

Schlussbericht

zum Vorhaben IDS.Machbarkeitsstudie

Thema:

**Interlocking Dowel System (IDS) Machbarkeitsstudie - Innovative Holz-Holz
Verbindung für materialsparende Holztafelelemente**

Zuwendungsempfänger:

HTWK Leipzig

Förderkennzeichen:

2222HV027X

Laufzeit:

1.12.2022 bis 31.05.2024

Monat der Erstellung:

6.2024

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**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 bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzbericht	1
1. Aufgabenstellung	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens	2
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse	3
a) Arbeitspakete und Meilensteine	3
b) Zusammenfassung	5
II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	6
1. Erzielte Ergebnisse	6
Arbeitspaket 1: Klärung der technischen Umsetzbarkeit von IDS-Elementen.....	7
Arbeitspaket 2: Entwicklung eines Fertigungskonzepts.....	9
Arbeitspaket 3: Verifizierung des Fertigungskonzepts und Erstellung von Prüfkörpern.....	13
Ergebnisse	18
2. Verwertung.....	18
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	18
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	18
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	18
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	18
3. Erkenntnisse von Dritten	19
4. Veröffentlichungen	19

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Generierung grundlegender Erkenntnisse über die Umsetzbarkeit (Machbarkeit) einer innovativen Holztafelbauweise mit dem Titel Interlocking-Dowel-System (IDS). Diese basiert auf einem neuartigen, ressourcenschonenden Konstruktionskonzept bei dem lastabtragende, flächige Wandelemente aus geschosshohen Holzwerkstoffplatten mit Hilfe lastaffin verteilter Holz-Stab-Dübel ohne zusätzliche metallische Verbindungsmittel verbunden und zugleich auf Abstand gehalten werden. Das IDS-Prinzip entzieht sich dabei grundsätzlich handwerklicher Fertigungsstrategien. Es musste ein grundlegend neues, digital-basiertes Fertigungskonzept für die innovative Wandbauweise entwickelt werden.

Im Kontext der konzeptionellen Grundidee stellten sich folgende grundlegende konstruktiv-technische Fragen, die mit diesem Projekt (im Rahmen einer Sondierungsphase) beantwortet werden sollten:

1. Wie können definierte Abstände zwischen den Deckplatten während der Fertigung eingehalten werden?
2. Können die Dübel mithilfe von Holznägeln, ohne die Nutzung von Klebstoffen, dauerhaft und mit hinreichender Tragfähigkeit fixiert werden?
3. Wie verändert sich die (statische) Leistungsfähigkeit der Wandelemente bei unterschiedlichen Dübelanordnungs- und Verschränkungskonzepten?

Dabei wurden die folgenden wissenschaftlich-technischen Ziele verfolgt:

1. Signifikante Reduktion des Ressourcenverbrauchs im Vergleich zu Massivholz- und Holzrahmenkonstruktionen
2. Erhebliche Zeiteinsparung im Fertigungsprozess der Elemente (gegenüber dem Holzrahmenbau) durch einseitigen Montageprozess ohne Notwendigkeit für Wendevorgänge
3. Weitgehender Verzicht auf metallische Verbindungsmittel bzw. mineralische Schichten (wie bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen) im Sinne einer einfach recyclebaren, kreislauffähigen Konstruktion
4. Große Variabilität in Bezug auf die gezielte Steuerung der Eigenschaften der Tafелеlemente durch (kombinierte) Nutzung verschiedener Holzarten
5. Erhalt guter Wärmedämmeigenschaften durch saubere, dichte Ausführung der Verbindungsdetails und Verzicht auf metallische Verbinder
6. Verbesserung der Schallschutzeigenschaften durch Reduktion von Vollholzquerschnitten
7. Erhöhte Flexibilität während der Planung dank Verzicht auf standardisierte Rahmenabstände
8. Ermöglichung der Integration gezielter lokaler Verstärkungen in Abhängigkeit der lokalen Beanspruchungen

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeitsziele konnten gemäß des ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplans umgesetzt werden. Dem Projektfortschritt entsprechend wurden insgesamt elf Online-Konferenzen abgehalten, bei denen die erfolgten Arbeitsschritte gemeinsam kritisch reflektiert und diskutiert wurden, sowie von Seiten der assoziierten Partner Ratschläge für bevorstehende Arbeitsschritte angebracht wurden.

	12/22	01/23	02/23	03/23	04/23	05/23	06/23	07/23	08/23	09/23	10/23	11/23	12/23	01/24	02/24	03/24	04/24	05/24	PM [AP1]
AP 1.1		0,5	0,2																0,7
AP 1.2		0,3	0,3																0,6
AP 1.3		0,2	0,2	0,5															0,9
AP 1.4			0,3	0,3															0,6
AP 1.5				0,2	0,5														0,7
AP 1.6					0,5														0,5
M1				M1															
	12/22	01/23	02/23	03/23	04/23	05/23	06/23	07/23	08/23	09/23	10/23	11/23	12/23	01/24	02/24	03/24	04/24	05/24	PM [AP2]
AP 2.1					0,5														0,5
AP 2.2					0,5	0,5													1
AP 2.3						0,5													1
AP 2.4							0,3	0,5											0,8
AP 2.5							0,2	0,3	0,5	0,5									1,5
AP 2.6								0,2	0,5	0,5	0,2								1,4
AP 2.7											0,8								0,8
	12/22	01/23	02/23	03/23	04/23	05/23	06/23	07/23	08/23	09/23	10/23	11/23	12/23	01/24	02/24	03/24	04/24	05/24	PM [AP3]
AP 3.1												0,5	0,5						1
AP 3.2												0,5	0,3						0,8
AP 3.3													0,1	0,5	0,5				1,1
AP 3.4													0,1	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2	2
AP 3.5															0,8	0,5	0,8		2,1
M2																		M1	
Summe																			18

Abbildung 1: Projektplan mit der Verteilung der Arbeitszeiten über den jeweiligen Arbeitspaketen

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1.1 Untersuchung geometrisch-mathematischer Beziehungen zwischen Komponenten-, Baugruppen- und Gebädefaktoren	1.12.22 -31.01.23	abgeschlossen
AP 1.2 Untersuchung materieller Parameter	1.12.22 -31.01.23	abgeschlossen
AP 1.3 Untersuchung der Wechselwirkung statisch-struktureller und fertigungstechnischer Parameter	1.12.22 -28.02.23	abgeschlossen
AP 1.4 Übersetzung bionischer Prinzipien in ein parametrisches und lastafines Geometrie-Konzept	1.01.23 -28.02.23	abgeschlossen
AP 1.5 Mitwirken bei der Planung der Versuchsaufbauten und Durchführung von Vorversuchen	1.02.23 -31.03.23	abgeschlossen
AP 1.6 Bewertung vorgelagerter Ressourcennetzwerke und nachgelagerter Verbrauchernetzwerke von IDS-Elementen	1.03.23 -31.03.23	abgeschlossen
AP 2.1 Konzipierung einer wirtschaftlichen Fertigungsstrategie, basierend auf 5-Achs-Plattenbearbeitungsanlagen	1.04.23 -30.04.23	abgeschlossen
AP 2.2 Erzeugen von Bohrlöchern und Taschen-Fräsungen in unterschiedlichen Lochdurchmessern mittels Tiefloch Bohrungen und Spiralfräsungen	1.04.23 -31.05.23	abgeschlossen
AP 2.3 Ausführen verschiedener Bohrlochwinkel und Dokumentation der jeweiligen Fertigungsdauer	1.05.23 -30.06.23	abgeschlossen
AP 2.4 Untersuchen der Auswirkung von Talkum während des Eintreibvorgangs der Dübel	1.06.23 -31.07.23	abgeschlossen
AP 2.5 Erproben von NC-gesteuertem Einschießen von Holznägeln bei variierenden Ausrichtungen der Vernagelung sowie verschiedenen Einschusstiefen und Nageldurchmessern	1.06.23 -30.09.23	abgeschlossen
AP 2.6 Fertigung von Prototypen mit einem 6-Achs Industrieroboter und mit einer 5-Achs CNC-Anlage	1.07.23 -31.10.23	abgeschlossen
AP 2.7 Analyse und Dokumentation der Planungs-, Fertigungs- und Montageschritte der Prototypen	1.07.23 -31.10.23	abgeschlossen
AP 3.1 Planung der Versuchkörper und Versuchsaufbauten	1.11.23 -31.12.23	abgeschlossen
AP 3.2 Fertigung der Prüfkörper	1.11.23 -31.12.23	abgeschlossen

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 3.3 Durchführung von Splitblock- bzw, Belastungsversuchen	1.12.23 -28.02.23	abgeschlossen
AP 3.4 Ermittlung der Elastizitätsgrenze und maximal auftretenden Querschubkräften in IDS-Prüfkörpern im Zusammenspiel einer Vielzahl von Dübelverbindungen	1.12.23 -31.05.23	abgeschlossen
AP 3.5 Darlegung einer effektiven Fertigungsstraße für IDS Elemente und Festlegung von Leitdetails für günstige Dübelkonfigurationen	1.03.23 -31.05.23	abgeschlossen

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Die technische Umsetzbarkeit des Konstruktionsprinzips wurde geprüft und bestätigt.	31.03.2023	abgeschlossen
M 2 Ein funktionstüchtiges Fertigungskonzept liegt vor. Darauf basierend wurden Prüfkörper erstellt und Belastungsversuche durchgeführt.	31.05.2024	abgeschlossen

b) Zusammenfassung

Der konstruktive Ansatz, tragende Furnierschichtholzplatten mittels schräg angeordneter und mechanisch verankerter Dübel (statisch) zu koppeln, ist stark genug, um eine lastabtragende, formschlüssige Struktur zu schaffen. So zeigen die Ergebnisse der Belastungsversuche, dass die IDS-Elemente mit geringerem Materialeinsatz eine vergleichbare Leistungsfähigkeit erreichen, wie die konventioneller aufgelöster Holzkonstruktionen und Holz-Leichtbauweisen.

IDS-Wandelemente mit mechanisch verankerten Dübeln können mit einem Industrieroboter, einer Lineareinheit, einem Kompressor und einem Werkzeugwechselsystem (Effektoren: Hochfrequenzspindel, Bohraggregat, Greifer und Coilnagler) vollautomatisch hergestellt werden. Der Einsatz von Klebstoffen ist nicht zwingend erforderlich und es ist kein Wenden der Elemente notwendig, um eine kraftschlüssige Verankerung der schrägen Dübelverbindungen zu erreichen. Die Wandbauweise stellt somit eine wirtschaftlich sinnvolle Lösung für mittelständische Holzbaubetriebe dar, die kleinformatige, numerisch gesteuerte Fertigungsstationen zur zeitsparenden Herstellung von Wandelementen einsetzen.

Insbesondere bei der Platzierung von Fenster- und Türöffnungen in der Wandfläche kann die lastaffine Positionierung der Dübel zu einer weiteren Verbesserung des Tragverhaltens der Konstruktion (bei gleichem Materialaufwand) führen. Aufgrund der hohen Anzahl von Variablen innerhalb der geometrischen Modelle der Wände, sind dazu jedoch umfangreiche Berechnungsprozesse notwendig.

Solang diese zu einer Erhöhung der Planungszeit führen, ist eine zusätzliche Optimierung wirtschaftlich nicht interessant. Der Aspekt der Zeitersparnis aufgrund homogener generischer Dübelmuster überwiegt dann dem Anspruch eines geringfügig niedrigeren Materialeinsatzes mittels Dübelmuster-Optimierung.

Im Ergebnis der aktiven Forschungsarbeiten wurden gleichwohl auch verschiedene Herausforderungen und Fragestellungen sichtbar, die einer weiteren intensiven Untersuchung bedürfen. So konnte festgestellt werden, dass die notwendigerweise hochpräzise Klemmwirkung der Dübel in den Bohrungen der Furnierschichtholzplatten in der praktischen Umsetzung aufgrund der komplexen Wechselwirkung der unterschiedlichen Parameter eine Aufgabe mit besonders hohem Anspruch beschreibt. Es wurden verschiedene Konzepte getestet, die unterschiedliche Vor- und Nachteile beinhalten. Da die Verlässlichkeit der Klemmung der Dübel in den Platten für den Erfolg des Wandbausystems von ausschlaggebender Bedeutung ist, bedarf es hier zwingend weiterer Untersuchungen, um ein Setting zu definieren, welches die notwendigen Qualitäten mit hinreichender Sicherheit liefert.

Zwei weitere integrale Teilthemen der Bauweise, welche im Rahmen der Machbarkeitsstudie noch nicht ausreichend beleuchtet werden konnten, sind das Elementierungskonzept und die geometrisch-konstruktive Definition der Kontaktbereiche der Elemente. Um diese zu konzipieren und zu erproben bzw. zu validieren, sind zwingend weitere Forschungen an großmaßstäblichen Modellen notwendig, die sinnvollerweise schlussendlich in einem Experimentalbau umgesetzt werden (Proof-of-Concept). Hierbei muss der Fokus unbedingt darauf gelegt werden, die Detailpunkte der Stöße so auszuführen, dass sie dem hohen Grad an Präzision gerecht werden, die dem Fertigungskonzept der IDS-Elemente zugrunde liegen. Im Spannungsfeld der Themen Lastübertragung, Fertigungstoleranzen, Montierbarkeit und Wirtschaftlichkeit sind Details zu entwickeln, die eine möglichst direkte Kraftübertragung zwischen den Furnierschichtholzplatten gewährleisten. Hier müssen tendenziell Lösungen gefunden werden, welche die Möglichkeiten NC-gesteuerter Fertigungstechnik konsequent ausnutzen und deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Die folgenden drei zentralen Ergebnisse konnten erzielt werden:

- (1) Es konnte gezeigt werden, dass die Dübel-Verbindungen ein ähnliches Tragverhalten, bei vergleichbarer Tragfähigkeit aufweisen, wie es das FE-Modell vorhersagt. Damit ist die Grundlage für ein Bemessungsmodell des IDS geschaffen.
- (2) Die Belastungsversuche zeigen, dass IDS-Elemente bei vergleichbarer Leistungsfähigkeit, weniger Material benötigen als konventionelle aufgelöste Holzbauweisen.
- (3) Ein vollautomatisierter Fertigungs-Workflow konnte definiert werden. Dieser beinhaltet folgende technische Komponenten und Arbeitsschritte: (a) Pilotfräsungen mit Hochfrequenzspindel, (b) schräge Tieflochbohrungen mit Bohraggregat, (c) Eintreiben der Dübel mit pneumatischem Greifer und (d) mechanisches Verankern der Dübelköpfe mit Coilnagler.

Darüber hinaus konnten folgende technische Erkenntnisse in Bezug auf die Dübelverbindungen gewonnen werden:

- (1) Dübel mit 20 mm Durchmesser sind für die Bauweise am besten geeignet. Des Weiteren ist auf thermische Verkeilung zu verzichten, da diese die Produktionsdauer stark erhöht und nur geringfügig bessere Tragfähigkeit im Zusammenwirken der Dübel als Wandscheibe erzielt.
- (2) Steilere Bohreintrittswinkel als 20 Grad sind fertigungsbedingt nicht oder nur mit hohen Risiken umsetzbar.
- (3) Eine fachwerkartige Anordnung der Dübel (entlang des Kräfteverlaufs) kann die Leistungsfähigkeit des Elements gegenüber einer randomisierten Anordnung um bis zu 50% erhöhen.
- (4) Die Tragfähigkeit verkeilter bzw. aufgespreizter Dübel bleibt nur geringfügig hinter der von verleimten Verbindungen zurück (~5%). Somit ist die leimlose Ausführung der Verbindung zu empfehlen.
- (5) Je flacher der Bohreintrittswinkel zur Plattenebene, desto höher die Abweichungen des Bohrwinkels und des Bohreintrittspunktes
- (6) Je länger der Bohrer desto größer die Abweichungen des Bohrwinkels und des Bohreintrittspunktes
- (7) Je steiler die Neigung der Bohrachse zur Fasserrichtung der Deckschicht desto höher die Abweichung des Bohrwinkels und des Bohreintrittspunktes
- (8) Je spitzer der Bohrer-Dorn desto präziser die Bohrung
- (9) Die Faserrichtung der Furnier-Deckschicht hat weniger Einfluss auf den Grad der Abweichung als die Rohdichte des Werkstoffs

Arbeitspaket 1: Klärung der technischen Umsetzbarkeit von IDS-Elementen

AP 1.1 Untersuchung geometrisch-mathematischer Beziehungen zwischen Komponenten-, Baugruppen und Gebäudefaktoren

Erste FE-Analysen des vorgestellten Wandbaukonzepts zeigten, dass die Art der Verankerung der Dübel einen großen Einfluss auf das Tragverhalten der resultierenden Wände hat. Die Analyse wurde unter Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten durch große Durchbiegungen, Weg-gesteuerte Lastschritte und ein orthotrop-elastisches Materialmodell durchgeführt. Die resultierenden Last-Durchbiegungskurven (Abbildung 2) sind stark von Imperfektionen beeinflusst. Diese Erkenntnis hatte zur Folge, dass die Art der Verankerung des Dübels in der Furnierschichtholz-Platte und dessen Einfluss auf den Passsitz der Verbindung genauer untersucht werden musste.

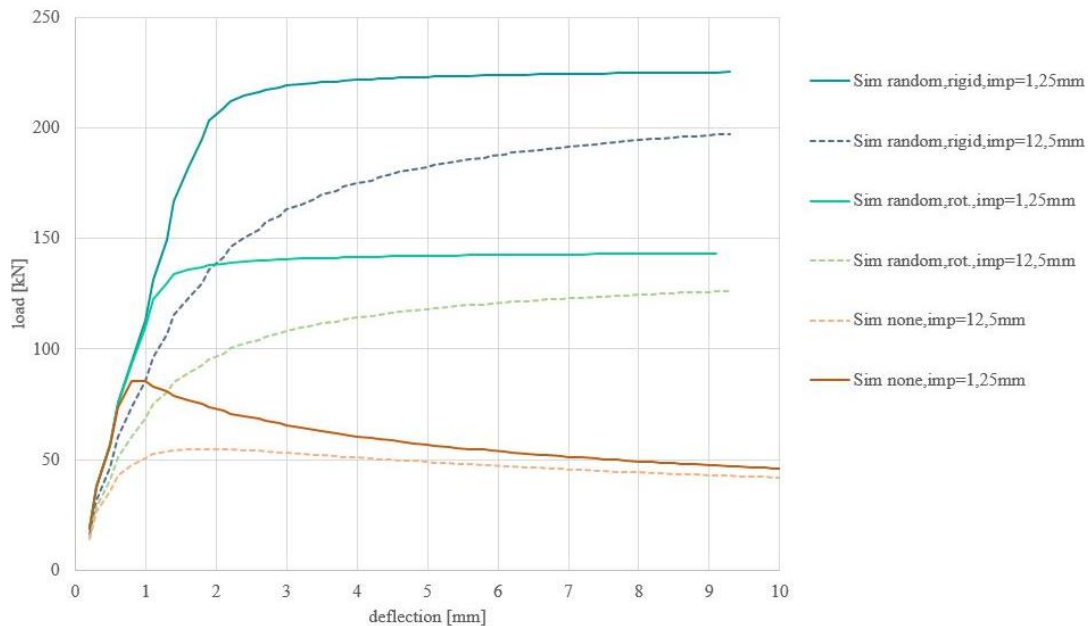


Abbildung 2: Last-Durchbiegungskurven eines simulierten Probekörpers mit starren Dübeln, gelenkigen Dübeln und ohne Dübel, Grafik: FLEX@HTWK-Leipzig, Cristoph Dijoux

Außerdem wurde in diesem Arbeitspaket (in Zusammenarbeit mit SFK Architekten) ein Bauteilkatalog erstellt welcher, angepasst an den Bauraum der prototypischen Fertigungsstationen, alle Standard-Bauteiltypen von IDS-Wandelementen abbilden kann (Wand geschlossen, Wand mit Türöffnung, Wand mit Fensteröffnung, Eck-Element), die nötig sind, um einen bewohnbaren Raum zu umschließen (Abbildung 3). Zusätzlich wurden Standarddetails für den Fuß- und Kopfpunkt der Wände entwickelt (Anschlussdetail Wand-Decke und Anschlussdetail Wand-Bodenplatte).

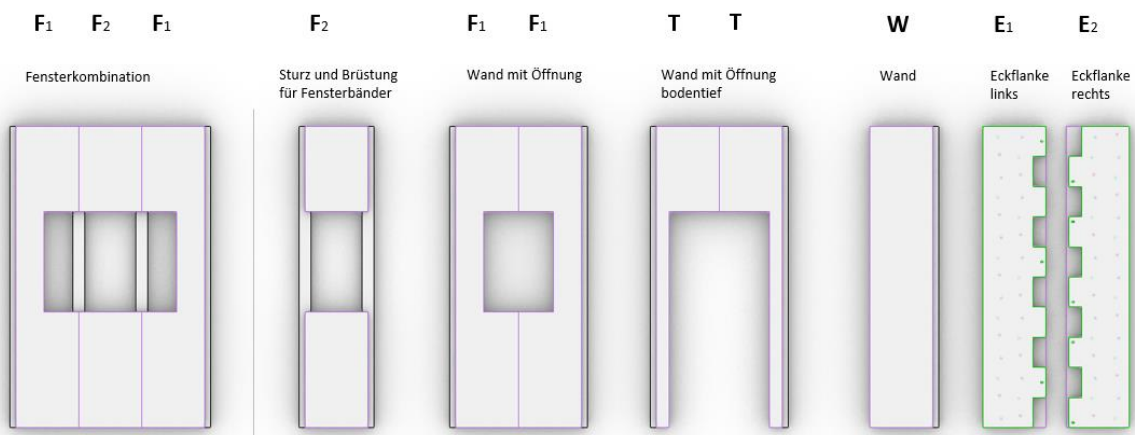


Abbildung 3: Auszug aus dem Bauteilkatalog, Grafik: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

AP 1.2 Untersuchung materieller Parameter

Alle beteiligten Bauteilkomponenten (Furnierschichtholz, Holzweichfaser-Dämmstoff und Buchen-Rundholz) wurden in Bezug auf ihre Handhabung untersucht und auf ihre Kombinierbarkeit überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass insbesondere die Furnierschichtholzplatten und Rundhölzer, unabhängig vom Hersteller, von ihren vorgegebenen Bauteilabmessungen abwichen. Besonders stark variierten die Rundholzstäbe im Durchmesser. Hier wurden Unterschiede von über einem Millimeter gemessen. Dieses Phänomen ist in beiden Fällen auf die anisotropen Eigenschaften des Werkstoffes Holz zurückzuführen. Im Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus den FE-Analysen im AP 1.1 wurde entschieden, Rundhölzer mit vermindertem Querschnitt auszusortieren da dies die Tragfähigkeit der ganzen Wand stark beeinflussen würde. Ebenso wurden die Krümmungen der Furnierschichtholzplatten dokumentiert und die Streuung der Werte betrachtet.

Zusätzlich wurde überprüft inwiefern sich die Dübel zur Führung von Keilen oder Nägeln –möglichst normiert- im Vorfeld anschlitzen oder anbohren lassen und ob sich die Verkeilung der Dübel im Furnierschichtholz (FSH) mithilfe von Riefen verbessert. Auch das Auftragen verschiedener Leime wurde erprobt.



Abbildung 4: Umsetzung verleimter Dübelverbindungen (links), Präparation der Rundhölzer (mittig und rechts), Fotos: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

AP 1.3 Untersuchung der Wechselwirkung statisch-struktureller und fertigungstechnischer Parameter

Mithilfe der Finite Elemente Methode wurde die Leistungsfähigkeit verschiedener Dübelanordnungen und Ausrichtungen simuliert und analysiert. Den Berechnungen zufolge wäre eine fachwerkartige Anordnung der Dübel entlang des Kräfteverlaufs sinnvoll. Die dafür notwendige optimale Schrägstellung der Dübel von 45° zur Plattenormalen hat jedoch eine Verlängerung des Bohrweges sowie enorme Abweichungen aufgrund von Abrutschen oder Weggleitens der Bohrspitze zur Folge. Außerdem erhöht sich auf diese Weise die Fertigungsdauer (aufgrund von Kollisionsgefahr des Tools bei hohen Geschwindigkeiten) um ca. 50 %. Nach Annäherungsversuchen in leichten Abstufungen wurde eine abgeänderte Variante einer fachwerkartigen Anordnung mit stumpferen Winkeln (24°) umgesetzt.

AP 1.4 Übersetzung bionischer Prinzipien in ein parametrisches und lastaffines Geometrie-konzept

Mithilfe der grafischen Programmierumgebung Grasshopper, konnten Algorithmen konzipiert werden, welche die Population und Verteilung der Dübelursprungspunkte auf der Wandfläche ähnlich wie beim Zellwachstum von Pflanzenzellen regulieren. Dabei blieben Dübelanzahl und –Neigungswinkel gleich und auch die Abstände zwischen den Dübeln waren fest definiert. Es bleibt aber möglich, dass die Dübelursprungspunkte je nach Abmessungen der zu erzeugenden Geometrie (Wandstärke, Position der Türöffnung, etc.) über die Fläche wandern und insgesamt eine gleichmäßige Verteilung hergestellt wird. Die Aktionsfläche des Algorithmus kann dabei unterteilt und unterschiedlich gewichtet werden. So lassen sich Bereiche definieren, in denen die Dichte an Dübelverbindungen geringer ist als in solchen wo sie unverzichtbar sind, wie zum Beispiel im Randbereich der Wandscheiben.

AP 1.5 Mitwirken bei der Planung der Versuchsaufbauten und Durchführung von Vorversuchen

Es wurden zwei Versuchsaufbauten geplant. Zunächst musste der Auzugswiderstand verschiedener Dübelverbindungen bestimmt werden. Dazu wurden einzelne Dübel in lotrechten Lochleibungen verankert. Die so entstandenen Kacheln (Abbildung 5) wurden unter einer Stahlplatte mit kreisförmigem Ausschnitt fixiert. Anschließend wurde der Dübel am herausstehenden Dübelende über einen Greifkopf am Prüfzylinder fixiert und aus der Lochleibung gezogen.



*Abbildung 5: Prototyp eines Prüfkörpers für die Ermittlung des Auszugswiderstandes unterschiedlicher Dübelverbindungen;
Fotos: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies*

Im zweiten Versuchsaufbau sollte das Zusammenspiel, bzw. das Lastumverteilungsvermögen einer Vielzahl von Dübeln im Wandelement erforscht werden. Dies wurde mit einer servohydraulischen Belastungsanlage simuliert, welche über einen gelenkigen Lasteinleitungspunkt (Kalotte) vertikale Lasten von bis zu 4000 kN erzeugen kann. Entsprechend der Abmessungen der Prüfmaschinen (max. Breite des Prüfraumes = 65 cm) und der dazugehörigen Messtechnik wurden raumhohe Prüfkörper (Höhe = 250 cm) mit variierenden Bauteiltiefen (15 - 20 cm) geplant. Die Elemente wurden mit Randstreifen (Schwelle-/Rähm-Prinzip) ausgestattet, damit die nach dem IDS-Prinzip konzipierten, in drei, längs zur Wand unterteilten Schichten der Wandscheiben, nicht am Fuß- oder Kopfpunkt auseinander gedrückt werden konnten.

AP 1.6 Bewertung vorgelagerter Ressourcennetzwerke und nachgelagerter Verbrauchernetzwerke von IDS-Elementen

In intensiven, über die gesamte Projektlaufzeit anhaltenden Gesprächen mit den assoziierten Projektpartnern BECK Fastening, SOPREMA, Leitner Holzwaren, Pollmeier, wurden mögliche Verbrauchernetzwerke skizziert und analysiert. In Bezug auf die Fertighausindustrie konnte festgehalten werden, dass das IDS-Prinzip eine vielversprechende Alternative zu Massivholzkonstruktionen (Brettsperholz) darstellen, da es auf ähnlichen industriellen Prozessen basiert, aber weniger Material benötigt. Dafür müsste jedoch die Dübelverteilung homogenisiert und von dem Prinzip der lastaffinen Anordnung abgerückt werden.

Ein weiterer Punkt der in diesem Kontext analysiert wurde, war die Preisentwicklung der FSH-Platten. Hier zeichnet sich laut den Herstellern Pollmeier und MetsäWood langfristig eine Preissenkung an. Bereits heute ist der Preis für gerichtetes FSH um die Hälfte gesunken (750 EUR / m³) und nähert sich damit dem Preis von Konstruktionsvollholz (KVH) an.

Arbeitspaket 2: Entwicklung eines Fertigungskonzepts

Zunächst wurden die Grenzen der Bewegungsräume des zu Verfügung stehenden Industrieroboters (Kuka HA60) und der 5-Achs Portal-Anlage (SCM) ermittelt. Dies geschah indem extreme Zustellungen und Bewegungsabfolgen mit der jeweiligen Steuerungs-Software simuliert und anschließend als Maschinencode an die Anlagen übertragen und ohne Werkzeug physisch angefahren wurden.

Aus den Analysedaten (Auslastung der Achsen, Geschwindigkeit und Auftreten von Singularitäten) wurden Arbeitsraumzonen abgeleitet, welche sich für eine reibungslose Fertigung ohne Einschränkung der Freiheitsgrade eigneten und solche die aufgrund von Kollisionsgefahr frei bleiben sollten, dafür aber für die Befestigung von Spannwerkzeugen genutzt werden konnten.

Daraufhin wurden verschiedene Ansätze zur Herstellung schräger Tieflochbohrungen erprobt. Dazu wurde wahlweise mit Schlangenbohrern, modifizierten Forstnerbohrern und Lochsägen gearbeitet. Die Experimente wurden mit den numerisch gesteuerten Anlagen sowie von Hand ausgeführt. Dazu wurden Führungen und Scheinen eingesetzt. Um extreme Bohrtiefen zu simulieren wurden verschiedene Schichtungen von Holzwerkstoffen getestet sowie hohle Elemente bearbeitet die mit Distanzklötzen gefüllt waren.

AP 2.1 Konzipierung einer wirtschaftlichen Fertigungsstrategie, basierend auf 5-Achs-Portalbearbeitungsanlagen und 6-Achs Industrierobotern

ROBOTISCHE FERTIGUNG. Bei den Untersuchungen wurden die Fertigungszeiten gemessen und der jeweilige Aufwand einzelner Fertigungsschritte seinem Nutzen gegenübergestellt. Die durchschnittliche Fertigungszeit in Bezug auf eine einzelne Dübelverbindungen werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Insbesondere die Vorgänge des Bohrens und des Eintreibens sind zeitintensiv jedoch im Gegensatz zum Fräsen und Aufspreizen unumgänglich.

Vorgang	Fräsen	Bohren	Eintreiben	Aufspreizen
Dauer	7 Sek.	56 Sek.	25 Sek.	5 Sek.

Da alle vier beschriebenen Fertigungsschritte auf die selben Koordinaten zurückgreifen, können Abweichungen rasch zu Konflikten / Kollisionen führen. So trifft das Nagelsetzgerät beispielsweise nicht die Dübelachse, wenn dieser aufgrund von Abweichungen beim Bohren in seiner Position verrutscht. Für die Sensitivitätsanalyse der jeweiligen Fertigungsschritte musste daher zunächst der Grad möglicher Abweichungen genauer bestimmt werden.

5-ACHS-PORTALANLAGE. Bei Fertigungsversuchen auf der 5-Achs-Portalbearbeitungsanlage der Firma Weigel wurde ersichtlich, dass das Tiefloch-Bohren in den gewünschten Bohrtiefen damit nicht umsetzbar ist. Alternativ wurde mit einem verlängerten Fräser gearbeitet, der mittels Helix-Fräsen Lochartige Taschen umsetzen konnte. Hier wurde eine bessere Lochleibungsqualität erzielt und eine Verkürzung der Fertigungsdauer um bis zu 20 % gemessen. Jedoch konnten auf diese Weise nur Löcher mit einer Tiefe von bis zu 120 mm erzeugt werden. Diese reichte für baupraktische Maßnahmen nicht aus.

AP 2.2 Erzeugen von Bohrlöchern und Taschenfräsungen in unterschiedlichen Lochdurchmessern mittels Tiefloch-Bohrungen und Spiralfräsen

Eine Möglichkeit, die Abweichungen der Bohreintrittspunkte und -neigungen zu verringern, besteht darin, rampenartige Vorfräsungen in die oberste Schicht der FSH-platte einzubringen. Die Rampe muss senkrecht zur Bohrachse ausgerichtet werden und breit genug sein, um die Schneide des Bohrwerkzeugs aufzunehmen. Auf diese Weise trifft der Bohrer senkrecht auf das Furnierschichtholz auf und rutscht auch bei starken Neigungen nicht ab. Auch die Beeinflussung durch den Faserverlauf kann so vermieden werden. Der 3D-Scan (mittels ArtecLeo Handscan) solcher Verbindungen zeigte eine Abweichung von <1 mm (Abb. 11) in der Bohrerposition bzw. <0,3° Abweichung in der Neigung der Bohrerachse. Dieses Maß liegt unterhalb der üblichen Toleranzgrenze im Holzbau.

AP 2.3 Ausführen verschiedener Bohrlochwinkel und Dokumentation der jeweiligen Fertigungsdauer

Das robotische Bohren mit zur Werkstückoberfläche bzw. Flächennormalen geneigter Bohrachse stellt eine große Herausforderung dar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Roboterarm, in der Regel alle sechs Achsen bewegen muss, um eine gerade Linie abzufahren. Genauer betrachtet, fährt er dabei entlang einer Abfolge von aneinander gereihten Kreisbogen-Segmenten. Infolgedessen lassen sich von Natur aus geringfügige Abweichungen zwischen den digitalen Sollwerten und den physischen von der NC-Anlage (Industrieroboter) umgesetzten Resultaten feststellen, auf die die Forschenden keinen Einfluss nehmen konnten.

Um weitere, fertigungsbedingte Abweichungen messen zu können, wurden schräge Bohrungen bzw. Tieflochbohrungen mit variierendem Neigungswinkel und unterschiedlichen Bohrwerkzeugen durchgeführt und die Sollwerte (Position und Neigungswinkel) mit den real gemessenen Werten verglichen.

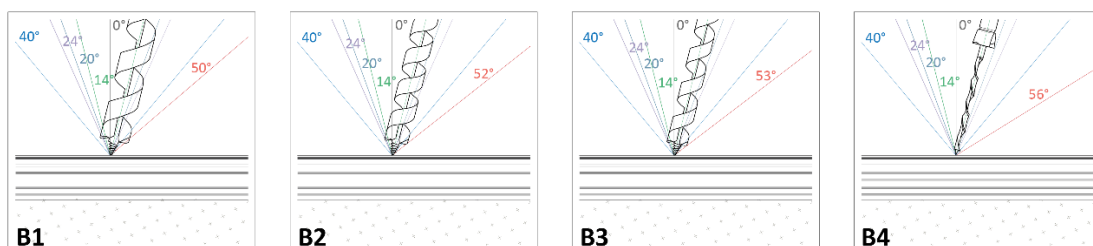


Abbildung 6: Bohrertypen; Grafik: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

Die dazu veranlasste Versuchsserie sah acht Wiederholungen schräger Bohrungen für insgesamt vier unterschiedliche Bohrer-Typen vor (B1: Schlangenbohrer 20mm/265mm; B2: Schlangenbohrer 16mm/255mm; B3: Schlangenbohrer 14mm/440mm jeweils als Einlippenbohrer und B4: Fostnerbohrer mit Verlängerung und Dorn 15mm/345mm, als Zweilippenbohrer), mit denen jeweils in 14°, 20° und 24° und 40° Neigung zur Plattennormalen 16 - 20 cm tiefe Bohrungen durchgeführt wurden. Die Winkel wurden entsprechend den Ergebnissen aus vorangehenden Versuchen/Betrachtungen zu den Zusammenhängen zwischen Dübelneigung und resultierender Federsteifigkeit gewählt. Die Bohrungen wurden mit einem Vorschub von 7,5 mm/Sek und einer Drehzahl von 255 U/min (B1+B2), 480 U/min (B3) und 360 U/min (B4) durchgeführt. Anschließend wurden die Bohrlochpositionen mittels 3D-Scan (ArtecLeo) festgehalten. Um den Neigungsgrad der Bohrlöcher zu vermessen wurden Rundholzstäbe mit doppelter Länge in die Lochleibung eingetrieben und die überstehenden Stücke im Verhältnis zur Plattennormalen vermessen.

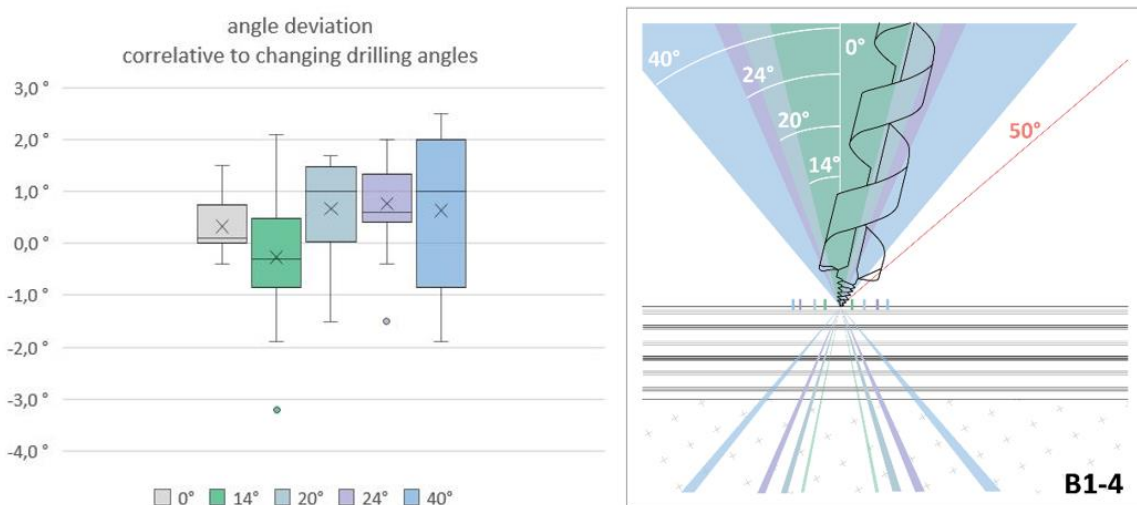


Abbildung 7: Grad der Abweichung bei unterschiedlichen Bohrungsneigungen von 0°-40° (links); Abweichungen in schematischer Darstellung (rechts); Grafiken: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

AP 2.4 Untersuchen der Auswirkung von Talkum während des Eintreibvorgangs der Dübel

Wie aus der Arbeit von Erwin Thoma bekannt, kann Talkum das Eintreiben von Holzdübeln (in geringfügig engere Lochleibungen) erleichtern. Dies konnte in Vorversuchen bestätigt werden. Bei der Applikation des Talkums an einer Vielzahl (40 St.) von Buchendübeln, die daraufhin in ein Dübelmagazin eingelegt und vom Roboter mithilfe eines pneumatisch gesteuerten Greifers in die Lochleibungen eingetrieben wurden, kam es jedoch gelegentlich zu Komplikationen. Zwar konnten alle Dübel reibungslos in die vorgesehenen Löcher gesetzt werden, doch führte das feine Pulver zu Ablagerungen an den Greiferlippen und zu erhöhter Staubeentwicklung. Der entstandene Mehraufwand im prototypischen Setup war mit dem geringen Plus an Eintreibe-Komfort nicht zu rechtfertigen.

AP 2.5 Erproben von NC-gesteuertem Einschießen von Holznägeln bei variierenden Ausrichtungen der Vernagelung sowie verschiedenen Einschusstiefen und Nageldurchmessern

Die Verankerung der Dübel lässt sich auf einfache Weise mit Leim erzeugen. Eine solche Verbindung wäre aber nicht reversibel (nur mit erhöhtem Aufwand) und würde dem Prinzip des sortenreinen Bauens widersprechen. Eine weitere bekannte Herangehensweise zur Verklemmung der Dübel ist die Nutzung der Quell-Effekte bestimmter Laubhölzer. Dies erfordert ein Erhitzen bzw. Trocknen der Dübel und einen sauber getakteten Workflow (zeitnahes Eintreiben der getrockneten Dübel), so dass sich das Holz erst in den vorgesehenen Löchern aufgrund der Luftfeuchte an seinen Ursprungszustand angleicht. Auch diese Methode erforderte einen erheblichen zusätzlichen Aufwand (Luftdichte Lagerung und Transport der Dübel) und wurde deshalb nicht weiterverfolgt. In diesem Arbeitspaket wurde stattdessen eine alternative, mechanische Verankerung mittels Aufspritzen der Dübelköpfe – und Füße erforscht.

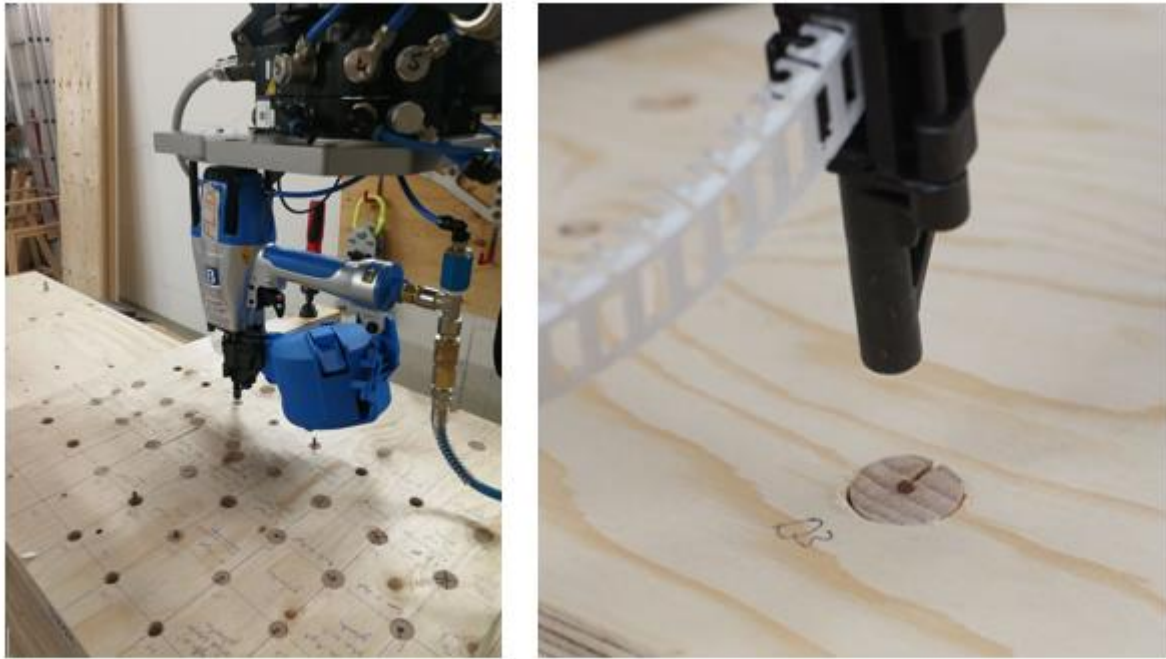


Abbildung 8: Nagel-Setzgerät (F44) des Herstellers BECK Fastening bei Versuchen zur Klemmwirkung vernagelter Dübelverbindungen (links), Nahaufnahme eines vernagelten Dübelkopfes (rechts); Fotos: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

Um die mechanische Verankerung mittels Aufspreizen der Dübel Köpfe zu erproben, wurden zwei unterschiedlich große pneumatische Nagelsetzsysteme (F44 + F60) des Projektpartners BECK Fastening verwendet. Diese wurden auf einem Testfeld mit insgesamt 90 in entsprechende Bohrungen eingelassenen Dübeln vom Roboter auf die Dübelachsen ausgerichtet und ausgelöst (vgl. Abbildung 8). Dabei konnte festgestellt werden, dass das Aufspreizen von Dübeln welche in ihrem ursprünglichen Zustand belassen wurden, eine deutlich höhere Klemmwirkung erzeugte als bei solchen die zur Führung des Nagels eine Bohrung oder Schlitzung entlang der Längsachse erhalten hatten.

Auszugsversuche mit Dübelverbindungen unterschiedlicher Durchmesser haben gezeigt, dass die Verpressung der Dübel mit Hartholznägeln (LignoLoc F44) die Auszugsfestigkeit deutlich verbessern kann. Um eine möglichst große Homogenität innerhalb der gemessenen Werte der Auszugsfestigkeit zu erreichen, muss sichergestellt werden, dass die Dübel beim Aufspreizen durch den Nagel nicht splintern. Zur Führung der Spreizung und Vermeidung des Splitters und Spaltens wurden die Dübelköpfe mit Vorbohrungen und Schlitzern versehen. Die entsprechenden Auszugsversuche zeigten, dass die Klemmwirkung von geschlitzten Dübeln mit zunehmender Schlitztiefe abnimmt. Da die Gefahr des Aufspaltens auch bei tieferen Schlitzern nicht abnimmt, führt ein möglichst flacher Schlitz bei dieser Art der Vorbereitung zum besten Verbund.

AP 2.6 Fertigung von Prototypen mit einem 6-Achs Industrieroboter und mit einer 5-Achs CNC-Anlage

Zunächst wurde eine Liste von fünfzehn Prüfkörper-Typen (W1-W15) mit jeweils individuellen strukturellen Konfigurationen erstellt. Dabei changierten die folgenden Parameter: Plattenstärke (25 mm und 30 mm), Dübeldurchmesser (16 mm, 20 mm und 21,5 mm), Neigungsgrad der Dübel (14°, und 24°) und die Art der Verankerung (thermische Verpressung aufgrund des Quellvermögens von Buchenholz, Aufspreizung mittels Buchenholznägeln oder Keilen und Einleimen mit Weißleim). Es wurde jeweils die Fertigungsdauer gemessen und die Qualität der Lochleibungen dokumentiert.

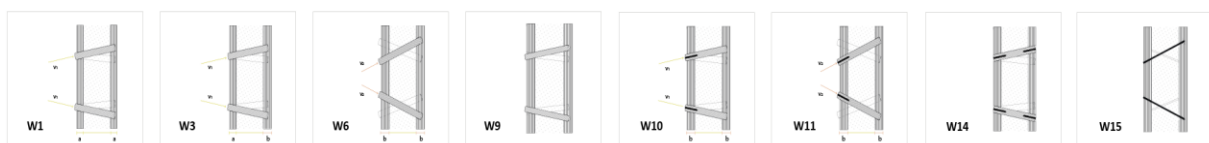


Abbildung 9: Schnittdarstellungen verschiedener Prüfkörper Typen; Grafik: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

Nach der ersten Versuchsreihe wurden besonders leistungsfähige Konfigurationen mehrfach hergestellt um eine statistische Sicherheit zu erlangen. Prüfkörper-Typen welche fertigungsbedingt aufwendiger waren im Vergleich mit anderen aber weniger Last aufnehmen konnten, wurden nicht weiter betrachtet.

Die Fertigung mit der 5-Achs CNC-Anlage stellte sich als nicht zielführend heraus, da die Steuerung der Anlage softwareseitig die Dübelausrichtung und –neigung limitierte. Auch technisch stieß die Anlage bei der Fertigung der Prototypen an ihre Grenzen. So waren Bohrungen und Fräsungen nur bis zu einer Tiefe von 120 mm möglich. Diese reichte für die fokussierten baupraktischen Zwecke der Dübelverbindungen nicht aus. Es sind weitere Versuche mit alternativen (größeren) Fertigungsanlagen notwendig, um eine eindeutige Aussage über die Umsetzbarkeit des Konzepts mit Portalbearbeitungsanlagen treffen zu können.

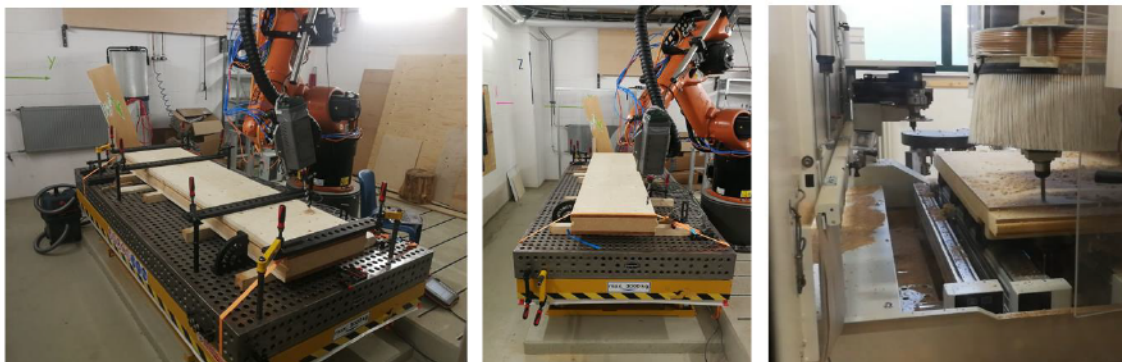


Abbildung 10: Robotische Fertigungsstation mit unterschiedlichen Einspannvorrichtungen (links und mittig), 5-Achs CNC-Portal-Anlage (rechts); Fotos: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

AP 2.7 Analyse und Dokumentation der Planungs-, Fertigungs- und Montageschritte der Prototypen

Da das Planungstool für die geometrische Darstellung etwaiger Prototypen von Beginn an parametrisch aufgesetzt wurde, waren zwar nachträgliche Anpassungen ohne größeren Aufwand möglich, es mussten aber Zwischenstände des Modells separat archiviert werden, um spätere Rückschlüsse zu ermöglichen.

Mit der wachsenden Erfahrung bei der Ausführung der jeweiligen Arbeitsschritte wurde auch das parametrische Planungsmodell umfangreicher. Es beinhaltet alle Werkzeugdaten, sowie die einzelnen Geometrien der Prototypen und Prüfkörper sowie die dazugehörigen Simulationen der Bewegungsabläufe. Die Planungs-, Fertigungs- und Montagefortschritte, sowie Zwischenschritte wurden zusätzlich in tabellarischer Form und fotografisch festgehalten.



Abbildung 11: Fertigung des Eckelements; Fotos: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

Arbeitspaket 3: Verifizierung des Fertigungskonzepts und Erstellung von Prüfkörpern

Bei der Durchführung verschiedener Tastversuche konnte gezeigt werden, dass die mechanische Verankerung der Dübel das Tragverhalten großformatiger Wandscheiben positiv beeinflusst. Das Beleimen der Lochleibungen oder der Dübel selbst bleibt somit erspart, bzw. kann durch den Einsatz von Nagelsetzgeräten ersetzt werden. Ebenso sind die Effekte des Aufquellens und dem daraus resultierenden Presssitz des Dübels in der Lochleibung für die innovative Wandbauweise nutzbar. Es zeichnet sich hierfür jedoch ein erhöhter Arbeitsaufwand ab, da die Dübel dafür zuvor getrocknet und in einer bestimmten Zeitspanne eingetrieben werden müssen.



Abbildung 14: Prüfkörper W1- W8; Fotos: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

AP 3.3 Durchführung von Splitblock- bzw, Belastungsversuchen

Es wurde eine Versuchsreihe zum Tragverhalten der Konstruktion unter Normallast durchgeführt. Dabei wurden insgesamt zwanzig Prüfkörper nacheinander in der Prüfmaschine positioniert und vertikal belastet (Abbildung 15). Die Tastversuche zeigten, dass die mechanische Verankerung der Dübel das Tragverhalten großformatiger Wandscheiben positiv beeinflusst. Das Beleimen der Lochleibungen oder der Dübel selbst kann somit erspart bleiben, bzw. kann durch den Einsatz von Nagelsetzgeräten ersetzt werden.

Ebenso sind die Effekte des Aufquellens und dem daraus resultierenden Presssitz der Dübel (in der Lochleibung) für die innovative Wandbauweise nutzbar. Es zeichnet sich hierfür jedoch ein erhöhter Arbeitsaufwand ab, da die Dübel dafür zuvor getrocknet und in einer bestimmten Zeitspanne eingetrieben werden müssen.

Anstelle der Splitblockversuche wurden zur isolierten Ermittlung von Verbindungseigenschaften, die für die Simulation der Wandscheiben notwendig sind, eine Versuchsreihe zum Auszugswiderstand der Dübelverbindungen durchgeführt. Dazu wurden insgesamt 90 Prüfkörper mit jeweils einer einzelnen Dübelverbindung auf deren Auszugswiderstand geprüft.



Abbildung 15: W3 im Belastungsversuch;
Fotos: FLEX@HTWK-Leipzig, Felix Schmidt-Kleespies

AP 3.4 Ermittlung der Versagensarten und Maximallasten in IDS-Prüfkörpern im Zusammenspiel einer Vielzahl von Dübelverbindungen

Unter vertikaler Belastung versagten die Prüfkörper (60 cm Breite, 250 cm Höhe und 16 cm Tiefe) mit rein verschränkten Dübeln bei 120 kN. Dieser Wert wurde im FE-Modell prognostiziert. Mit robotisch verankerten Verbindungen (verleimt oder mittels Holznägeln und Keilen) versagten die Prüfkörper erst bei 195 kN.

Bei den Belastungsversuchen an Prüfkörpern mit eingeleimten Dübeln kam es zu einem schlagartigen Versagen, da keine Lastumverteilung stattfinden konnte. Beim Versagen der am stärksten beanspruchtesten Dübelverbindung wird die Maximallast der Gesamtkonstruktion erreicht. Bei allen anderen Belastungsversuchen fand ein duktileres Versagen statt. Die Bewegung der Dübel in Richtung ihrer Längsachse betrug durchschnittlich weniger als 0,1 mm.

Die Auszugsversuche an einzelnen Dübelverbindungen zeigten, dass mechanisch verankerte Dübelverbindungen nur ein Drittel (2000 N) des Auszugswiderstandes von verleimten Dübelverbindungen besitzen (5700 N). Im Zusammenspiel von 40 Verbindungen im Wandelement war diese Tendenz jedoch nicht nachzuweisen. Hier erreichten Prüfkörper mit geklebten Dübeln eine ähnliche Tragfähigkeit (190 kN) wie solche mit mechanisch verankerten Dübeln. Da letztere aber die Möglichkeit der Demontage und Wiederverwendung mit sich bringen, wären sie der verleimten Variante vorzuziehen.

Ergebnisse

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Bisher hat keine Schutzrechtsanmeldung stattgefunden. Es wurden vorbereitende Gespräche mit dem Patentanwalt Tobias Köhler geführt und ein Konzept für die Anmeldung eines Geschmacksmusters entwickelt. Darüber hinaus konnte bei einer umfassenden Patentrecherche festgestellt werden, dass im Moment keine Überschneidungen mit konkurrierenden auf schräggestellten Buchenholzdübeln basierenden Konstruktionskonzepten existieren. Die Einreichung der Idee bzw. die Anmeldung eines Schutzrechtsanspruchs wird derzeit noch vom Referenten für Forschungsangelegenheiten der HTWK geprüft und evaluiert.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Aus wirtschaftlicher Perspektive betrachtet sind die Ergebnisse des Projekts sehr vielversprechend. Da der Preis für Furnierschichtholz (am Beispiel des Herstellers MTSÄWOOD) in den vergangenen drei Jahren um 50% gesunken ist (und davon ausgegangen wird, dass sich diese Tendenz fortführt), steht die Bauweise nun mit dem geringfügig günstigeren Holzrahmenbau im Wettbewerb. Vom niedrigen Materialverbrauch abgesehen liegen die Vorteile des IDS auf Seite der Fertigung (automatisierte Herstellung mit Industrierobotern und Vermeidung von Wendevorgängen) bei der Planung (Unabhängigkeit von Standardmaßen). Es wurde bereits ein Netzwerk aus Industriepartnern geschlossen, welches das Ziel verfolgt die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt in ein Konzept für eine voll automatisierte Fertigungsstraße zu überführen.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die grundlegende Erkenntnis des Projektes besteht im Zusammenhang der Einbindequalität bzw. dem Grad der Klemmwirkung der Dübel in der Lochleibung der IDS-Schalen und der resultierenden Tragfähigkeit ganzer Wände. Wände für die Anwendung im mehrgeschossigen Holzbau (>2 Geschosse) lassen sich nur mithilfe einer spezialisierten, auf einen funktionierenden Presssitz der Dübel ausgelegten Fertigungsstraße umsetzen. Das prototypische Setup, welches im Forschungsprojekt entwickelt wurde, bietet die Grundlage für die nächste (marktreife) Entwicklungsstufe.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Aus wissenschaftlicher Sicht hat sich bereits während des Projekts die Notwendigkeit für weitere Untersuchungen und die Unterstützung anderer Forschungseinrichtungen ergeben. Insbesondere in Bezug auf die Verankerung der Dübel wären zusätzliche Versuchsserien anzufertigen, welche die Klemmwirkung beim Aufspreizen der Dübelfüße (im Sackloch) und am Dübelkopf bzw. alternative Verankerungsmechanismen eruiert.

Darüber hinaus ist ersichtlich geworden, dass es tiefgreifendere Untersuchungen zur lastaffinen bzw. zur positionsabhängigen Ausrichtung der Dübel bedarf. Herkömmliche FEM-Tools reichen hierzu nicht aus und erfordern so extreme Rechenzeiten, dass eine Echtzeitbearbeitung der Wand und Dübelpositionen beim Entwerfen räumlicher Strukturen noch nicht möglich ist. Gemeinsam mit dem Team des Laboraroy for Biosignal Processing (HTWK Leipzig) wurde ein Forschungsprojekt initiiert das sich dieser Herausforderung annimmt. Es trägt den Arbeitstitel TimberWallDesAlgn, und basiert ebenfalls auf dem Interlocking Dowel System.

Die vorgestellten Ergebnisse dienen als Grundlage zur Steigerung der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit des innovativen und ressourcenschonenden Wandaufbaus und ermöglichen vergleichende Betrachtungen zu alternativen Wandbauweisen wie Holzrahmen- und Massivbau. Das Potential der Bauweise wurde von allen Projektbeteiligten erkannt. Es wird derzeit geprüft in wie fern sich das IDS (oder eine abgewandelte Form davon) in der Produktpalette der kooperierenden Unternehmen aufnehmen oder in experimentelle Bauvorhaben integrieren lässt.

3. Erkenntnisse von Dritten

Das beteiligte Unternehmen BECK Fastening konnte mithilfe der Fertigungsversuche die Entwicklung ihres neuen Coil-Naglers (Typ F160) vorantreiben und dessen Funktionsweise validieren.

Das beteiligte Unternehmen Leitner Holzwaren hat anhand der Forschungsergebnisse eine mögliche Erweiterung ihres Maschinenparks und damit die Spezialisierung auf hochverarbeitete Buchendübel (mit Schlitzung, Faser oder achsialer Pilotbohrung) bewertet und erprobt.

Das beteiligte Unternehmen Pavatex hat Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten ihres Produktes ISOlair erweitern können.

Das beteiligte Unternehmen SFK Architekten konnte seine Erfahrungen mit der Planung mit Holzbauten und der digitalen Vorfertigung dieser erweitern.

Das beteiligte Unternehmen Pollmeier kann sich vorläufig nicht weiter an der Entwicklung beteiligen, da es in absehbarer Zukunft keine quer verleimten (gerichteten) Furnierschichthölzer herstellen wird. Der wechselnde Faser-Verlauf ist jedoch eine technische Voraussetzung für die Innovation.

4. Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden bei der internationalen Konferenz [IASS 2024](#) in Zürich (Titel: Robotic Joining of Oblique Dowels) in einem Fachvortrag sowie in Form eines Fachartikels und bei dem Fachkongress [EASTWOOD 2024](#) (Formschluss, Kraftschluss, Stoffschluss – Die Entwicklung des Interlocking Dowel System) als Keynote Lecture in Leipzig publiziert.

Darüber hinaus wurde ein Abstract bei der [World Conference on Timber Engineering](#) eingereicht. Darin wird der Anwendungsbereich des IDS genauer beleuchtet und anhand einzelner Umsetzungsbeispiele präsentiert.

Als praktisches Anwendungsbeispiel wurde im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Holztechnik Dresden ein IDS-Element in einen Demonstrator für Langzeitmessungen und Feuchtigkeitsmonitoring eingebaut. Dieser wird im September an der HTWK Leipzig ausgestellt.

In einem Videobeitrag des Mitteldeutschen Rundfunks (MDR) zum Thema [Umweltfreundlicher Hausbau – Was für den Rohstoff Holz spricht](#) wird ein Ausschnitt aus den Forschungsarbeiten im Projekt IDS.Machbarkeitsstudie gezeigt.

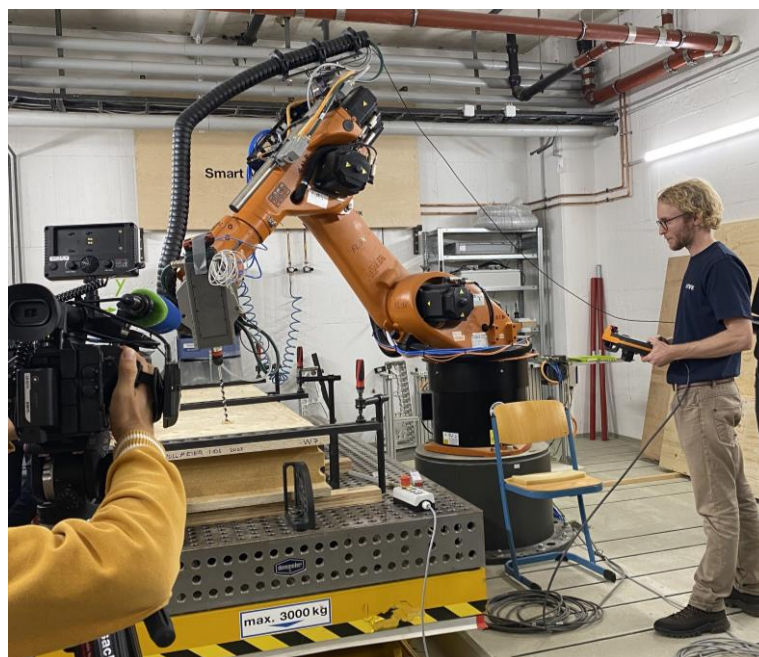


Abbildung 17: Dreharbeiten zum Videobeitrag "Umweltfreundlicher Hausbau" vom MDR, Foto: FLEX@HTWK-Leipzig, Luisa Sanders