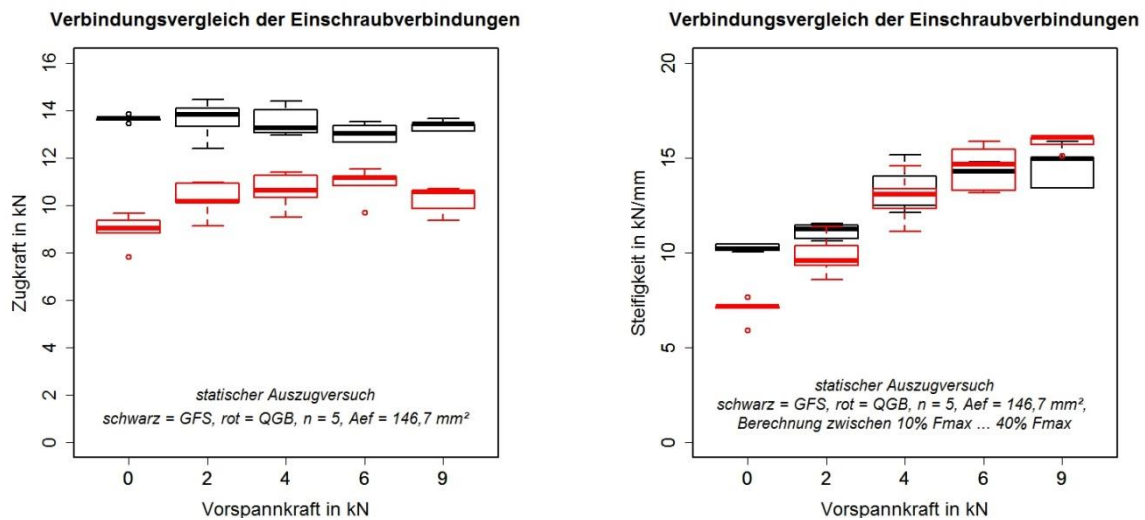


ABBILDUNG 51: MAXIMALE AUSZUGKRAFT (LINKS) UND VERBINDUNGSSTEIFIGKEIT (RECHTS) DER VERSPANNTEN EINSCHRAUBVERBINDUNGEN ESV-QGB (ROT) UND ESV-GFS (SCHWARZ)

Beide Verbindungsarten versagten durch Bruch entlang der Schraubachse und einseitigem Zugbruch im Restquerschnitt (Abb. 52). Wobei das Versagen der Schraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben zusätzlich durch Schraubenauszug überlagert wurde.

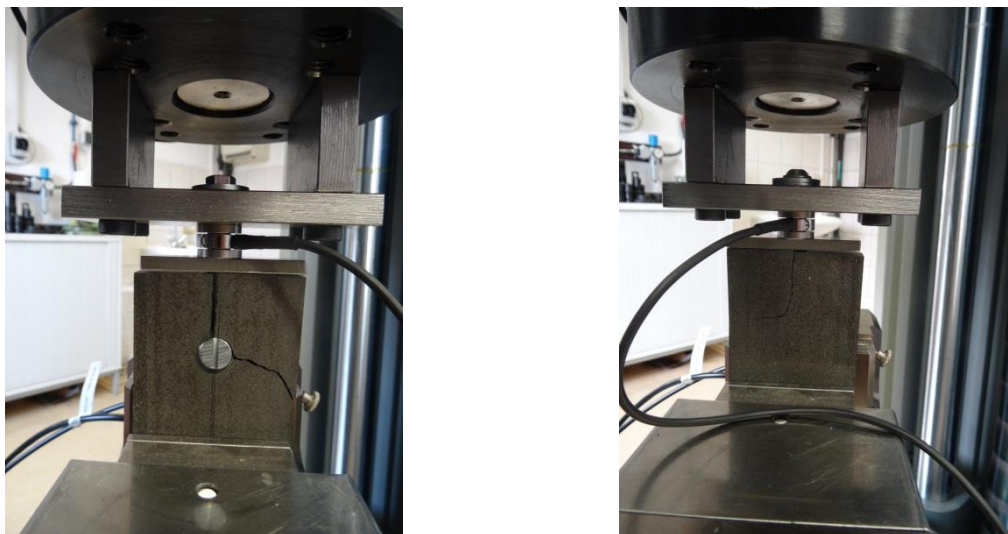


ABBILDUNG 52: VERSAGENSBIOD DER ESV-QGB (LINKS) UND ESV-GFS (RECHTS) IM STATISCHEN AUSZUGVERSUCH MIT VORSpanNUNG

Im unverspannten Zustand zeigten die ESV-GFS eine deutlich höhere Verbindungssteifigkeit auf als die ESV-QGB. Durch das Vorspannen der Verbindungen hebt sich diese Differenz auf und die Verbindungssteifigkeit nimmt mit zunehmender Vorspannkraft zu. Die Erhöhung der Vorspannkraft von 6 kN auf 9 kN bringt bei ESV-GFS und ESV-QGB keine weitere Steifigkeitssteigerung mit sich.

### 4.8.3 Dynamische Laststeigerungsversuche im vorgespannten Zustand

Der dynamische Laststeigerungsversuch verfolgte das Ziel über einen möglichst kurzen Versuchsumfang die dynamische Lastgrenze beider Verbindungsarten zu erarbeiten. Neben der maximalen Lastgrenze im Totalversagen der Verbindung wurde die sich über die Laststufen veränderliche Verbindungssteifigkeit in die Betrachtung einbezogen, um ein vorzeitiges Versagen zu detektieren.

Die Proben wurden mit einer harmonisch periodischen Zugschwellbelastung (Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$ ) beaufschlagt. Der Versuch wurde kraftgeregelt mit 5 Hz ausgeführt. Für beide Verbindungsarten wurden die in Tabelle 27 dargestellten Laststufen zugrunde gelegt. Die analog zur Oberlast zunehmende Unterlast berechnet sich aus dem Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$ . In einer Vorversuchsreihe wurden die Schwingspielzahlen zwischen 50, 500 und 5000 LW variiert. Dabei konnte ausnahmslos bei 5000 LW pro Stufe ein Versagen initiiert werden, wodurch die weiterführenden Versuche auf diese Lastwechselzahlen pro Stufe begrenzt wurde.

Die Verbindungen wurden analog zu den statischen Auszugversuchen montiert. Es wurde sich auf die Montagevorspannkraft von  $F_v = 4$  kN begrenzt, die mittels mitverschraubten Ringkraftsensor definiert aufgebracht wurde. Die Anzahl der Einzelversuche je Verschraubungsart betrug  $n = 5$ . Es ist zu beachten, dass die Montagevorspannkraft bis zum Start des Laststeigerungsversuchs bereits um bis zu 1 kN abgefallen war.

Die Auswertung des Versuches erfolgte nach den Kriterien der erreichten Laststufe bei auftretendem Totalversagen sowie der Steifigkeitsänderung mit zunehmenden Laststufen.

TABELLE 27: LASTSTUFEN IM STUFENVERSUCH, JE STUFE 5000 LW,  $F_0$  AUS  $R = 0,1$

Stufe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$F_0$	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	9,9

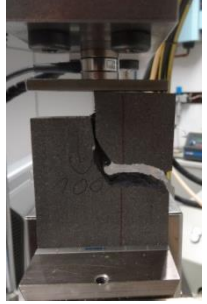
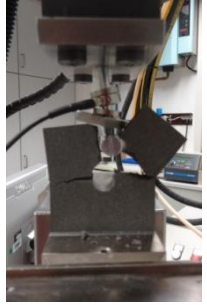
Die Änderung der Steifigkeit über die einzelnen Laststufen stellt Abbildung 53 für beide Einschraubverbindungen gegenüber. Tabelle 28 fasst die dynamische Auszugkraft sowie das Versagensbild zusammen. Es ist zu verzeichnen, dass Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben neben der höheren dynamischen Tragfähigkeit auch eine höhere Verbindungssteifigkeit im Vergleich zu Einschraubverbindungen mit Quergewindebolzen vorzuweisen haben.

Auffallend ist, dass bei ESV-QGB ab der 4. Laststufe ( $F_0 = 3$  kN), bei ESV-GFS ab der 5. Laststufe ( $F_0 = 3,5$  kN) ein sprunghafter Steifigkeitsabfall ersichtlich ist. Dies ist auf den Punkt zurückzuführen, ab dem die auf Zug beanspruchte Verbindung zu klaffen beginnt. In diesem Punkt wird die Klemmkraft der Verbindung von der Betriebskraft  $F_0$  überwunden. Die



unterschiedliche Laststufe, bei der die Vorspannkraft überwunden wird, ist auf die unterschiedlich starke Vorspannkraftrelaxation beider Verbindungen zurückzuführen. Nach diesem charakteristischen Punkt ist die Verbindungssteifigkeit nur noch vom formschlüssigen Verbindungsmittel und dem Bauteilwerkstoff bestimmt.

TABELLE 28: STATISCHE UND DYNAMISCHE AUSZUGKRAFT DER EINSCHRAUBVERBINDUNGEN

Verbindung	$F_{stat}$ [kN]	$F_{dyn}$ [kN] Totalversagen	Erreichte Lastwechsel	Versagen	Bilder
ESV-GFS	13,43	9,5 – 9,9 kN  Entspricht 70% von $F_{stat}$	85746 - 90030	Schraubenbruch, Bruch entlang der Schraubachse, Schraubenauszug	
ESV-QGB	11,19	7,5 – 8,5 kN  Entspricht 65% von $F_{stat}$	65601 - 76763	Materialversagen durch Riss entlang der Schraubachse und beidseitigem Zugbruch	

Boxplot Steifigkeiten QGB und GFS

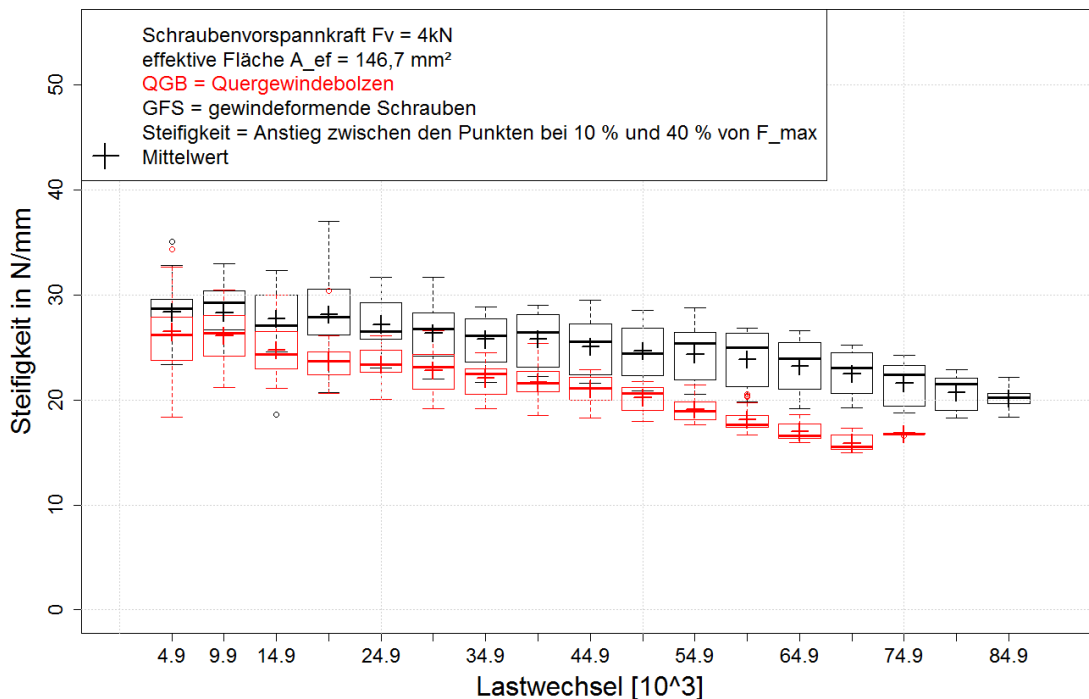


ABBILDUNG 53: DYNAMISCHER LASTSTEIFERUNGSVERSUCH AN DEN EINSCHRAUBVERBINDUNGEN MIT QGB UND GFS IM VERGLEICH, WPC-5, RICHTUNG S-PE, FREQUENZ = 5 HZ, N = 5

Um die dynamische Lastgrenze aus dem Stufenversuch abzuleiten, gilt es den Beginn des Steifigkeitsabfalls mit zunehmender Laststufe aus Abbildung 53 abzuleiten. Zur vereinfachten Darstellung dient die auf die Mittelwerte reduzierte Darstellung in Abbildung 54. Der blau hervorgehobene Wertebereich kennzeichnet die Laststufen in denen die Klemmkraft der Verbindungen noch wirksam ist. Dieser Bereich ist für die Ableitung der dynamischen Lastgrenze zunächst nicht relevant.

Erfahren die Schraubverbindungen mit zunehmender Laststufe eine strukturelle Schädigung, so tritt eine Änderung im Steifigkeitsverlauf auf. Dies ist durch den Abfall der geraden Basislinie in Abb. 53 gekennzeichnet. Mit zunehmenden Schädigungsgrad fällt die Steifigkeit der Verbindung bis zum Totalversagen ab.

Die erste Steifigkeitsminderung ( $F_{dSteifigkeit}$ ) tritt für die ESV-QGBs in der 7. Laststufe ( $F_o = 4,5$  kN), für die ESV-GFS in der 8. Laststufe ( $F_o = 5$  kN) auf. Die grünen Punkte ( $F_{dSteifigkeit}$ ) in Abbildung 54 heben den Beginn des Steifigkeitsabfalls hervor.

Als dynamische Lastgrenze wird aus konservativer Sicht die Laststufe festgelegt, welche noch keine Steifigkeitsminderung erfahren hat ( $F_{Grenze_dyn}$ ). Tabelle 29 fasst die entsprechende Laststufe und den Abminderungsfaktor für die Berechnung zusammen.

Der dynamische Abminderungsfaktor berechnet sich aus:

$$D = \frac{F_{Grenze_dyn}}{F_{max_stat}}$$

Es ist zu berücksichtigen dass es sich hierbei zunächst um eine Abschätzung der Laststufe handelt. Um die dynamische Einsatzgrenze zu verifizieren sind einstufige Dauerschwingversuche zwingend notwendig. An dieser Stelle wird im Forschungsprojekt Ermüdungsverhalten von Bauteilen aus WPC im Anwendungsfeld der Fördertechnik (FKZ: 2201816) angeknüpft.

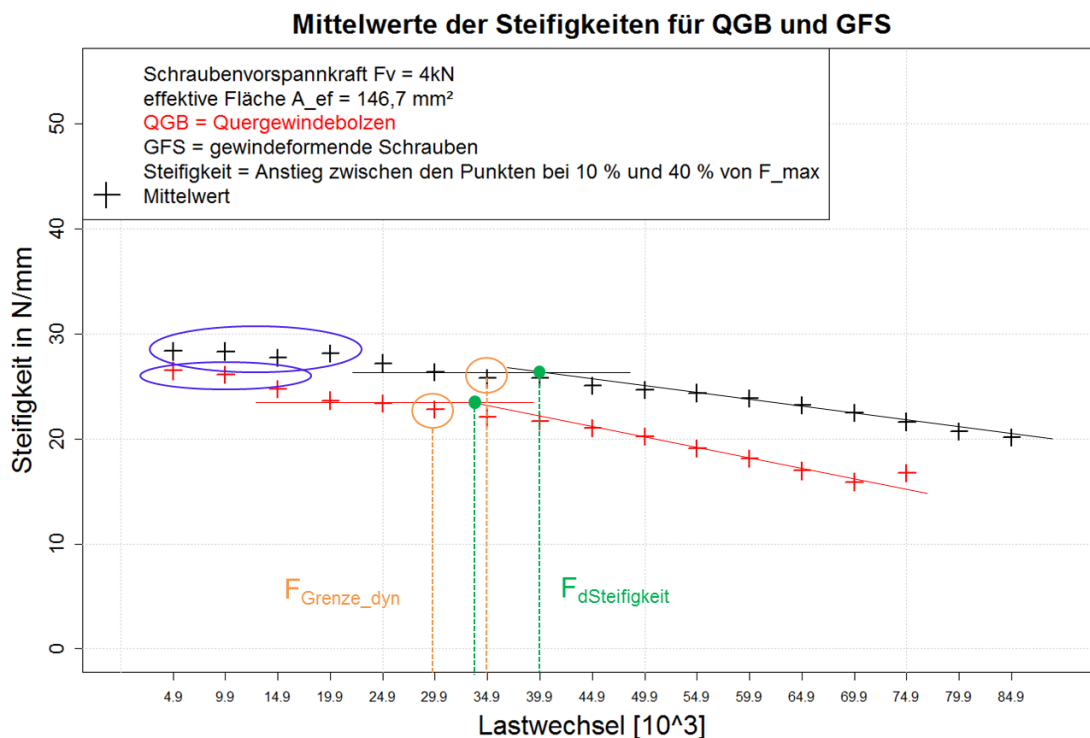


ABBILDUNG 54: DYNAMISCHER LASTSTEIGERUNGSVERSUCH, AUSWERTUNG DER DYNAMISCHEN LASTGRENZE

TABELLE 29: DYNAMISCHE LASTGRENZE UND DYNAMISCHER ABMINDERUNGSFAKTOR

Verbindung	$F_{\max\_stat}$ [kN]	$F_{\max\_dyn}$ [kN]	$F_{dSteifigkeit}$ [kN]	$F_{Grenze\_dyn}$ [kN]	Abminderungsfaktor D
ESV-QGB	11,19	7,5	4,5	4	0,36
ESV-GFS	13,43	9,5	5	4,5	0,33

#### 4.8.4 Vorspannkraftrelaxation von Einschraubverbindungen

Die Untersuchung der Vorspannkraftrelaxation erfolgte an Proben des Herstellers WPC-5. Getestet wurden Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben und Quergewindebolzen. Es wurden die konstruktiven Kenngrößen aus Kapitel 4.8 zugrunde gelegt. Die Einschraubrichtung entsprach der Extrusionsrichtung (SPE). Das Anziehen der Schraubverbindung erfolgte bei 5 U/min. Durch das Mitverschrauben der Ringkraftsensoren wurde die vorspannkraftgeregelte Spindelabschaltung bei den Vorspannkraften 4 kN und 9 kN umgesetzt. Die Vorspannkraften wurden über eine Versuchsdauer von 110 Tagen aufgezeichnet. Es wurde darrtrockenes Material verwendet. Die Schraubverbindungen relaxierten hingegen im Holznormklima bei 20°C, 65% rel. LF, welches im Klimaschrank sichergestellt war. Dadurch ist zu berücksichtigen, dass das Probenmaterial während der Relaxationsversuche Feuchtigkeit aufnimmt.

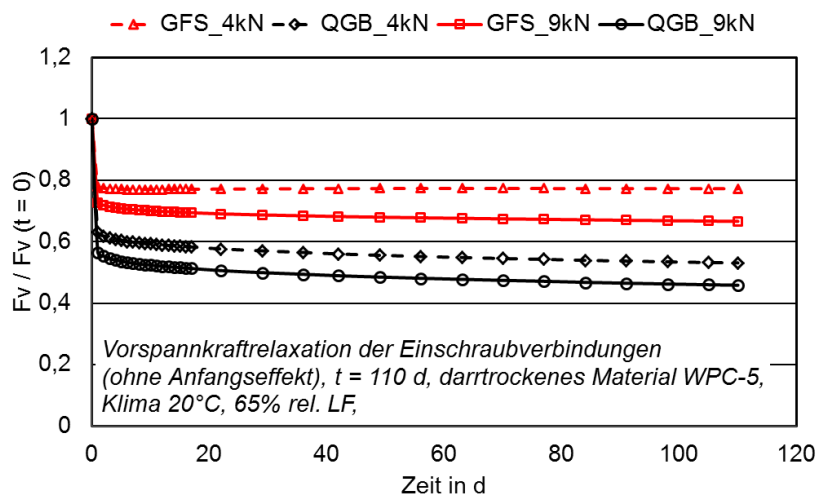


ABBILDUNG 55: VORSPANNKRAFTRELAXATION DER EINSCHRAUBVERBINDUNGEN IM VERGLEICH

Die Vorspannkraftkurven in Abbildung 55 stellen die Relaxationsneigung der Verbindungen sowohl mit einer Anfangsvorspannkraft von 4 kN als auch von 9 kN gegenüber. Es ist zu berücksichtigen, dass der Anfangseffekt der Vorspannkraftrelaxation, der sich direkt nach der Spindelabschaltung einstellt, nicht dargestellt ist. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Bei gleicher Verankerungsfläche und Anfangsvorspannkraft relaxieren die Einschraubverbindungen mit Quergewindebolzen wesentlich stärker als die Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben
- Die ESV-GFS zeigen nach der Anfangsrelaxation einen fast konstanten Verlauf
- Beide Schraubverbindungen relaxieren stärker, je höher die Anfangsvorspannkraft ist

## 4.9 Äußere Einflüsse auf die Tragfähigkeit

Für die Auswahl der äußeren Einflussfaktoren wird das Szenarium der Außenanwendung zugrunde gelegt. Dieses Kapitel ist mit Ausnahme des Einflusses der Materialfeuchtigkeit auf den Montageprozess für Innenanwendungen weniger relevant.

Um den Einfluss äußerer Bedingungen, wie Wasser, UV-Globalwitterung und Klimawechselregime auf die Tragfähigkeit und die Vorspannkraftrelaxation der Einschraub- und Durchsteckschraubverbindungen zu analysieren, wurden die nachfolgenden Versuche durchgeführt. Die Versuchsabläufe lehnen sich an die Beschreibung des Gütesiegels der QG für Holzwerkstoffe. Es erfolgte stets ein Vergleich der durch die äußeren Einflüsse beanspruchten Proben mit unbeanspruchten Proben. Das unbeanspruchte Probenmaterial wurde im Referenzklima 23°C, 50% Luftfeuchte bzw. 20°C, 30% Luftfeuchte konditioniert. Die Versuchsreihen wurden ausschließlich am Probenmaterial des Herstellers WPC-5 durchgeführt. Die spanende Probenbearbeitung erfolgte nach Kapitel 4.3.

Die Einschraub- und Durchsteckschraubverbindungen wurden sofern nicht anders angegeben mit einer 5 mm dicken Stahlplatte verspannt. Das Vorspannen der Verbindungen erfolgt mit 6 kN bzw. mit dem dafür notwendigen Anziehmoment. Abbildung 56 stellt den Aufbau der getesteten Verbindungen dar. Die Montageparameter entsprachen denen aus Kapitel 4.8.



ABBILDUNG 56: AUFBAU DER GETESTETEN SCHRAUBVERBINDUNGEN IN DEN VERSUCHEN KALTWASSERLAGERUNG UND KLIMAWECHELTEST. EINSCHRAUBRICHTUNG ESV SPE, EINSCHRAUBRICHTUNG DSV P-SE, PROBEKÖRPERGEOMETRIE 60 X 60 X 15 MM

Zur Beurteilung der jeweiligen Einflüsse auf die Verbindungseigenschaften wurden der statische Verbindungsmittelauszugversuch nach DIN EN 320 und Montageversuche durchgeführt. Bei den Montageversuchen handelt es sich um Versuche zur Bestimmung des Anzieh- und Lösemomentes. Das dabei bestimmte Verhältnis aus Lösemoment zu Anziehmoment (ML/MA) gibt das Maß der Vorspannkraftrelaxation mit bzw. ohne Einflussfaktor wider. Im statischen Auszugversuch der Verbindungsmittel wurde die statische Auszugkraft beanspruchter und unbeanspruchter Proben bestimmt.

### 4.9.1 Einfluss der Materialfeuchtigkeit, Kaltwasserlagerung

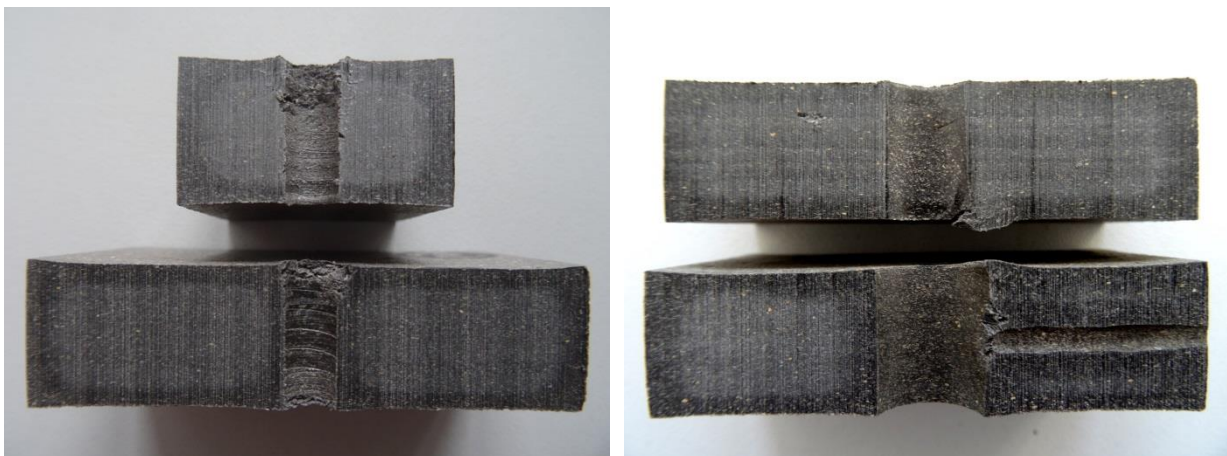
Die Kaltwasserlagerung diente dazu, den Einfluss der Materialquellung auf die Vorspannkraftrelaxation und der Tragfähigkeit im Betriebszustand zu analysieren. Es wurden zwei Versuchskonzepte verfolgt, die den Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf den Montageprozess und den der Materialfeuchtigkeit im Betriebszustand enthielten.

### Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf Montageprozess

Die Dauer der Kaltwasserlagerung umfasste 90 Tage, um eine ausreichende Wassersorption in das Probenmaterial zu erreichen. Die Lagerungsdauer weicht damit von der im Gütesiegel beschriebenen Zeit um 62 Tagen ab. Das Bohren der Proben erfolgte sowohl vor als auch nach der Lagerung, um den direkten Wasserkontakt im Bereich der Verbindungsstelle sicherzustellen. Referenzproben unterlagen dem Raumklima bei 20°C und 30% rel. LF sowie einer Darrtrockenlagerung nach DIN 322 [37]. Nach Abschluss der Kaltwasserlagerung wurden die Verbindungseigenschaften (Überdrehmoment, maximal übertragbare Vorspannkraft) im Überdrehversuch ermittelt. Zusätzlich erfolgte die Vermessung der Quellneigung und der Sorptionstiefe.

Es zeigte sich, dass

- eine Kantenquellung im Größenbereich zwischen 0,6 – 6,2% aufgetreten ist. Diese ist in Dickenrichtung am stärksten ausgeprägt.
- die Proben ein anisotropes Sorptionsverhalten aufweisen, mit einer Sorptionsrate zwischen 0,25 – 0,3 mm pro Woche
- der Einfluss des Wassers auf die ESV-GFS nur nachweislich festigkeitsmindernd ist, sofern der Verankerungsbereich der Schraube im Sorptionsbereich liegt (Abbildung 57). Dies ist für WPC-Vollmaterial von untergeordneter Bedeutung, da die Verbindungsstelle größere Dimensionen erfordert, als das Wasser an die Verbindungsstelle diffundiert.
- die Minderung der maximal übertragbaren Vorspannkraft infolge der Wasserlagerung 25% (Min-Max) für GFS beträgt (Abbildung 58).
- bei ESV-QGB Verbindungen eine Minderung der maximal übertragbaren Vorspannkraft von 16% eintritt. Diese Minderung tritt stetig auf, da die Verbindungsstelle (QGB) direkten Kontakt zum Umgebungsmedium besitzt (Abbildung 59).



**ABBILDUNG 57: QUERSCHNITTDARSTELLUNG DER EINSCHRAUBVERBINDUNGEN ESV-GFS (LINKS) UND ESV-QGB (RECHTS) NACH 90-TÄGIGER KALTWASSERLAGERUNG, DAS BOHREN VOR DER LAGERUNG ERFOLGTE AN DEN UNTEREN PROBEN**

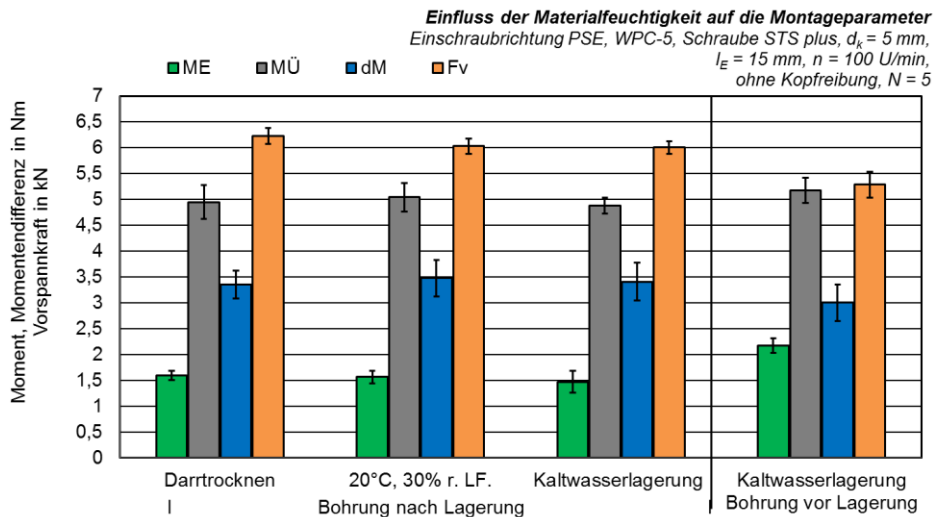


ABBILDUNG 58: MONTAGEPARAMETER IM ÜBERDREHVERSUCH DES UNTERSCHIEDLICH KONDITIONIERTEN PROBENMATERIALS BEI ESV-GFS

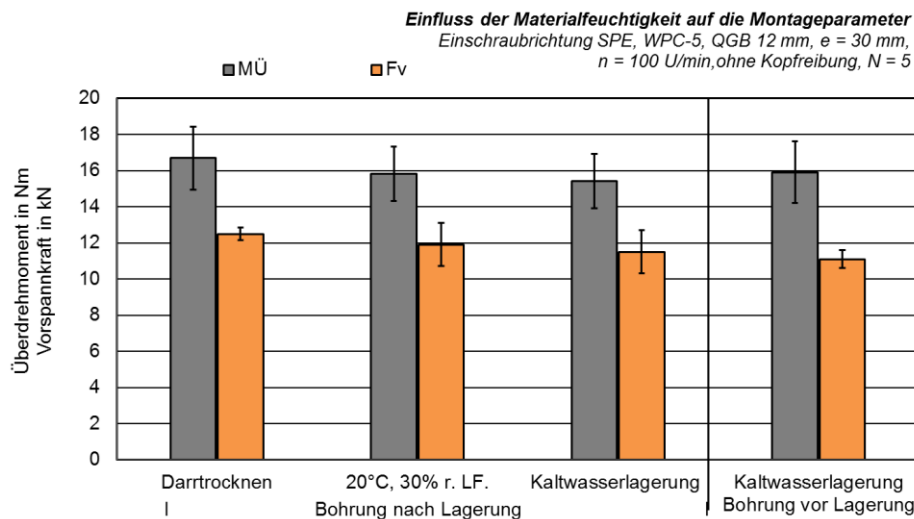


ABBILDUNG 59: MONTAGEPARAMETER IM ÜBERDREHVERSUCH DES UNTERSCHIEDLICH KONDITIONIERTEN PROBENMATERIALS BEI ESV-QGB

### Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf Betriebszustand

Um den Einfluss der Kaltwasserlagerung, respektive der Materialfeuchtigkeit auf die Verbindungseigenschaften im Betriebszustand zu analysieren wurde die nach [2] beschriebene Kaltwasserlagerung im Umfang von 46 Tagen an folgenden Proben durchgeführt.

TABELLE 30: UNTERSUCHTE PROBEN IN DER KALTWASSERBADAUSLAGERUNG

Verbindung	Vorspannung	Vorkonditionierung	Lagerung Proben
ESV-GFS	nein	90 Tage Wasserbad	Kaltwasserbad 46 d
	Ca. 6 kN	20°C 30% rel. LF	20°C 30% rel. LF
	Ca. 6 kN	20°C 30% rel. LF	Kaltwasserbad 46 d
ESV-QGB	Ca. 6 kN	20°C 30% rel. LF	20°C 30% rel. LF
	Ca. 6 kN	20°C 30% rel. LF	Kaltwasserbad 46 d
DSV	Ca. 6 kN	20°C 30% rel. LF	20°C 30% rel. LF
	Ca. 6 kN	20°C 30% rel. LF	Kaltwasserbad 46 d



Die vom Gütesiegel abweichende Lagerungsdauer von 46 Tagen wurde festgelegt, um die vergleichbare Dauer zum Klimawechseltest sicherzustellen. Vor den mechanischen Versuchen wurden die Proben 24h bei 23°C und 50% LF gelagert.

Im Schraubenauszugversuch zeigten die im Wasserbad gelagerten ESV-GFS Verbindungen eine 2 kN geringere Auszugskraft (Abbildung 60). Die Anzieh- und Löseversuche zeigten für alle Verbindungsarten dass der Wassereinfluss infolge der Quellneigung des Materials keine Verschlechterung der Vorspannkraftrelaxation nach sich zieht. Im Detail lassen sich weitere Aussagen aus Abbildung 60 treffen:

- Für ESV-QGB Verbindungen hat die Kaltwasserlagerung keinen Einfluss auf die Vorspannkraftrelaxation. Das ML/MA Verhältnis ist gleich.
- Für ESV-GFS Verbindungen führt die Kaltwasserlagerung zur verminderten Vorspannkraftrelaxation. Das ML/MA-Verhältnis der im Wasserbad ausgelagerten Verbindungen ist größer als die der Referenzproben, liegt aber trotzdem unter 1.
- In DSV kann die Vorspannkraftrelaxation durch die Quellneigung vermieden werden, die Vorspannkraft übersteigt sogar die Anfangsvorspannkraft. Das Lösemoment ist größer als das Anzugsmoment. ML/MA-Verhältnis ist größer als 1.

Der Unterschiedliche Einfluss der Kaltwasserlagerung auf die Verbindungsarten DSV und ESV ist auf die praxisrelevante Verschraubungsrichtung zurückzuführen. Die Prinzipskizze (Abbildung 61) stellt diese Verschraubungsrichtungen mit den entsprechenden Quellmaßen dar. Bei ESV liegt der Klemmkontakt in S-PE Richtung vor, bei DSV hingegen in Plattenrichtung renkrecht zur Extrusion. Dementsprechend liegen andere Quellmaße zugrunde, die direkten Einfluss auf die Vorspannkraftrelaxation nehmen.

In den ausgeführten ESV-Verbindungen sind die Quellmaße in Längsrichtung (S-PE) wirksam (1%), in DSV-Verbindungen hingegen die Quellmaße in Dickenrichtung (P-SE) (ca. 6%).

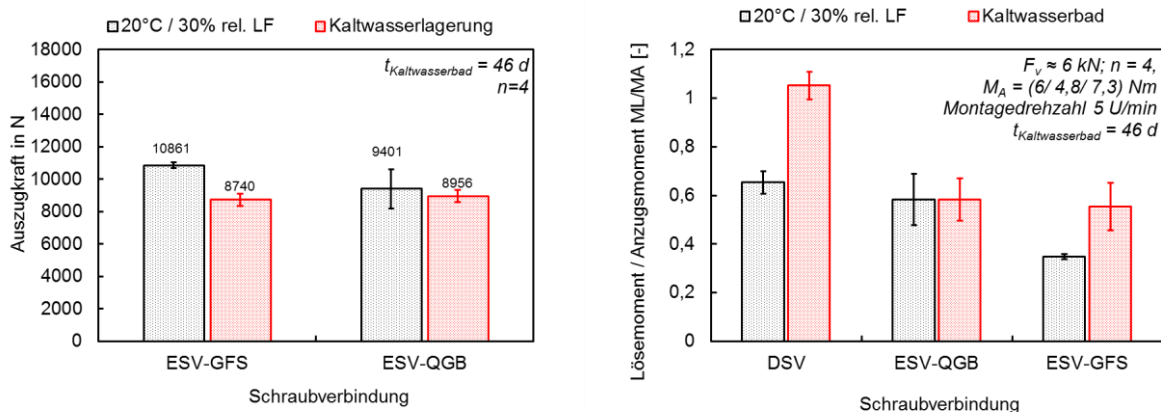


ABBILDUNG 60: STATISCHE AUSZUGKRAFT DER ESV-GFS (LINKS) UND ML/MA-VERHÄLTNIS DER SCHRAUBVERBINDUNGEN NACH DER KALTWASSERLAGERUNG (RECHTS)

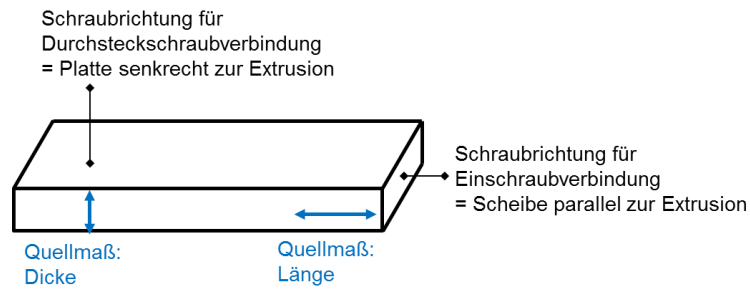


ABBILDUNG 61: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER PRAKTIKALBEN VERSCHRAUBUNGSRICHTUNG UND DES WIRKSAMEN QUELLMAßES IN DER KLEMMFUGE

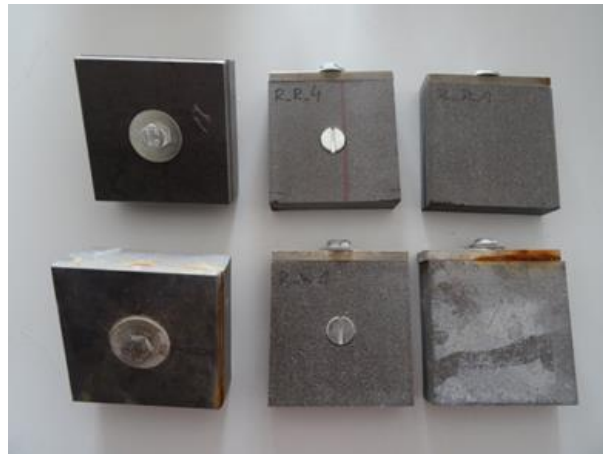


ABBILDUNG 62: SCHRAUBVERBINDUNGEN IM REFERENZKLIMA (OBEN) UND NACH DER KALTWASSERLAGERUNG (UNTEN)

#### 4.9.2 UV- Globalwitterung

Die UV-Globalwitterung erfolgte am Sächsischen Textilforschungsinstitut Chemnitz über eine Bewitterungsdauer von 15 Wochen. Das zyklische Bewitterungsschema ist gekennzeichnet durch die Abfolge aus einstündiger Beregnung und anschließend 5h-iger Trockenphase bei 50°C mit UV-Bestrahlung. Die Anordnung des Probenmaterials stellt Abbildung 63 dar. Es zeigt die einseitige Bewitterung. Für diesen Versuch wurden 40 mm dicke Konstruktionsbohlen verwendet. Widerspiegelnd an den Versuchsergebnissen kann die Probendicke als Kritikpunkt angesehen werden, da die Bauteildicke einer Schädigung der Verbindung entgegen wirkte. Die Einschraubverbindungen wurden mit Stahlanbauteil und einem 15 mm dickem Holz-Polymer-Anbauteil ausgeführt.





ABBILDUNG 63: ANORDNUNG DER PROBEN IM UV-GLOBALBEWITTERUNGSSCHRANK, LAMPENKOMBINATION NACH EN ISO 4892-3

Abbildung 64 stellt die oberflächige Verwitterung der getesteten Verbindung dar. Die typische Vergrauung der Oberfläche, beruhend auf den bekannten Bewitterungsphänomenen des Materials, ist an den jeweils rechtsstehenden Proben in Abbildung 64 erkennbar.



ABBILDUNG 64: SCHRAUBVERBINDUNGEN IM REFERENZKLIMA (OBEN) UND NACH DER 15-WÖCHIGEN UV-GLOBALBEWITTERUNG (UNTEN, MIT SICHT AUF BEWITTERUNGSSEITE)

Im statischen Auszugversuch der Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben ist keine Materialschädigung eingetreten, die Einfluss auf die statische Tragfähigkeit der Schraubverbindung nimmt (Abbildung 65). Aus den Montageversuchen, in denen das Anzug- und Lösemoment bestimmt wurde, sind hingegen folgende Aussagen zu treffen:

- Die UV-Globalbewitterung hat keinen Einfluss auf die Relaxationsneigung der Einschraubverbindungen mit einem Anbauteil aus Holz-Polymer-Werkstoff als mögliche Ursache wird die richtungsabhängige Quellneigung vermutet. Da das Anbauteil in PSE-Richtung angeschraubt ist und die Dickenquellrichtung im Klemmkontakt wirksam ist.
- Die UV-Globalbewitterung zieht eine deutliche Relaxationsneigung der Verbindungen mit Stahlanbauteil nach sich, dabei ist der Einfluss auf Einschraubverbindungen mit QGB deutlicher ausgeprägt. Als Ursache ist der direkte Kontakt der Einflüsse (Wasser, UV, Temperatur) auf die Lage des Verbindungsmittels zu nennen.

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Relaxationsneigung zwischen ESV-QGB und ESV-GFS aufgrund der unterschiedlichen Verankerungsfläche nicht vergleichbar ist. Für den Vergleich der Relaxationsneigung beider Einschraubverbindung ist Kapitel 4.8.4 hinzuzuziehen.

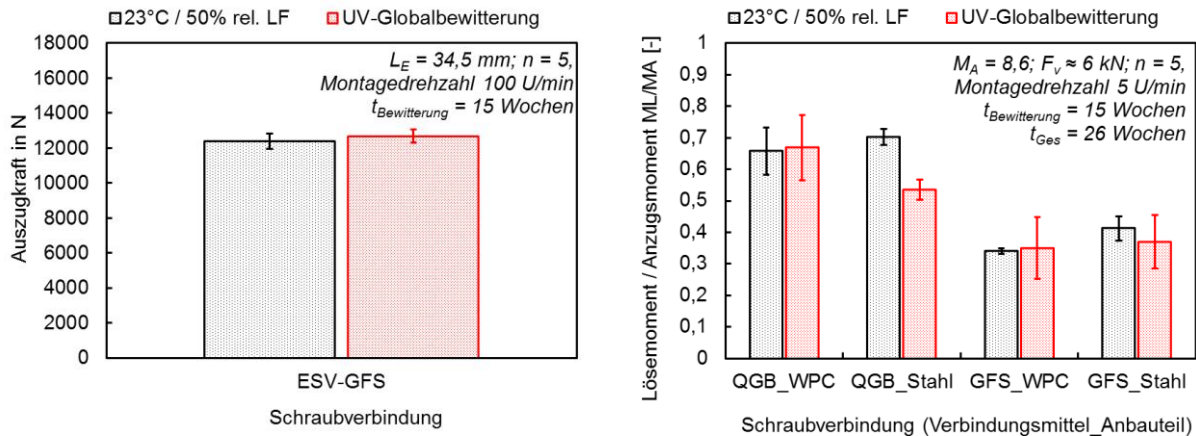
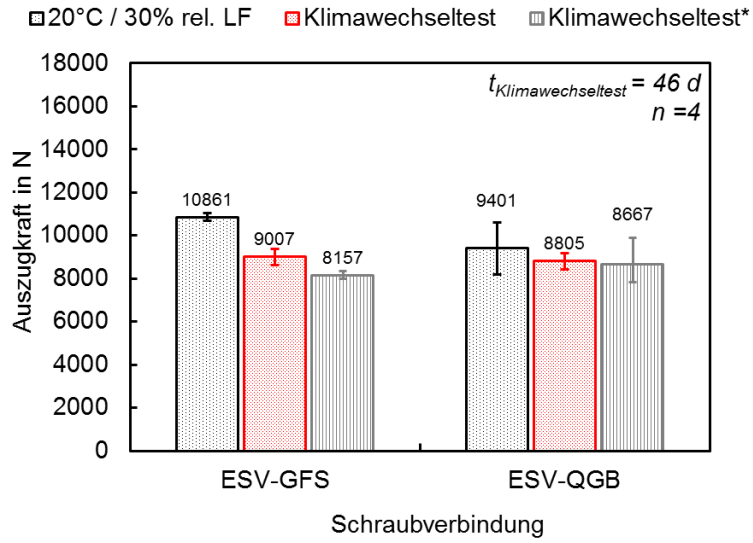


ABBILDUNG 65: STATISCHE AUSZUGKRAFT DER ESV-GFS (LINKS) UND ML/MA-VERHÄLTNIS DER SCHRAUBVERBINDUNGEN NACH DER UV-GLOBALBEWITTERUNG (RECHTS) MIT ANBAUTEIL AUS WPC UND STAHL

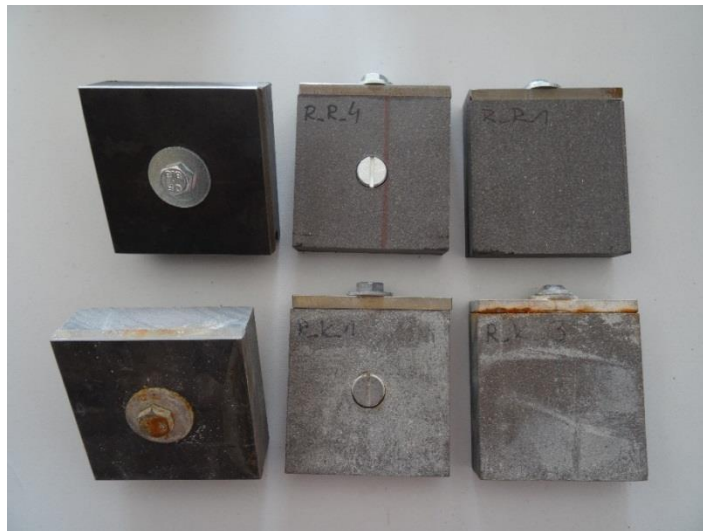
### 4.9.3 Klimawechseltest

Gemäß der Versuchsbeschreibung in [36] wurden die Verbindungen aus Abbildung 56, Kapitel 4.9. der Klimawechselbelastung unterzogen. Dabei wurde neben dem im Raumklima konditionierten Material auch Probenmaterial verwendet, welches bereits seit 90 Tagen einer Wasserlagerung ausgesetzt war, somit eine deutlich höhere Wassersorption erfahren hat. Dieses Material ist in den Schraubenauszugsversuchen unter Abbildung 66 mit Klimawechseltest\* gekennzeichnet. Die Gesamtbeanspruchungszeit betrug 46 Tage. Die Demontageversuche zur Bestimmung des Lösemomentes zeigte den vollständigen Verlust der Vorspannkraft auf. Das Lösemoment wurde nicht als Messwert von der Schraubspindel erfasst. Das Verdrehen des Anbauteils war per Hand möglich. Diese Wechselbeanspruchung aus Wasserlagerung, Gefrieren und Erwärmen zog den vollständigen Vorspannkraftverlust von etwa 6 kN der Verbindung nach sich, trotz das im Schraubenauszugsversuch nur eine Minderung der Auszugskraft um 2 – 3 kN eingetreten ist (Abbildung 66). Die Verwendung von Probenmaterial unterschiedlicher Ausgangsfeuchte zeigte, dass die Schädigung infolge der Wechselbeanspruchung mit höherer Materialfeuchtigkeit zunimmt.

Die optische Begutachtung der Proben zeigte Schädigungsrisse über den gesamten Querschnitt der WPC-Proben auf (Abbildung 68).



**ABBILDUNG 66: STATISCHE AUSZUGKRAFT DER ESV-GFS NACH LAGERUNG IM REFERENZKLIMA, IM KLIMAWECHSELTEST. \* ENTSPRICHT DER VERWENDUNG VON PROBENMATERIAL, WELCHES BEREITS 90 TAGE IM KALTWASSERBAD LAGERTE**



**ABBILDUNG 67: SCHRAUBVERBINDUNGEN IM REFERENZKLIMA (OBEN) UND NACH DEM KLIMAWECHSELTEST (UNTEN)**



**ABBILDUNG 68: QUERSCHNITTSRISSE IM MATERIAL NACH KLIMAWECHSELTEST**

#### 4.9.4 Zusammenfassung äußere Einflüsse

Die äußeren Umwelteinflüsse wirken in unterschiedlichem Maße auf die Verbindungen ein. Zur Beurteilung der Einflüsse ist in unverspannte und verspannte Schraubverbindung zu unterscheiden.

Für verspannte Schraubverbindungen führt die Kaltwasserlagerung zur verminderten Vorspannkraftrelaxation und teilweise zur Vergrößerung der Klemmwirkung infolge der Quellneigung des Materials. Die Klimawechselbeanspruchung zog den kompletten Klemmkraftverlust nach sich. Der Vorspannkraftverlust beträgt 100%. Die UV-Globalbewitterung führte zu einer um 21% stärkeren Vorspannkraftrelaxation als in den Referenzproben.

Um die Tragfähigkeitsminderung der Einschraubverbindung zu bemessen wird die jeweilige Auszugskraft der geschädigten Probe in Relation zur ungeschädigten Materialprobe gesetzt. Daraus ergeben sich für die getesteten äußeren Umwelteinflüsse folgende Abminderungsfaktoren:

TABELLE 31: ABMINDERUNGSFAKTOREN DER TRAGFÄHIGKEIT DER EINSCHRAUBVERBINDUNGEN, WPC-5

Verbindung	ESV-GFS	ESV-QGB
Materialfeuchte Montage	0,97	0,92
UV-Globalbweiterung	1	-
Kaltwasserlagerung	0,8	0,93
Klimawechseltest	0,83	0,95

Diese Abminderungsfaktoren gelten für den Bauteileinsatz im Außenbereich. Für den Einsatz im Innenbereich ist ausschließlich der Einfluss der Ausgangsmaterialfeuchte relevant. In Summe betrachtet liegen die Abminderungsfaktoren der Verbindung für den getesteten Werkstoff WPC-5 nahe 1. Damit können die äußeren Umwelteinflüsse auf die Tragfähigkeit der Verbindungen als gering eingeschätzt werden.

#### 4.10 Übertragung der Vorzugsvariante auf technische Anwendung

Die im Fokus stehende technische Anwendung ist ein Hängefördersystem, welches in der Intralogistik für den Stückguttransport beispielsweise für Garnspulen in der Textilindustrie eingesetzt wird. Im Laufe der letzten Jahre wurde dieses intralogistische System auf Basis metallischer Werkstoffe (Aluminium) teilweise durch nachwachsende Rohstoffe substituiert, um dem Konzept der Green Logistic Plant (GLP) [38] gerecht zu werden. Im Konkreten wurde die Aluminiumgleitschiene durch ein kombiniertes Trag- und Gleitelement aus Holz-Polymer-Werkstoff substituiert. Die gesamten Entwicklungsschritte sind in den Veröffentlichungen unter <https://www.tu-chemnitz.de/mb/FoerdTech/aew/publikationen.php#tab0> zusammengefasst. Abbildung 69 stellt das Gesamtsystem und die patentierte Querschnittsgeometrie des Trag- und Gleitelementes dar [39].

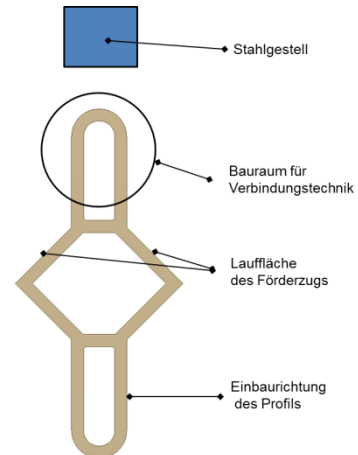
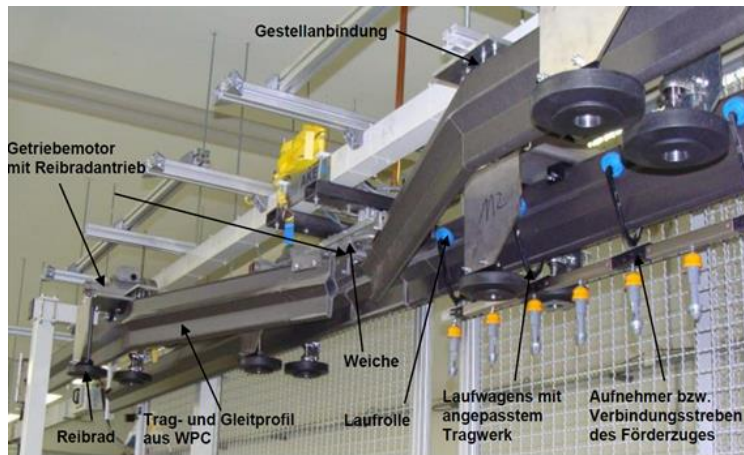


ABBILDUNG 69: EINZELKOMPONENTEN DES HÄNGEFÖRDERSYSTEMS (LINKS) UND SCHEMATISCHE ANBINDUNG DES WPC-TRAG- UND GLEITELEMENTES AM STAHLGESTELL

Die Herausforderungen an die Verbindungstechnik des Bauteiles sind die ausschließliche Zugänglichkeit über die Profilmantelseite, die begrenzte Wandstärke und die Hohlgeometrie. Die bisherige Verbindungstechnik, um die Gleitschiene an das Stahlgestell anzubinden, waren Gewindeeinsätze mit metrischem Anschlussgewinde. Diese wurden in vierfacher Ausführung montiert und können eine Gesamtzugkraft von 8 kN übertragen.

Der Nachteil dieser Lösung ist, dass die dynamische Belastbarkeit unbekannt ist und der Montageaufwand durch eine hohe Verbindungsmittellanzahl sowie spanender Bearbeitung hoch ist.

Zielstellung war es, die Anzahl die Befestigungsstellen je Aufhängungsstellen zu reduzieren. Hierfür wurden weitere Befestigungselemente für den benannten Anwendungsfall untersucht. Es wurden Gewindeeinsätze, Quergewindebolzen und Hohlraumdübel (Abbildung 70) im statischen Auszugversuch vergleichend getestet. Die Schraubengröße M6 stellt die Bezugsgröße des Vergleiches dar. Die Verbindungsmittel wurden mittels Gewindestange (M6 12.9.) mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min aus den 100 mm breiten Profilabschnitten herausgezogen. Um ein Versagen der Verbindungsstelle zu provozieren, wurde der Versuchsaufbau nach Abbildung 71 gewählt. Der Abstand zwischen Schraubenachse und Niederhalter betrug 60 mm.



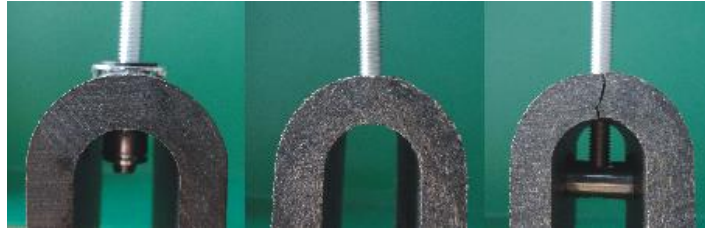


ABBILDUNG 70: GETESTETE BEFESTIGUNGSELEMENTE IM HOHLPROFIL, METALL-HOHLRAUMDÜBEL (6 X 52), MESSINGINSERT (M6 X 6, DA = 12 MM), QUERGEWINDEBOLZEN (M6 X 35, DA = 10 MM) V.L.N.R

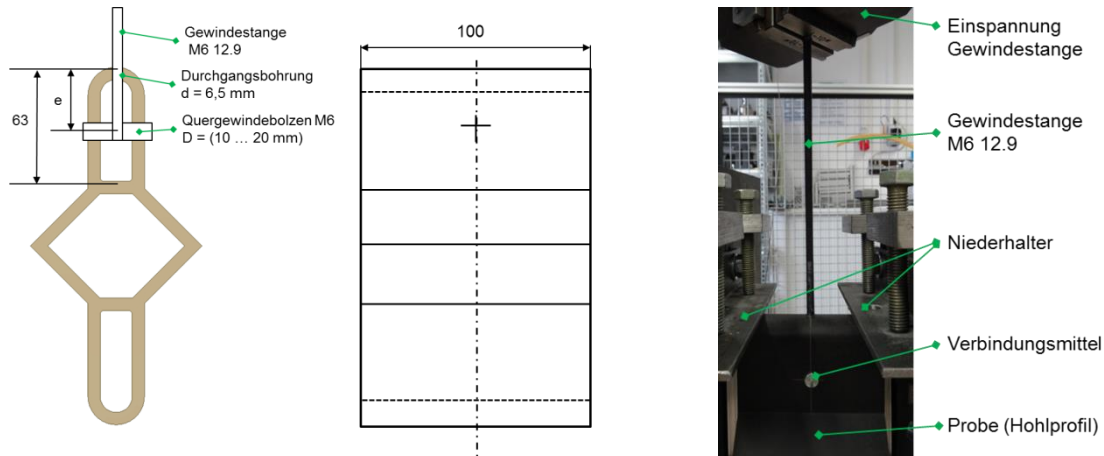


ABBILDUNG 71: PROBEKÖRPERGEOMETRIE UND MONTAGEBEREICH QGB (LINKS) VERSUCHSAUFBAU (RECHS)

Im Ergebnis der vergleichenden Auszugversuche der Befestigungsmittel (Abbildung 72) zeigt sich, dass mittels Quergewindebolzen eine fast doppelt so große Auszugskraft erreicht wird als mit den bisher verwendeten Gewindeeinsätzen. Zudem liegt die Verbindungssteifigkeit der QGB deutlich über den anderen Verbindungsvarianten. Darüber hinaus wird durch den drehbar gelagerten QGB eine winkelige Montage der Gleitschiene ermöglicht, mit der durch eine einfache Montage von Steigung und Gefälle ein technischer Mehrwert gegenüber Schraubinserts im benannten Anwendungsfall generiert wird.

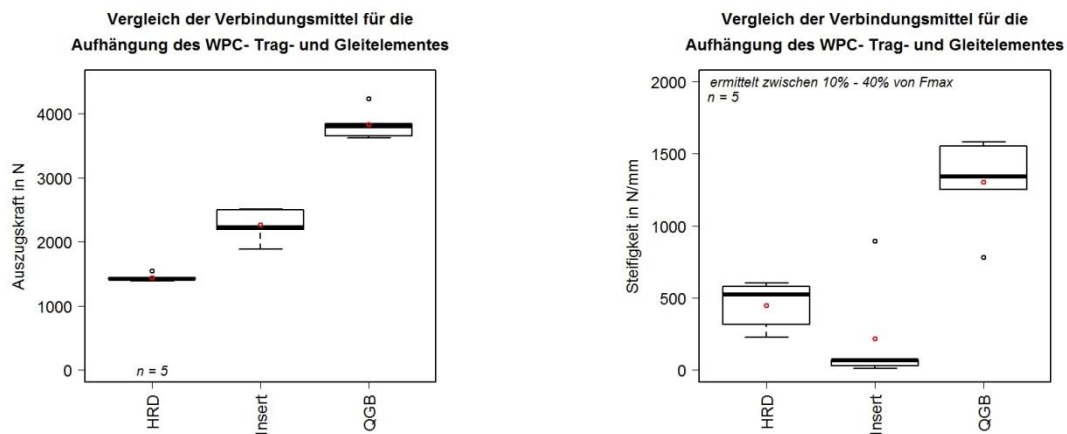


ABBILDUNG 72: STATISCHE AUSZUGKRAFT UND STEIFIGKEIT DER VERBINDUNGSMITTEL IM VERGLEICH (HRD = HOHLRAUMDÜBEL M6, INSERT = GEWINDEEINSATZ M6, QGB = QUERGEWINDEBOLZEN M6)

In anschließenden Auszugversuchen verschiedener Quergewindebolzen wurde das Ziel verfolgt die konstruktiven Parameter der QGB-Verbindung im Hohlprofil herauszuarbeiten. Es wurden die Bolzenaußendurchmesser zwischen 10 – 20 mm variiert. Da die QGB im

Bereich der parallelen Außenflächen, außerhalb der Rundung und schrägen Gleitbereichen zu montieren sind, ist die Eindringtiefe  $e$  auf einen Bereich von 20 mm bis 50 mm begrenzt. Tabelle 32 fasst die untersuchten Quergewindebolzen und dazugehörigen Eindringtiefen zusammen.

TABELLE 32: UNTERSUCHTE QUERGEWINDEBOLZEN UND EINDRINGTIEFEN IM SYSTEMPROFIL

Durchmesser D der Quergewindebolzen M6 l = 35 mm	Eindringtiefe e	e/D <sub>1</sub> - Verhältnis
10	(20; 30; 40; 50) mm	2/ 3/ 4/ 5
12	(25; 40; 50) mm	2/ 3,3/ 4,1
15	(25; 40; 50) mm	1,6/ 2,6/ 3,3
20	(25; 40; 50) mm	1,25/ 2/ 2,5

Die erreichten Auszugskräfte als auch die auf die projizierte Fläche bezogene Auszugskraft sind in Abbildung 73 dargestellt. Wie zu erwarten war, nehmen die Auszugskräfte mit größerem Bolzendurchmesser zu (Abb. 20). Bezogen auf die projizierte Fläche zeigt der QGB mit  $D = 10$  mm das größte Potential (Abb. 20). Jedoch versagten ab einem  $e/D$  Verhältnis von 3 der 10er-QGB durch Biegeverformung. Aus diesem Grunde scheidet der QGB,  $D = 10$  mm aus der weiteren Verbindungsmittelauswahl aus.

Die Untersuchung verschiedener Randabstände  $e$  zeigte, dass mit größerem Randabstand höhere Auszugskräfte erreicht werden. Problematisch ist jedoch das Schadensbild der versagten Verbindung. Ziel muss sein, dass die Funktionsfähigkeit der versagten QGB-Verbindung in der Gleitschiene des Hängefördersystems noch sichergestellt ist. Es darf kein Totalausfall, welches mit dem Herabstürzen der Gleitschiene einhergeht, auftreten. Aus diesem Grund sind die mechanischen Kennwerte stets im Zusammenhang mit dem Schadbild zu beurteilen. Tabelle 33 gibt den entsprechenden Überblick.

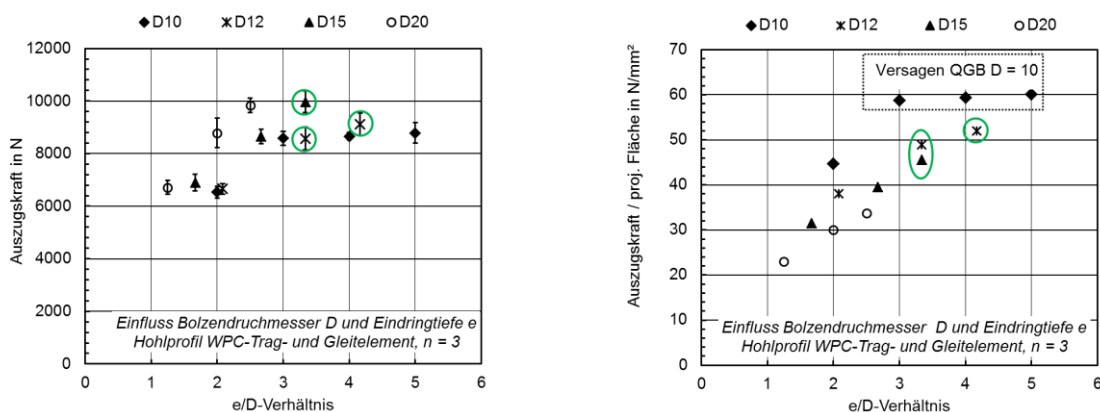


ABBILDUNG 73: KENNWERTE AUS STAT. AUSZUGVERSUCH; GRÜNE KREISE KENNZEICHNEN DEN GUTMÜTIGEN SCHADENSVERLAUF

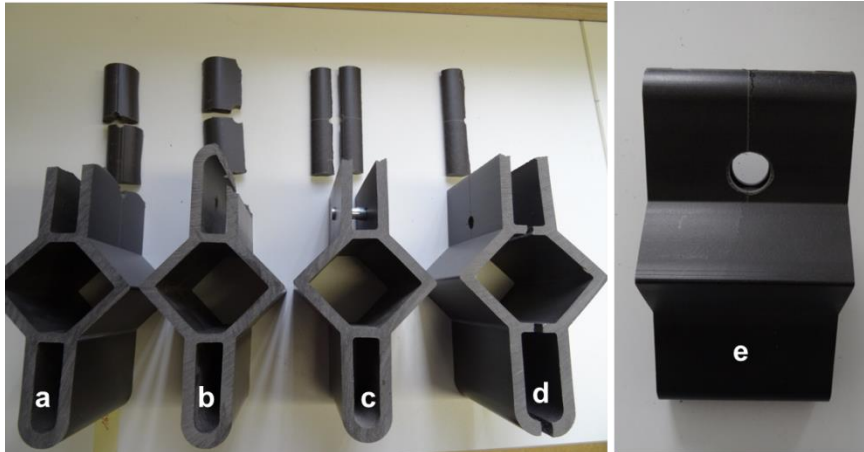


ABBILDUNG 74: IM STATISCHEN AUSZUGVERSUCH EINGETRETENE SCHADENSBLDER

- A) ABRISS DER RUNDUNG, RISSVERLAUF BEI BOLZEN → TOTALAUSFALL
- B) BRUCH RUNDUNG + SEITENWANGE → TOTALAUSFALL
- C) BRUCH RUNDUNG OBERHALB DES BOLZENS → PROFIL HÄNGT NOCH (GUTMÜTIGES VERSAGEN)
- D) KOMPLETTER SPALTBRUCH GESAMTPROFIL → TOTALAUSFALL
- E) RISSBILDUNG IN LAUFFLÄCHE → TOTALAUSFALL

Die Auswahl der Vorzugsparameter für Bolzendurchmesser und Eindringtiefe erfolgt für den benannten Anwendungsfall nach den Kriterien:

- Funktionsfähigkeit im Betriebszustand noch eingeschränkt gegeben
- Maximale Auszugskraft
- Maximale Auszugskraft / proj. tragende Fläche
- Kein Versagen des Verbindungsmittels

TABELLE 33: BEWERTUNG DER BEURTEILUNGSKRITERIEN ZUR BOLZENAUSWAHL FÜR DAS SYSTEMPROFIL

Bolzen_ Randabstand	F <sub>max</sub> (MW aus n = 3)	F <sub>max</sub> / A	Schadensbild	Totalausfall Bei allen n = 3 (Abbildung 74)	VBM
D10_e20	6531	44,7	a) Abriss Rundung		
D10_e30	8584	58,8	b) Bruch Rundungen + Seitenwange,		defekt
D10_e40	8662	59,3	c) Bruch Rundungen, Profil hängt noch		defekt
D10_e50	8784	60,1	d) Kompletter Spaltbruch Gesamtprofil		defekt
D12_e25	6659	38	a) Abriss Rundung		
D12_e40	8576	48	c) Bruch Rundungen, Profil hängt noch		
D12_e50	9115	52	c) Bruch Rundungen, Profil hängt noch		
D15_e25	6903	31,5	b) Bruch Rundungen + Seitenwange		
D15_e40	8651	39,5	b) Bruch Rundungen + Seitenwange		
D15_e50	9972	45,5	c) Bruch Rundungen, Profil hängt noch		
D20_e25	6717	23	b) Bruch Rundungen + Seitenwange		
D20_e40	8787	30	b) Bruch Rundungen + Seitenwange		
D20_e50	9839	33,7	e) Riss in Lauffläche, Profil hängt noch		



Unter Berücksichtigung der Ergebnisse im statischen Auszugversuch sowie der Schadensbeurteilung stellen die Quergewindebolzen mit einem Außendurchmesser von  $D_a = 12 \text{ mm}$  und  $D_1 = 15 \text{ mm}$  die Vorzugsvariante dar.

Als Normteil ist der Quergewindebolzen M8  $D_1 = 12 \text{ mm}$  in den Längen  $l = 35 - 60 \text{ mm}$  handelsüblich verfügbar. Empfehlenswert ist, diesen mit einer Eindringtiefe von  $40 \text{ mm}$  im Hohlprofil zu montieren. Im Vergleich zum Ausgangszustand, der Aufhängung mittels 4 Gewindeeinsätze, ist es möglich die Zugkraft über einen Quergewindebolzen pro Aufhängung zu übertragen. Hierfür wurde der dynamische Abminderungsfaktor des Vollmaterials aus Kapitel 4.8.3 zugrunde gelegt. An dieser Stelle knüpfen dynamische Einstufenversuche an, um die Übertragbarkeit des dynamischen Abminderungsfaktors auf die Verbindungsstelle des Hohlprofils zu übertragen. Diese sind Untersuchungsgegenstand im Anschlussprojekt FKZ: 22018216 „Ermüdungsverhalten von Bauteilen aus WPC im Anwendungsfeld der Fördertechnik“.

#### **4.11 Demonstratortest unter praxisnahen Bedingungen**

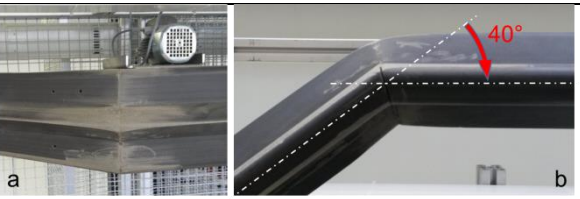
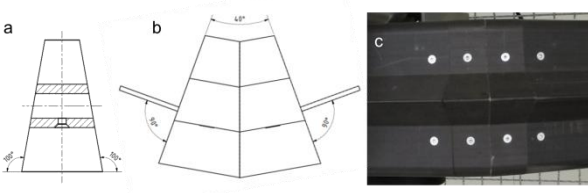


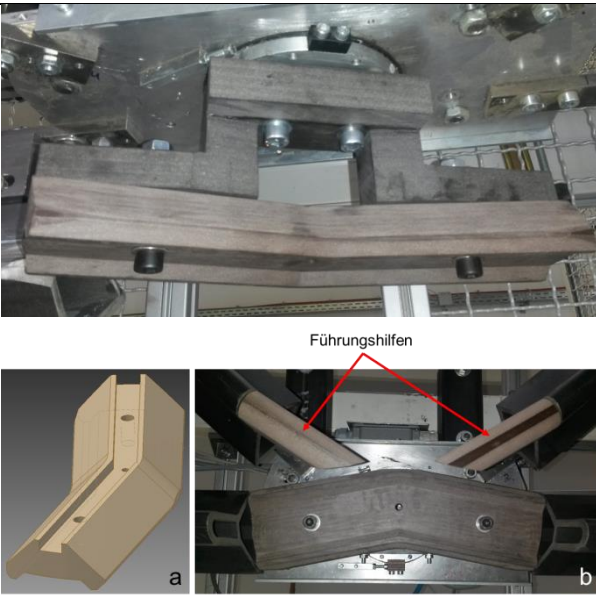
Der bestehende Demonstrator in Abbildung 69 wurde konstruktiv überarbeitet, um den industriellen Einsatz des Gesamtsystems zu ermöglichen. Es wurden konstruktive Modifikationen in den Kurvenregionen und in der Weiche umgesetzt. Die Verbindungstechnik aus Kapitel 4.10 wurde in den Demonstrator eingebunden. Damit reduzierten sich die Verbindungsstellen von 4 Gewindeeinsätzen auf 1 Quergewindebolzen.

Tabelle 34 stellt die Entwicklungsschritte für die Kurvenregionen und die Weiche zusammen. Die ausführliche Beschreibung der Entwicklung ist der Veröffentlichung [40] zu entnehmen.

Nach der konstruktiven Umgestaltung der benannten Segmente und mehreren Belastungstests wurde ein Funktionstest mit integrierter Beschleunigungsmessung durchgeführt, um die Gebrauchstauglichkeit abzuschätzen. Der Förderzug wurde mit einer Gesamtlast von  $37,2 \text{ kg}$  entsprechend  $28,9 \text{ kg/m}$  bestückt. Mit der Beschleunigungsmessung wurde die Laufruhe des Förderzuges beurteilt.

Die Untersuchung des Gesamtsystems und des Holz-Polymer-Werkstoffes hinsichtlich langzeitstatischer und -dynamischer Eigenschaften im Labormaßstab und im industriellen Umfeld ist im Anschlussprojekt FKZ: 22018216 „Ermüdungsverhalten von Bauteilen aus WPC im Anwendungsfeld der Fördertechnik“ Forschungsgegenstand.

TABELLE 34: ENTWICKLUNGSSCHRITTE ZUR VERBESSERUNG DER LAUFEIGENSCHAFTEN AM HÄNGEFÖRDERSYSTEM

Bauelement	Entwicklungsschritte	Beschreibung
Kurve 1		<p>Ausgangspunkt Profile mit Gehrungsschnitt versehen und mechanisch verbunden Vergrößerung des Kurvenwinkels auf 40°</p>
Kurve 2		<p>Kurvenausbildung mit Keilen, Nachmodellierung eines Kreisausschnittes Verbindung der Segmente mittels gekantetem Flachstahl</p>
Kurve 3		<p>Kurvenausbildung als Frästeil aus Konstruktionsbohle Steckverbindung mit Quergewindebolzen</p>
Weiche 1		<p>Ausgangspunkt</p>
Weiche 2		<p>Modularer Aufbau mit Frästeilen aus WPC-Vollprofilen Montage über DSV- Verbindungen Abgewinkeltes Weichenstück mit zusätzlichen Führungshilfen</p>

## 5 Verwertung

Die **Verwertung der Ergebnisse** drückt sich in folgenden Aktivitäten aus:

TABELLE 35: VERWERTUNGSAKTIVITÄTEN

Kategorie	Aktivität	Zeitpunkt
Wissenschaftliche Verwertung	Nutzen der Projektergebnisse für wissenschaftliche Weiterqualifikation und Veröffentlichungen s. Kapitel 7	2016 - 2018
Öffentlichkeitsarbeit	Tagungsbesuche mit Veröffentlichungen, Ausstellung zu Holz, Holz-Polymer-Werkstoffen und Faserseilen im Maschinenbau auf der Leichtbaumesse in Detmold 2017	2017 - 2018
Lehre	Fortlaufende Einbindung studentischer und wissenschaftlicher Hilfskräfte in die Projektbearbeitung. Betreuung studentischer Arbeiten zur studentischen Weiterqualifikation.	2014 - 2017
Folgeprojekte	Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit im Folgeprojekt Ermüdungsverhalten von Bauteilen aus WPC im Anwendungsfeld der Fördertechnik (FKZ: 22018216)	2017
Anwenderworkshop	Montagehinweise veröffentlichen, besonders für Halbzeuganwender im Maschinenbau	2 Jahre nach Projektende
Forschungstransfer	in Kombination mit Folgeprojekt (FKZ: 22018216)	5 Jahre nach Projektende

### Wissenschaftlich, technische Erfolgsaussichten

Mit den dargestellten Montagehinweisen ist es möglich die favorisierten Verbindungsmittel in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen einzusetzen.

Der Einsatz der favorisierten Verbindungsmittel in Kombination mit den Montagehinweisen ermöglicht es, die Tragfähigkeit der lösbaren Verbindungen zu erhöhen bzw. bisherige Überdimensionierungen an Verbindungsstellen zu vermeiden, vgl. Kapitel 4.10. Entsprechende Einflussparameter wurden herausgearbeitet, die für eine praktische Anwendung sowohl im Innen- als auch Außenbereich berücksichtigt werden müssen.

Die lösbare Verbindungstechnik mit Quergewindebolzen ist bereits fester Bestandteil in neuen technischen Anwendungen aus Holzwerkstoffen [41]. (Bsp: Hängefördersystem und Vertikalförderer). Im Folgeprojekt zum Ermüdungsverhalten von Bauteilen aus WPC wird diese Verbindungstechnik dem Dauerlaufstest mit unterliegen, um den geplanten Serieneinsatz des Hängefördersystems zu erreichen.

### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Für potentielle Anwender von WPC-Halbzeugen stehen vorteilhafte Verbindungsmittel und deren Montageempfehlungen für den Einsatz in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen zur Verfügung. Die getesteten Verbindungsmittel können von Profilverstellern in das Baukastensystem ihrer Produktpalette integriert werden.

Verbindungsmittelhersteller können die Nutzbarkeit der Verbindungsmittel für den Holz-Polymer-Werkstoff empfehlen (Bsp. Rampa, Quergewindebolzen, bzw. Schraubenhersteller für gewindeformende Schrauben), da die Ergebnisse in Form von Veröffentlichungen und Berichten der Öffentlichkeit bekannt gegeben werden. Die erarbeitete Lösung zu dem bestehenden Verbindungssystem der Firma Item erweitert den Markt. Ein Systemvergleich nach technisch-wirtschaftlichen Kriterien soll beide Varianten bewerten. Dieser ist Bestandteil weiterer Forschungstätigkeiten.

## **6 Erkenntnisse von Dritten**

Von Dritter Seite sind innerhalb der Projektlaufzeit keine Untersuchungen bekannt gegeben worden, die in die geplante Projektbearbeitung eingreifen. Mit Ausnahme der TSSD® Technologie der Firma Ejot [42], die für Hohlprofile eine Verbindungsvariante mit darstellt. Inwiefern die Lastgrenze der Verbindungstechnologie für die Übertragbarkeit auf das WPC-Trag- und Gleitelement im Hängefördersystem ausreichend ist, ist nach derzeitigem Kenntnisstand noch ungeklärt.

## **7 Veröffentlichungen**

Im Rahmen des öffentlich geförderten FuE-Projektes wurden bis zum jetzigen Stand folgende wissenschaftliche Beiträge in Fachzeitschriften und auf Tagungen veröffentlicht.

Schubert, C.: WPC-Werkstoffauswahl für Schraubverbindungen in maschinenbautechnischen Anwendungen. 17. Holztechnologisches Kolloquium, Dresden. TU Dresden, 2016, Schriftenreihe Holz- und Papiertechnik; Band 15, S. 211 – 219.

Schubert, C.: WPC-Werkstoffauswahl für Schraubverbindungen in maschinenbautechnischen Anwendungen. In: Holztechnologie. Dresden. 6/2016. S. 23 – 30.

Schubert, C.: Konstruktive Einflussparameter auf Direktverschraubungen in hochgefüllten, extrudierten Holz-Polymer-Werkstoffen. Technomer 2017. Chemnitz. S. 139.

Schleinitz, A.; Eichhorn, S.; Schubert, C.: Hängefördersystem mit Trag- und Gleitelement aus Wood Plastic Composite (WPC). Technomer 2017. Chemnitz. Online unter

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-230689>

Schubert, C.: Konstruktive Einflussparameter auf Quergewindebolzen-Steckschraubverbindungen in hochgefüllten Holz-Polymer-Extrusionsprofilen. 18. Holztechnologisches Kolloquium, Dresden. TU Dresden, 2018, Schriftenreihe Holz- und Papiertechnik; Band 23, S. 227 – 235.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurden lösbare Verbindungstechniken für hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe für das statisch-dynamische Belastungskollektiv des Maschinenbaus erarbeitet. Im Fokus der Untersuchungen standen vorgespannte Schraubverbindungen in den konstruktiven Ausführungen als Durchsteckschraubverbindung und Einschraubverbindungen. Die Direktverschraubung und die Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung wurden aus technisch-wirtschaftlicher Sicht für den Werkstoff als Sonderverfahren der Einschraubverbindung favorisiert.

Neben der mechanisch physikalischen Werkstoffuntersuchung standen statische und dynamische Auszugversuche der Verbindungsmittel sowie Montageversuche im Fokus. Für die Verschraubungsarten Durchsteckschraubverbindung, Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben und Einschraubverbindung mit Quergewindebolzen wurden Montageempfehlungen, Grenzlastbereiche und Einflussfaktoren der Verbindungen unter Berücksichtigung des Werkstoffes erarbeitet. Abschließend wurden die erarbeiteten Kenntnisse zu lösbaren Verbindungstechniken auf einen Demonstrator in der Fördertechnik übertragen. Folgende Schwerpunkte wurden im Projekt bearbeitet:

1. Methodische Auswahl lösbarer Verbindungstechniken und Bewertung
2. Materialanalyse und Bewertung handelsüblicher Holz-Polymer-Werkstoffe nach Qualitätskriterien für den Einsatz im Maschinenbau
3. Untersuchung konstruktiver, werkstofftypischer und montagetechnischer Einflüsse auf die Verschraubungsarten:
  - a. Durchsteckschraubverbindung
  - b. Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben (Direktverschraubung)
  - c. Einschraubverbindung mit Quergewindebolzen
4. Charakterisierung der Wirkung äußerer Umwelteinflüsse auf die Verschraubungsarten
5. Übertragung einer lösbaren Verbindungstechnik auf den Demonstrator und Umgestaltung für den Dauerlauftest

Anknüpfend an die Ergebnisse zur lösbaren Verbindungstechnik von hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen wird im Anschlussprojekt (FKZ: 2201816) das Ermüdungsverhalten von Bauteilen aus WPC und deren Verbindungstechnik im Fokus stehen.

Beispielsweise wird die in Kapitel 4.8.3 erhaltene dynamische Lastgrenze der Einschraubverbindungen an WPC-Vollmaterial auf das Hohlprofil übertragen und evaluiert.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] N.N. *DIN 8593. Fertigungsverfahren Fügen, Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [2] Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe e.V.: Qualitäts- und Prüfbestimmungen zur Produktionskontrolle von terrassendecks aus Holz-Polymer-Werkstoffen. 2014.
- [3] N.N. *DIN 8593-1. Fertigungsverfahren Fügen. Teil 1: Zusammensetzen*. 2003.
- [4] N.N. *DIN 8593-3. Fertigungsverfahren Fügen. Teil 3: Anpressen, Einpressen*. 2003..
- [5] Inoutic, Firma. *Terrassen- und Sichtschutzsysteme aus Twinson*.
- [6] Kosche, Firma. *kovalex (R) Verlegeanleitung*. 12/2014.
- [7] Möller, Firma. *Verlegeanleitung Lignodur terrafina(R) massiv*.
- [8] MYDECK, Firma. *DesignDiele Verlegeschrauben*.
- [9] Rehau, Firma. *Relazzo Decking Verlegeanleitung*. 01/2014.
- [10] Werzalit, Firma. *Montagevorschrift entero/ entero plus. Terrassenvollprofile*.
- [11] Novotech, Firma. *Bauanleitugn megawood(R)*. 2015.
- [12] Item, Industrietechnik Fachkatalog innovationen mit System Neuheiten 2013.
- [13] hiendl, Firma, ganz neue möglichkeiten durch neuartiges Material. Montagesystem.
- [14] Eichhorn, S., et al. *Modulares Hängefördersystem mit Funktionselementen aus Holz-Kunststoff-Verbund (WPC). Aif Abschlussbericht. 2009 - 2011*.
- [15] R. Eckardt, S. Eichhorn, C. Müller. *Schwingungs- und geräuschkämpfende Leichtbauelemente im Maschinenbau auf Basis von Konstruktionswerkstoffen aus Holz*. 2010.
- [16] Schubert, C.. WPC-Werkstoffauswahl für Schraubverbindungen in maschinenbautechnischen Anwendungen, holztechnologie 2016 S. 23 - 30.
- [17] N.N. DIN EN 310 Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit. 1993.
- [18] Eichhorn, S.; Weber, A.; et. Al.;, Entwicklung von Qualitätshalbbeugen aus Spezialholzwerkstoffen für Anwendungen im Maschinenbau und in der Fördertechnik. Schlussbericht FNR 220011410, 2015.
- [19] N.N. DIN EN 527-4. Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - teil 4: Prüfbedingungen für isotrope und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe. 1997. .
- [20] N.N. DIN EN 383. Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel. 2007.
- [21] N.N.VDI 2230. Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Fachbereich Getriebe und Maschinenelemente. 2015.
- [22] Wiegand, H.; Kloos, K.; Thomala, W.: Schraubenverbindungen Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung, Berlin Heidelberg: Springer, 2007.

- [23] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW-Verlag, 1993.
- [24] Eckardt, R.: Untersuchungen an Verbindungselementen für Holzkonstruktionen im Maschinen- und Anlagenbau, TU Chemnitz, Dissertation, 2012.
- [25] Tome, A.: Vorspannkraftrelaxation von Kunststoff-Direktverschraubungen. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.
- [26] Trinter, F.: Zur Festigkeit von Schraubverbindungen an Bauteilen aus SMC. Dissertation Universität Gesamthochschule Kassel, 1991.
- [27] Yao, Y.: Polymerwerkstoffdirektverschraubung: Einsatz von Experiment und Simulation zur Analyse des Vorspannkraftverlustes. Dissertation. TU Kaiserslautern. 2011.
- [28] Dratschmidt, F.: Zur Verbindungstechnik von glasfaserverstärktem Polyamid, Dissertation Erlangen-Nürnberg, 1999.
- [29] Onasch, J.: Zum Verschrauben von Bauteilen aus Polymerwerkstoffen mit gewindeformenden Metallschrauben, Universität-Gesamthochschule Kassel, 1983.
- [30] N.N. DVS 2241-1, Direktverschraubung von Formteilen aus Kunststoffen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [31] Ehrenstein, G.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik, München: Hanser, 2004.
- [32] N.N. DIN 320, Spanplatten und Faserplatten - Bestimmung des achsenparallelen Schraubenausziehwiderstandes, 2011.
- [33] N.N. Firma Schriever, STS(R) plus die optimierte Verbindung für Thermoplaste 2014.
- [34] N.N. Firma Rampa, Internetauftritt <https://www.rampa.com/de/de/>.
- [35] Werner, G.; Zimmer, K.: Holzbau Teil 1, Grundlagen DIN 1052 neu (Eurocode 5). Springer Verlag. Berlin Heidelberg. 2004.
- [36] N.N. VDI-Richtlinie 2014 Blatt 3. Entwicklung von Bauteilen aus faser-Kunststoff-Verbund, Berechnungen. 2006.
- [37] N.N. DIN EN 322. Holzwerkstoffe; Bestimmung des Feuchtegehaltes. 1993.
- [38] Eichhorn, S.; et. al.: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz in der Intralogistik durch neue Systemkomponenten, Chemnitz, 2012.
- [39] Patent Trag- und Gleitelement DE102012209287A1, 1.6.2012.
- [40] Schleinitz, A.; et. al.: Hängefördersystem mit Trag- und Gleitelement aus Wood Plastic Composite (WPC), Chemnitz Technomer, 2017.
- [41] Eichhorn, S.; et. al.: Substitution energieintensiver Stahl- und Aluminiumwerkstoffe durch nachwachsende Rohstoffe in der Fördertechnik. 2017. Abschlussbericht FNR: 22023611
- [42] N.N. Firma Ejot. Internetauftritt. ESSsys TSSD, [http://www.industrie.ejot.de/medias/sys\\_master/images/8835802628126/INFO-EJOT-EPPsys-TSSD-09.14-de.pdf](http://www.industrie.ejot.de/medias/sys_master/images/8835802628126/INFO-EJOT-EPPsys-TSSD-09.14-de.pdf)
- [43] Eichhorn, S.: Modulares Hängefördersystem mit Funktionselementen aus Holz-Kunststoff-Verbund (WPC). Aif Abschlussbericht. 2009 - 2011.