

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema: **Verbundvorhaben: Digital basierte, integrale Planungsmethodik für Systemhallendächer aus Holz mit Fokussierung auf automatisierte Fertigungs- und Vormontageprozesse (Akronym: *TimberPlanPlus*)**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig**

**Teilvorhaben 2: Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)**

**Teilvorhaben 3: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
- Institut für Baukonstruktion und Holzbau**

**Teilvorhaben 4: Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management  
und Wissensökonomie**

**Teilvorhaben 5: Abbundzentrum Leipzig GmbH (bis Ende März 2021)**

**Teilvorhaben 6: STRAB Ingenieurholzbau Hermsdorf GmbH**

Unteraufträge: **Teilvorhaben 1: 2219NR168 Bau-Werk-Architekt (BWA)**

**Teilvorhaben 1: 2219NR168 holz[bau]physik (hbp)**

**Teilvorhaben 1: 2219NR168 STEIN.Ing (STEIN)**

**Teilvorhaben 1: 2219NR168 Ingenieurbüro Janke (IBJ)**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 1: 2220HV003A**

**Teilvorhaben 2: 2220HV003B**

**Teilvorhaben 3: 2220HV003C**

**Teilvorhaben 4: 2220HV003D**

**Teilvorhaben 5: 2220HV003E (bis Ende März 2021)**

**Teilvorhaben 6: 2220HV003F**

Laufzeit: **01.05.2020 bis 31.08.2023**

Monat der Erstellung: **01/2024**

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

<b>I.</b>	<b>Kurzbericht</b> .....	<b>1</b>
1.	Aufgabenstellung .....	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	1
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	2
a)	Arbeitspakete und Meilensteine .....	2
b)	Zusammenfassung .....	3
<b>II.</b>	<b>Ausführliche Darstellung der Ergebnisse</b> .....	<b>4</b>
1.	Erzielte Ergebnisse .....	4
	Arbeitspaket 1: Projektbegleitende Maßnahmen .....	4
	Arbeitspaket 2: Entwicklung eines BIM-basierten Gesamtmodells für landwirtschaftliche Gebäude mit ressourceneffizientem Dachtragwerk .....	6
	Arbeitspaket 3: Entwurf einer Planungsmethodik für ein in flexibel adaptierbares, ressourceneffizientes Bausystem aus Holz .....	9
	Arbeitspaket 4: Konstruktive Leitdetails .....	12
	Befestigung des Auflagerbalkens am Betonfundament.....	19
	Rautenfenster.....	19
	Klammerverbindung.....	21
	Schnittstelle zum Flächen-Stabwerksmodell der HTW Dresden .....	22
	Arbeitspaket 5: Erarbeitung eines Parameter gesteuerten, statischen Bemessungskonzeptes .....	25
	Arbeitspaket 6: Entwicklung eines ganzheitlichen nutzungsbedingten Brandschutzkonzeptes inklusive zugehöriger anlagentechnischer und organisatorischer Maßnahmen.....	28
	Arbeitspaket 7: Konzipierung eines flexiblen Interaktionsmodells für regional tätige KMU in Vorfertigung, Vormontage und Montage auf Basis digitaler Planungsdaten .....	33
	Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik an einem Demonstrationsobjekt und Darstellung der Einzelergebnisse am Gesamtmodell .....	34
2.	Verwertung.....	44
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	44
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	44
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	44
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	44
3.	Erkenntnisse von Dritten .....	45
4.	Veröffentlichungen .....	45
<b>ANHANG</b> .....	<b>47</b>	
	Teilvorhaben 1: Entwicklung digital basierter Planungsprozesse für Holzkonstruktionen .....	47
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	47
2.	Bearbeitete Arbeitspakete.....	47
	Arbeitspaket AP1 Projektbegleitende Maßnahmen .....	47
	Arbeitspaket AP2: AP2.3 Digitales Gesamtmodell .....	47
	Unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen von landwirtschaftlich geprägten Gebäuden wurde ein digital basiertes Gesamtmodell entwickelt. Die Entwicklung eines digital basierten Gesamtmodells auf Basis der in den vorgelagerten Arbeitspaketen untersuchten Varianten.....	47
	Arbeitspaket AP3 Planungsmethodik .....	47
	Arbeitspaket AP8 Evaluation .....	48

3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	48
	Teilvorhaben 2: Entwicklung des parametergesteuerten statischen Bemessungskonzepts .....	49
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	49
2.	Bearbeitete Arbeitspakete .....	49
	Arbeitspaket 2: Entwicklung eines BIM-basierten Gesamtmodells für landwirtschaftliche Gebäude mit ressourceneffizientem Dachtragwerk .....	49
	Arbeitspaket 3: Entwurf einer Planungsmethodik für ein in flexibel adaptierbares, ressourceneffizientes Bausystem aus Holz .....	49
	Arbeitspaket 5: Erarbeitung eines Parameter gesteuerten, statischen Bemessungskonzeptes .....	49
	Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik an einem Demonstrationsobjekt und Darstellung der Einzelergebnisse am Gesamtmodell .....	49
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	49
	Teilvorhaben 3: Leitdetails – Konstruktion und Bauphysik .....	55
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	55
2.	Bearbeitete Arbeitspakete .....	55
	Arbeitspaket 1: Projektbegleitende Maßnahmen .....	55
	Arbeitspaket 4: Konstruktive Leitdetails .....	55
	Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik am Demonstrationsobjekt .....	55
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	56
	Zu Arbeitspaket 1: Projektbegleitende Maßnahmen .....	56
	Zu Arbeitspaket 4: Konstruktive Leitdetails .....	56
	Zu Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik am Demonstrationsobjekt .....	56
	Teilvorhaben 4: .....	57
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	57
2.	Bearbeitete Arbeitspakete .....	57
	Arbeitspaket 7: Konzipierung eines flexiblen Interaktionsmodells für regional tätige KMU in Vorfertigung, Vormontage und Montage auf Basis digitaler Planungsdaten .....	57
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	62
	Teilvorhaben 5: (ABZ; aus dem Projekt vorzeitig ausgeschieden) .....	63
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	63
2.	Bearbeitete Arbeitspakete .....	63
	Teilvorhaben 6: .....	63
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	63
2.	Bearbeitete Arbeitspakete .....	63
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	63

## I. Kurzbericht

### 1. Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Projekts ist die Entwicklung einer digital basierten Planungsmethodik für landwirtschaftliche Gebäude, die alle erforderlichen Fachplanungen integriert und informationsverlustfrei verknüpft sowie explizit auf voll- oder teilautomatisierte, NC-gesteuerte Fertigungs- und Vormontageprozesse in regional agierenden KMU des Holzbaus ausgerichtet ist.

Konkret angesprochen wird der Bau von materialeffizienten und robusten Sytemdachkonstruktionen nach dem ReFlexRoof-System für landwirtschaftlich genutzte Hallen auf der Basis einer gezielten Integration und Weiterentwicklung der flächendeckend gegebenen Bearbeitungs- und Montagekompetenz durch das Zimmerer- und Dachdeckerhandwerk sowie der primären Nutzung von Holz als Baustoff in regionaler Produktion.

Mit dem Projekt werden folgende Ergebnisse avisiert:

- Konzept für eine alternative Organisation des Planungsprozesses, inkl. der Interaktion der Planungsbeteiligten
- Inhaltlicher und organisatorische Beschreibung der Leistungspakete der einzelnen Planungsbeteiligten, inkl. klarer Abgrenzungen und Definition von Schnittstellen
- Entwicklung eines integralen, parametrischen Bemessungskonzepts für Tragwerksplanung, Bauphysik und Brandschutz in Abhängigkeit der Gebäudekubatur, der Nutzung und des Standortes

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts beschreiben die grundlegenden Voraussetzungen für die Etablierung eines vermarktungsfähigen, integrierten Planungs-, Bau- und Vertriebssystems für materialsparende Dächer aus Holz für landwirtschaftliche Gebäude, in dem eine variable Gruppe zertifizierter Unternehmen (im Sinne einer Gütegemeinschaft) kooperativ zusammenarbeitet.

### 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Mit Projektantrag wurden acht Arbeitspakete (AP1 – AP8) und sechs Meilensteine (M1 – M6) inhaltlich und zeitlich festgelegt. Bei den Inhalten kam es zu keinen wesentlichen Veränderungen. Lediglich neue Erkenntnisse während des Bearbeitungszeitraums wurden inhaltlich und terminlich sinnvoll integriert.

Größere terminliche Verschiebungen gab es nur beim Thema Brandschutz (M3) und dem Demonstratorbau (M5). Der Meilenstein M3 (Brandschutz) wurde aufgrund der Pandemielage während des Bearbeitungszeitraums und damit einhergehender Materialengpässe nach hinten geschoben. Zudem waren zum geplanten Zeitpunkt neue Erkenntnisse aufgetreten, welche eine Verschiebung Richtung Projektende rechtfertigten. Der Bau des Großdemonstrator (M5) wurde zeitlich nach vorne verlagert, um schon recht früh im Gesamtprojekt erste Erkenntnisse im Maßstab 1:1 umsetzen zu können, welche in kleinmaßstäblichen Versuchsaufbauten so nicht umsetzbar waren (vgl. 3. *Resümee der wesentlichen Ergebnisse*).

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Projektbegleitende Maßnahmen	03/2020 bis 02/2023	Das Ziel wurde erreicht. Neben verschiedenen Fachmessen, wurde das Projekt durch verschiedene Veröffentlichungen einer breiten Fachwelt präsentiert. Es wurden während der Projektlaufzeit neun Veröffentlichungen publiziert. Darüber hinaus wurde das Projekt auch durch ein Filmteam begleitet.
AP 2 Digitales Gebäudemodell	03/2020 bis 11/2020	Die Ziele wurden in wesentlichen Teilen erreicht. Eine digitales Gesamtmodell wurde auf Basis der Erkenntnisse der einzelnen AP entwickelt und steht mit Projektende zur Verfügung. Einzelne Eingabeparameter gleichen sich automatisch ab und beeinflussen sich gegenseitig. Im Endergebnis können direkt Abbund-Daten an eine Abbundmaschine übergeben werden.
AP 3 Planungsmethodik	03/2020 bis 05/2022	Die Ziele wurden in wesentlichen Teilen erreicht. Auf Basis des entwickelten Gesamtmodells wurde die übergeordnete Planungsmethodik entwickelt und weitgehend in das digitalbasierte Modell integriert. Die Planungsmethodik umfasst neben dem digitalen Modell auch alle außerhalb der digitalen Ebene.
AP 4 Konstruktive Leitdetails	06/2020 bis 05/2022	Die Ziele wurden in wesentlichen Teilen erreicht. Leitdetails wurden entwickelt und dokumentiert. Es fehlte die digitale Übertragbarkeit in Form einer parametrischen Implementierung der Details in die digitale Planungsmethodik.
AP 5 Parametergesteuertes, statisches Bemessungskonzept	06/2020 bis 05/2022	Das Ziel wurde erreicht. Das parametergesteuerte statische Bemessungskonzept kann im Zusammenspiel mit der Geometriedefinition der HTWK Leipzig für die statische Modellierung, FE-Berechnung und Nachweisführung angewandt werden.
AP 6 Brandschutzkonzept	06/2020 bis 05/2022	Das Ziel wurde in wesentlichen Teilen erreicht. Im Rahmen der Brandversuche konnte das zuvor theoretisch berechnete Abbrandverhalten verifiziert werden. Eine Übersicht für mögliche Gebäudetypen und deren Brandschutzkriterien liegt vor. Die Ergebnisse wurden in das Gesamtmodell überspielt und können somit als Wert die weiteren Parameter der Konstruktion beeinflussen.
AP 7 Interaktionsmodell für regionale KMU	06/2020 bis 05/2022	Das Ziel wurde in wesentlichen Teilen erreicht. Identifikation relevanter Unternehmen und deren Kompetenzen auf Basis öffentlicher Daten; Durchführung einer Interviewstudie zum Thema Kooperationsmodelle, Entwicklung zweier alternativer digital basierter Kooperationsmodelle, Validierung und Reflektion der entwickelten digital basierten Kooperationsmodelle; Konzipierung und Planung der Netzwerkveranstaltung; Analyse von Fachliteratur zur Plattformökonomie und Plattformentwicklung.
AP 8 Evaluierung der Planungsmethodik am Demonstrationsobjekt	12/2021 bis 02/2023	Das Ziel wurde in wesentlichen Teilen erreicht. Im Rahmen der Planung des Demonstrators konnte das Bemessungskonzept angewandt und evaluiert werden. Es erfolgten jedoch keine Belastungsversuche am Demonstrator, zum Vergleich mit vorangegangenen Untersuchungsergebnissen.  Die Evaluierung zeigte zudem, dass die Elementierung des ReFlexRoof mit Vorverformungen aus der Fertigung in Teilen nicht ganz trivial zu montieren ist. Details aus AP4 wurden angewendet und am Demonstrator getestet.

<b>Meilensteine (M)</b> <b>(lt. Planung im Antrag)</b>	<b>Fälligkeit</b> <b>(lt. Balkenplan im Antrag)</b>	<b>Zielerreichung</b>
M 1 Systematische Zusammenstellung aller planerisch relevanten Parameter ist abgeschlossen	11/2020	Der Meilenstein 1 wurde innerhalb des Zeitplanes vollumfänglich abgeschlossen. Die zusammengetragenen Parameter ließen sich schon früh im Projekt definieren. Durch neue Erkenntnisse während des Projektes wurden diese Parameter, dort wo nötig, angepasst oder ergänzt.
M 2 Planungsmethodik ist vollumfänglich definiert	08/2021	Der Meilenstein 2 wurde vollumfänglich erfüllt. Die ausdefinierte Planungsmethodik lag im angestrebten Zeithorizont vor.
M 3 Parametrisches-statisches Bemessungsmodell liegt vor, Brandversuche und bauphysikalische Messungen sind abgeschlossen	11/2021	Der Meilenstein 3 wurde in wesentlichen Teilen erreicht. Aufgrund neuer Erkenntnisse während des Projektes und aufgrund der Corona-Pandemie wurden die Brandversuche jedoch Richtung Projektende geschoben. Auch gibt es – teils aufgrund neuer Erkenntnisse – weitere Optimierungsmöglichkeiten bei Statik, Details und Brandschutz.
M 4 Digitales Gesamtmodell des Planungsprozesses liegt vor	02/2022	Der Meilenstein 4 wurde erfüllt. Aufgrund neuer Erkenntnisse während des Projektes könnten einzelne Parameter nachjustiert bzw. weitergedacht werden.
M 5 Demonstrationsobjekt im Maßstab 1:1 ist gebaut und steht für Versuche zur Verfügung	05/2022	Der Meilenstein 5 wurde vollumfänglich erfüllt. Dies sogar deutlich früher, als zuvor geplant. Grund hierfür war, dass Untersuchungen im Maßstab 1:1 nötig waren, die in kleinteiligen Versuchen so nicht umsetzbar gewesen wären.
M 6 Auswertung und dokumentierende Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	02/2023	Der Meilenstein 6 wurde vollumfänglich erfüllt. Während des Gesamtprojektes gab es jedoch eine pandemiebedingte Zeitanpassung (Laufzeitverlängerung), welche auch die Auswertung der Versuchsergebnisse betraf.

## **b) Zusammenfassung**

Zusammenfassend wurden im Projekt *TimberPlanPlus* sowohl die inhaltlich definierten Ziele, als auch die angestrebten Meilensteine in wesentlichen Teilen erfüllt, bzw. erreicht. Einzelne offene Fragen beruhen auf neuen Erkenntnissen während des Gesamtprojektes und gehen aber an vielen Stellen über das eigentliche Projektziel hinaus. Diese neuen Erkenntnisse führten in einigen Bereichen auch zu zeitlichen Verschiebungen, welche aber keinen Einfluss auf das Gesamtziel, oder den Gesamtzeitplan hatten. Größere zeitliche Verschiebungen (inkl. Laufzeitverlängerung) waren vor allem auf die Pandemielage in Zeiten von Covid zurückzuführen.

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### Arbeitspaket 1: Projektbegleitende Maßnahmen

Zu Beginn des Projektes wurde der Kooperationsvertrag ausgearbeitet, den Projektbeteiligten überreicht und eine Kopie der gegengezeichneten Version archiviert. Ein Kick-Off Meeting mit allen Beteiligten fand am 10.06.2020 in den Räumlichkeiten der Architekturfakultät an der HTWK Leipzig statt.

Nach dem offiziellen Kick-Off-Treffen am 10.6.2020 fand ein erstes Koordinationstreffen am 24.09.2020, in den Räumlichkeiten der HTW Dresden statt. Der Fortschritt des Vorhabens wurde fortlaufend dokumentiert. Ein von der HTWK verfasster Fachartikel, welcher in der Ausgabe 05/20 der Fachzeitschrift *Bauen mit Holz* veröffentlicht wurde, fasste zu diesem Zeitpunkt bereits erste Erkenntnisse und Ziele des Vorhabens zusammen und kommunizierte diese in die Fachwelt.

In mehreren Videobeiträgen der Produktionsfirma *newsdoc3* wurde das Forschungsvorhaben medial festgehalten. Die Beiträge wurden über die entsprechenden Websites der HTWK Leipzig, der TU-Braunschweig und des Fraunhofer IMW publiziert. Ebenso wurden die Filme auf verschiedenen Messen (z.B. Denkmal 2022, SPIN 2030, EASTWOOD Leipzig 2022 und 2023) auf Messeständen der Projektpartner gezeigt.



Abbildung 1: Großdemonstrator einer Halle nach dem Prinzip ReFlexRoof (TimberPlan+) auf dem Gelände der MFPA Leipzig, Grafik: MFPA Leipzig, Mike Kolbig

Das zweite Koordinationstreffen konnte aufgrund der damals allgegenwärtigen Corona Pandemie nur digital abgehalten werden und fand am 30.03.2021 statt.

Ein drittes Koordinationstreffen fand am 01.10.2021 in den Räumlichkeiten der TU-Braunschweig statt.

Das vierte Koordinationstreffen fand am 05.04.2022 in Prenzlau bei BWA (Bau-Werk-Architekt) statt.

Ein fünftes Koordinationstreffen fand am 28. September 2022 an der HTWK in Leipzig statt, gefolgt von einem gemeinsamen digitalen kleinen Koordinationstreffen am 20. Dezember 2022.

Das Fraunhofer IMW führte zudem am 24. Mai 2023 eine Netzwerkveranstaltung auf dem Gelände der MFPA Leipzig (Standort Großdemonstrator) durch, welche im Rahmen des AP 7 abgehalten wurde.

Darüber hinaus fanden regelmäßig kleinere (digitale) Treffen innerhalb der AP bzw. AP-übergreifend statt.

Im Rahmen der Denkmal-Messe Ende November 2022 in Leipzig bestand die Gelegenheit, zwei weitere Segmente nach dem *TimberPlan+* System zu fertigen und einem breiten (Fach-) Publikum vorzuzeigen. Dabei konnte erneut die Passgenauigkeit in der Fertigung der Segmente überprüft werden und weiterführende Details wie z.B. ein zweigeteilter Fußpunkt der Großelemente umgesetzt und untersucht werden (vgl. AP8).



Abbildung 2: Segmentschalen nach dem Prinzip ReFlexRoof (TimberPlan+) auf der Denkmal-Messe 2022 in Leipzig, Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Marius Zwigart, M.A. | Architekt

## **Arbeitspaket 2: Entwicklung eines BIM-basierten Gesamtmodells für landwirtschaftliche Gebäude mit ressourceneffizientem Dachtragwerk**

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 erfolgte eine Recherche und eine einhergehende Analyse typischer Tragkonstruktionen landwirtschaftlich genutzter Hallen. Hierfür wurden bestehende und üblich zur Anwendung kommende Dachformen in der Landwirtschaft untersucht.

Die gebräuchlichsten historischen Dachformen (und ihre entsprechenden Tragwerke) sind:

- Pultdach - gerade, geknickte (Mansarddach\*) und gekrümmte Dachfläche...
- Satteldach - gerade, geknickte (Mansarddach\*) und gekrümmte (Spitztonnendach) Dachfläche...
- Walmdach - Mansarddach, gekrümmte Dachfläche, Zeldach, Kegeldach...
- Tonnendach

2.) Satteldächer:

- Sparrendach, Kehlbalkendach, Pfettendach...

3.) Satteldächer ohne unterstützte Balkenlage

- Hängewerke
- Sprengwerke
- Fischbauchträger

4.) Satteldach aus Brettbindern

5.) Rundbögen:

- Gitterbögen als runde Sparren nach Hetzer und Stephan, ca. 1900 (siehe Böhm, S. 393)
- gebogene Brettschichtholzträger

6.) Holzstabtragwerke:

- a. Bogenbohlendächer
- b. Fachwerkträger
- c. Vollwandträger, unverleimte und verleimte
- d. Zollinger Lamellendächer
- e. Lattengitterschalen
- f. Nagelplattenbinder (Beispiel siehe Punkt 4.)
- g. gewundenes Gittertragwerk (z.B. von Blumer Lehmann, Gossau Schweiz)

Dabei wurden verschiedene Landwirtschaftsbetriebe mittels eines Fragebogens überprüft und die Ergebnisse daraus in Tabellen- und Textform zusammengestellt.

Ebenso wurden historische Zollinger-Bauten in Bezug auf landwirtschaftliche Gebäude recherchiert, in einem Kurzbericht zusammengefasst und daraus Ableitungen für das neu entwickelte System getroffen. Fragen zur Vorfertigung wurden erörtert.

Bei der Befragung handelt es sich um eine kleine regionale Auswahl, wobei auf unterschiedliche Nutzungsschwerpunkte geachtet wurde. Tendenziell zeichnet sich im Durchschnitt ab, dass sich die Landwirte auf preisgünstige und zuverlässige Hallensysteme konzentrieren. Dem Baustoff Holz stehen grundsätzlich alle offen gegenüber, obwohl nicht alle diesen Baustoff aktuell verwenden.

Neben dem Hauptaspekt, Nachhaltigkeit auch nach außen zu zeigen (sichtbare Holzkonstruktion) gibt es bei einem Standort mindestens noch das Argument des Brandschutzes (Feuerwiderstand von Massivholz schneidet besser ab als bei Stahlkonstruktionen). Die Selbstbaufreundlichkeit ist bei einem geringen Anteil der Befragten Thema. Die Mehrheit setzt aber auf Fremdleistungen, wenn der Hallenbau preiswert und in einer kurzen Bauzeit erfolgt.

Der Neubau wird gegenüber dem Umbau bestehender Hallenbauten bevorzugt. Hierbei spielt sicher die Tatsache eine Rolle, dass noch ausreichend bebaubare Fläche einfach generiert werden kann. Bei kleineren Betrieben mit weniger Infrastruktur könnte auch der Umbau oder die Erweiterung bestehender Bausubstanz stärker im Fokus stehen.

Des Weiteren kann man mit der Nutzung des Bestandes der weiter voranschreitenden Flächenversiegelung entgegenwirken.

Ein neues Holzstabwerk-Hallensystem kann sich auf dem bestehenden Markt im landwirtschaftlichen Bauen am ehesten durchsetzen, wenn es gut durchdachte Lösungen gibt, die sich schnell umsetzen lassen.

Eine Vorkonfiguration und auch die einfache Montage durch vorgefertigte Teilsegmente kann zur Effizienz beitragen, weshalb wir uns im Forschungsprojekt verstärkt auf diesen Bereich konzentrierten.

Es erfolgte ein historischer Kurzbericht zu Zollinger-Bauten in der Landwirtschaft.

Auf Basis dieser Daten (Gemeint hier BWA; Anmerkung Marius) konnte zunächst anhand statischer Modelle der Holzbedarf der einzelnen Tragsysteme ermittelt werden. Im Vergleich standen folgende Tragsysteme gegenüber: Vollwandbinder, Fachwerkbinder, Polonceau-Träger und Zollingerkonstruktionen.

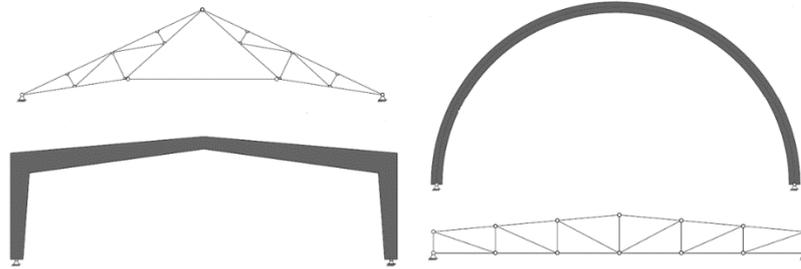


Abbildung 3: Ableitung verschiedener Tragsysteme, Grafik: HTWD

Auf Basis dieser Analyse konnte die Ressourceneffizienz von Zollingerkonstruktionen gegenüber anderer typischer Hallentragssysteme verdeutlicht werden, wie in Abbildung 4 zu erkennen. Auf Grundlage dieser ist festzustellen, dass die Zollingerkonstruktion ein Einsparpotential von bis zu 55 % aufweist.

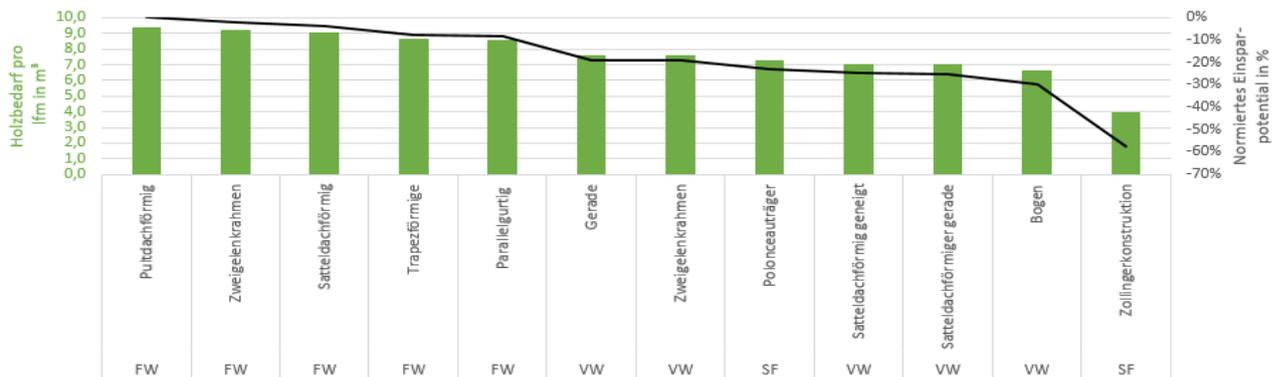


Abbildung 4: Vergleich des Holzbedarfs typischer Hallentragssysteme, Grafik: HTWD

Für die Herausarbeitung eines ressourceneffizienten Dachtragwerks galt es folgend die statisch relevanten Detailpunkte zu identifizieren. Abhängig von verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzungsansprüchen wurden entsprechende Konstruktionslösungen und deren Tragverhalten untersucht. Wie in Abbildung 5 dargestellt, erfolgte dafür eine Analyse räumlicher Statikmodelle unter Beachtung von Stützen, Zugbändern sowie nutzungsbedingten Öffnungen.

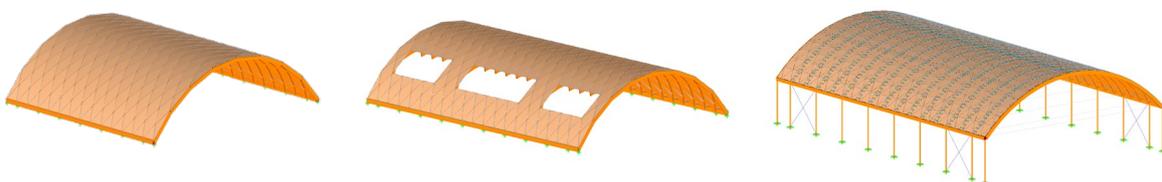


Abbildung 5: räumliche Modellvarianten abhängig von Nutzungsansprüchen, Grafik: HTWD

Alle Modellvarianten haben die wichtigen Verbindungspunkte des Lamellenanschlussknotens (Druckknoten als Stirnversatz) sowie der Verbindung Lamelle-Beplankung (Klammerverbindung) gemeinsam. Der Lamellenanschlussknoten folgt dabei dem Konstruktionsprinzip des Mikroversatzknotens der HTWK. Je nach Ausführung variieren jedoch die Anschlussdetails, beispielsweise im Auflagerbalken bei der Wahl von Stützen oder Zugbändern, oder in der Beplankung je nach Wahl der Öffnungsgröße und -anordnung.

Als Teil der Entwicklung des digitalen Gesamtmodells wurde mit Hilfe der Software Grasshopper (Rhinceros) ein parametergesteuertes Konzept zur statischen Modellierung und Berechnung erstellt, welches im Rahmen des AP 5 näher dargestellt wird. Aus den Vorbetrachtungen des Tragverhaltens können maßgebende

Konstruktionsmerkmale herausgearbeitet werden, welche anschließend in die Entwicklung des digitalen Gesamtmodells eingebunden werden.

Das digitalbasierte Gesamtmodell wurde mit der grafikbasierten Modellierungssoftware Grasshopper und der NURBSbasierten Modellumgebung von Rhinoceros 7 erstellt (Abbildung 6). Die Parameter der einzelnen Lamellen der Konstruktion können abhängig ihrer statischen Belastung geometrisch optimiert werden. In der praktischen Umsetzung bedeutet das, dass die Firstlamellen aufgrund der geringeren notwendigen Lastabtragung kleiner und die Lamellen am Fußpunkt größer dimensioniert werden können. Damit wird der Rohstoffverbrauch der Konstruktion verringert und gleichsam die Materialeffizienz erhöht. Da die Materialkosten ein Drittel der Gesamtkosten ausmachen, liegt in diesen Teilkosten auch ein enormes Potenzial zur Senkung der Gesamtkosten. Des Weiteren bietet der digitale, parametrische Planungsprozess auch an dieser Stelle die Möglichkeit flexibel und in Echtzeit auf Geometrieänderungen zu reagieren, ohne dadurch die Wirtschaftlichkeit der Konstruktion zu gefährden. Details und Rahmenkonstruktion können nun (entgegen der Funktionsweise konventioneller Planungsmodelle) gemeinsam betrachtet und entwickelt werden.

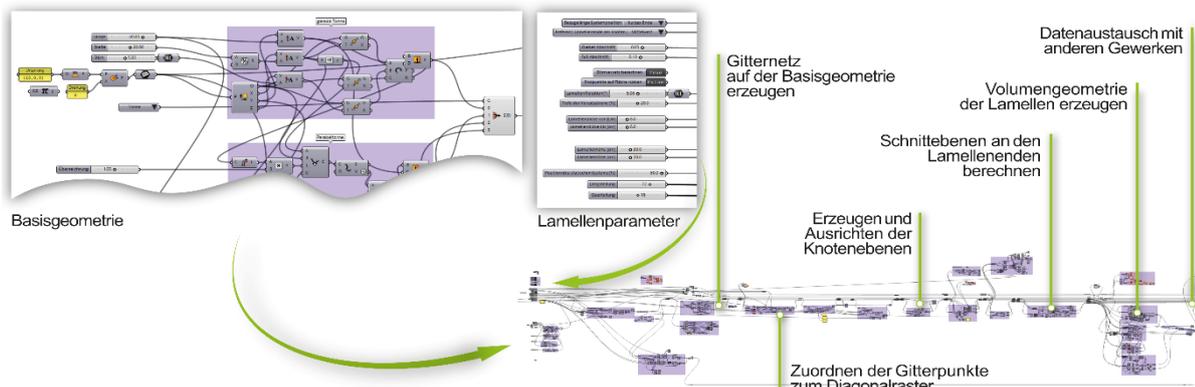


Abbildung 6: Erzeugung der Geometrie mittels der Parametrik-Software „Grasshopper“, Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, HL

Das digitale Gesamtmodell auf der Basis der Erkenntnisse der Recherche weiter optimiert. Die einzelnen parametrischen Bausteine wurden mit Informationen aus neuen Untersuchungsergebnissen ergänzt. Die Informationen aus den Arbeitspaketen AP6 und AP7 wurden direkt in die Gesamtparametrik zurückgespielt.

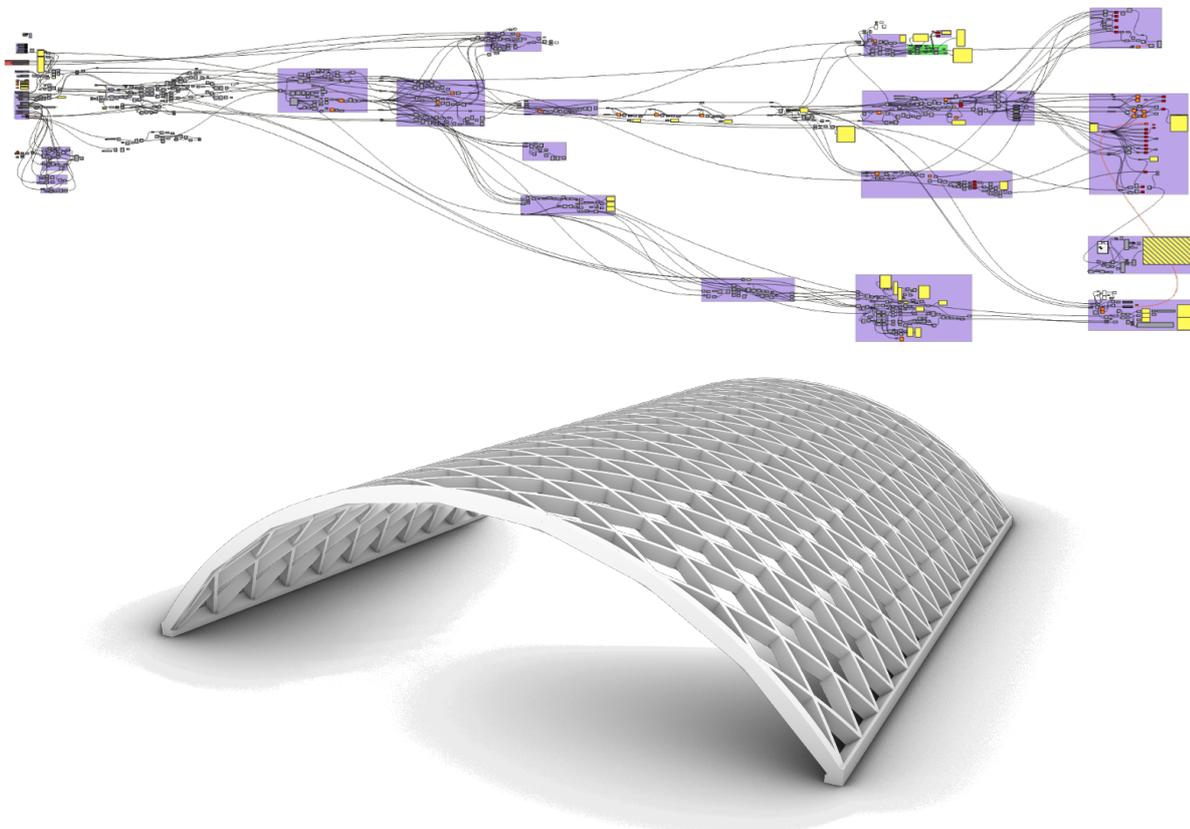


Abbildung 7: Erzeugung der TimberPlan+ Geometrie mittels der Parametrik-Software „Grasshopper“, Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Lösche, M.A.

### Arbeitspaket 3: Entwurf einer Planungsmethodik für ein in flexibel adaptierbares, ressourceneffizientes Bausystem aus Holz

Auf der Basis des im Arbeitspalet AP2 entwickelten Gesamtmodells wurde die übergeordnete Planungsmethodik entwickelt und weitgehend in das digitalbasierte Modell integriert. Die Planungsmethodik umfasst neben dem digitalen Modell auch alle außerhalb der digitalen Ebene.

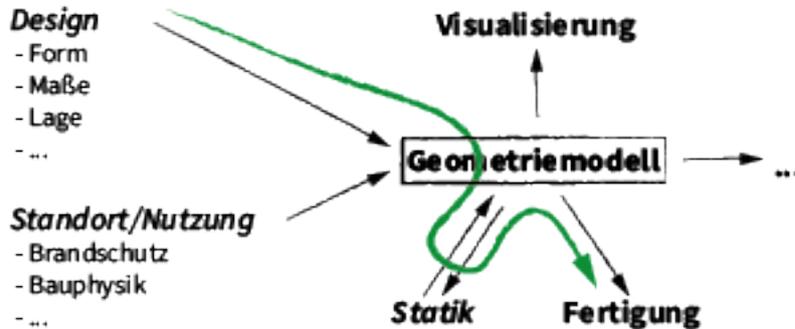


Abbildung 8: Übersicht der Planungsmethodik

Im Projektverlauf konnten nur Teile der Planung automatisiert werden. Wesentliche Hürde hierbei war die iterative Annäherung der verschiedenen Ableitungen, sowie die Grenzen der automatisierten Datenübergabe. Soweit sinnvoll möglich wurden für die Realisierung des Demonstrators einzelne Arbeitsschritte teilmanuell nachvollzogen.

Zentrales Element der Methodik ist die Abbildung der Geometrie in einem digitalen Modell. In der Entwicklung der Methodik stellte sich heraus, dass wesentliche Einflussbereiche die Designentscheidungen des Architekten, sowie die statischen Anforderungen an die Tragfähigkeit sind. Standort und Nutzung des Gebäudes haben einen konstanten Einfluss auf die Gestalt des Gebäudes. Die Designentscheidungen wirken sich dagegen unmittelbar auf das Tragwerk aus, die Analyse der Tragfähigkeit wirkt auf das Modell zurück.

Für eine konsistente Planungsmethodik gilt es, alle erforderlichen Parameter zu definieren. Zudem sollte festgelegt werden, wie der Informationsfluss zwischen den einzelnen Projektbeteiligten funktioniert. Dabei müssen alle statischen Annahmen und Berechnungen auf Basis der geometrischen, nutzungsbedingten, brandschutztechnischen und fertigungsrelevanten Bedingungen erfolgen. Umgekehrt beeinflussen gleichermaßen die Ergebnisse und Mindestanforderungen aus statischen Berechnungen wiederum die anderen Leistungspakete.

Um die Abhängigkeiten und gegenseitig bedingten Parameter klar zu definieren, wurde ein durch die HTW Dresden ein Workflow für die Integration der statischen Nachweise entwickelt, siehe Abbildung 9. Dieser zeigt die Prozessabfolge beginnend mit der parametrischen Geometriedefinition der HTWK Leipzig, gefolgt von der Darstellung der Übergabeparameter zwischen einzelnen Projektbeteiligten und anschließend die Teilschritte zur Erstellung eines digitalen Struktur- und Berechnungsmodells.

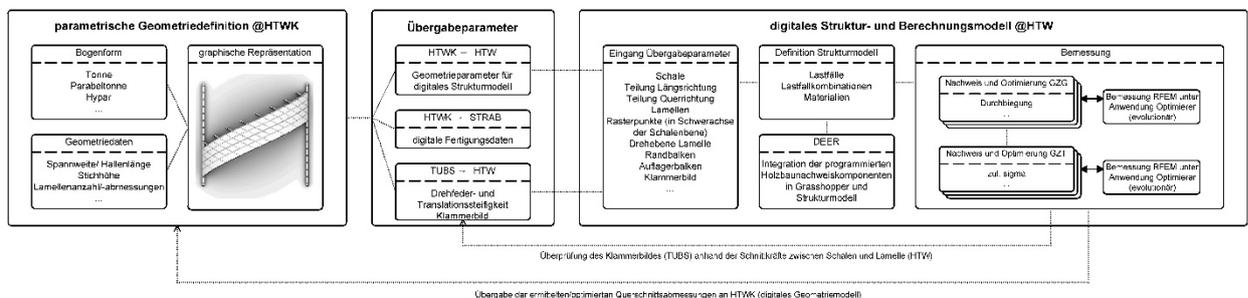


Abbildung 9: Workflow – Statik im digitalisierten Gesamtmodell, Grafik: HTWD

Inhalt des Leistungspakets Statik war es folgend, die Informationen aus den Leistungspaketen der TU Braunschweig, HTWK Leipzig oder der Firma STRAB mit den statisch relevanten Parametern zu verknüpfen und entsprechend das Struktur- und Berechnungsmodell abzuleiten. Zunächst wird dafür das Statikmodell auf Grundlage des Geometriemodells der HTWK Leipzig unter Übernahme aller notwendigen Informationen erstellt. Dabei werden die Außengeometrie, Querschnittsmaße, sowie speziell bei der Zollingerkonstruktion Quer- und Längsteilung der Lamellenreihen, übernommen.

Des Weiteren fließen die zumeist von Auftraggebenden abhängigen Standortinformationen und Nutzungsansprüche in die statische Modellierung ein. Die Standortinformation haben dabei insbesondere Einfluss auf die anzusetzenden Wind- und Schneelasten im Berechnungsmodell. Gleichmaßen sind entsprechend der Nutzungsanforderungen beispielsweise Öffnungen oder Tordurchfahrten im Strukturmodell mit zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Fertigungsanforderungen sind ebenso eventuelle Mindestgenauigkeiten oder Maximalmaße der Bauteilsegmente und daraus folgende Fugen zu beachten.

*Tabelle 1: Zusammenstellung und Zuordnung relevanter Parameter zu Leistungspaketen, HTWD*

AuftraggeberIn	Geometrie   Konstruktiv	Statik   Berechnung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standort</li> <li>• Dachaufbau</li> <li>• Außenmaße</li> <li>• Lagerung auf Boden, Stützen, Wänden</li> <li>• Nutzungsanforderungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Querschnittsanforderung</li> <li>• Material</li> <li>• Quer-/Längsteilung</li> <li>• Fertigungsmaße</li> <li>• Transportlänge</li> <li>• Beplankungsfugen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Querschnittsanforderung</li> <li>• Material</li> <li>• Quer-/Längsteilung</li> <li>• Verbindungsmittel</li> <li>• Steifigkeit der Verbindungen</li> <li>• Fugenanzahl/-anordnung</li> </ul>

In Tabelle 1 erfolgt eine Zusammenstellung der relevanten Parameter, sowie eine Zuordnung dieser zu den zuständigen Leistungspaketen. Dabei ist zu beachten, dass Parameter, wie beispielsweise die Querschnittsmaße, von mehreren Beteiligten abhängig sein können und entsprechend an den Schnittstellen ausgetauscht werden müssen.

Anhand der gegebenen Eingangsparameter und dem daraus resultierenden statischen Strukturmodell wird folgend beispielsweise der statisch erforderliche Mindestquerschnitt berechnet. Ergeben sich größere Werte als zuvor im Design angenommen, wird dieser zurückgespielt und in das "neue Geometriemodell" eingearbeitet.

Neben den Schnittstellen zu den auftragsabhängigen Informationen (Standort, Nutzung etc.) und dem Geometriemodell der HTWK wurde eine weitere Schnittstelle zur TU BS herausgearbeitet. Für die Anpassung der Holz-Verbindungsspezifischen Steifigkeitswerte werden Ergebnisse aus den Modellversuchen der TU BS in das Statikmodell eingearbeitet und gleichermaßen die resultierenden Schnittkräfte für konstruktive Anpassungen der Verbindungsdetails zurückgespielt.

Der entstandene Planungsablauf, sowie die erarbeiteten Schnittstellen zwischen den Leistungspaketen, wurden entsprechend in das digitale Gesamtmodell integriert. Der insgesamt entstehende Informationskreislauf kann so lange durchlaufen werden, dass die Mindestanforderungen aller Arbeitspakete erfüllt sind und gleichermaßen ein ressourceneffizientes Tragwerk entsteht.

Auf Grundlage der laufenden Projektergebnisse wurde das zuvor im Maßstab 1:10 gefertigte Modell in einen 1:1 Demonstrator überführt. Dabei konnten alle relevanten parametrischen Schnittstellen überprüft und ein Gesamtmodell digital erzeugt werden.

Das entwickelte diagonale Fügesystem konnte praxisnah erprobt werden (vgl. Abbildung 10). Dieses alternative Konzept erlaubt es theoretisch, die Kontrolle über die Fügerichtungen der einzelnen Segmente zu behalten und damit eine, technisch gesehen, reibungslose Montage zu ermöglichen. Bei der Montage des Großdemonstrators kam es jedoch vereinzelt zu verschiedenen Füge-Problemen. Diese traten sowohl zwischen verschiedenen Halbschalen, als auch am Fußpunkt auf. In einem weiteren Schritt wurde der Fußpunkt optimiert und die Fügung der Elemente untereinander verbessert.



*Abbildung 10: Fügung der Halbschalenelemente des Demonstrators auf der Baustelle,  
Grafik @ FLEX, Marius Zwigart, M.A. | Architekt*

Die bisherige Planungsmethodik wurde im Zusammenspiel mit allen Projektpartnern stetig aktualisiert und verbessert. Neue Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen flossen direkt in die bestehende Methodik mit ein.

In der Umsetzung des Demonstrators lag der Fokus auf einer durchgängigen Tonnenschale. Die dafür erforderliche vollständige Gitterstruktur wurde automatisch generiert und an das Statikmodul übergeben. Im Zuge des Arbeitspaketes AP4 erarbeitete Lösungen zur teilweisen Auflösung der Tragstruktur für Durchgänge und Anbauten wurde nicht implementiert. Die erforderliche Übergabe der Öffnungsgeometrie konnte aufgrund der gewählten Datenstruktur im Projektverlauf nicht realisiert werden und war für die Umsetzung des Demonstrators sowie der Prüfkörper nicht erforderlich.

Ebenso nicht im digitalen Modell implementiert ist die automatische Erzeugung von Strukturen und Details oberhalb der Holzebene. Die Detailsystematik für eine hinterlüftete Blecheindeckung sowie ein Rautenfenster wurde dennoch im manuellen Verfahren aus den Geometriedaten abgeleitet und am Demonstrator erprobt.

## Arbeitspaket 4: Konstruktive Leitdetails

Zu Beginn des Projektes fand eine Literaturrecherche zu nachstehend aufgelisteten Punkten in Bezug auf den landwirtschaftlichen Hallenbau (in verschiedenen Nutzungseinheiten) statt:

- › bauphysikalische Eigenschaften und Anforderungen von Holz
- › vergangene bauphysikalische Messungen an Holzbauten
- › konstruktive Details und Anschlüsse von bereits gebauten (Holzbau-)Objekten
- › notwendige Umgebungsbedingungen

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Literaturrecherche wurden zur Priorisierung von weiteren Messungen zusammengefasst und ausgewertet. Die Nutzungseinheiten (Tierhaltung, Lagerhaltung, Maschinen- und Gerätehallen) wurden konkretisiert. Ebenso wurde der weitere Bedarf an Messungen von landwirtschaftlichen Hallen, zu denen keine wissenschaftlich fundierte Literatur verfügbar ist, eingeschätzt.

Es wurden bauphysikalische Simulationen und infolgedessen Untersuchungen zur zeit- und tiefenabhängigen Holzfeuchteentwicklung bei instationären Umgebungsklimata im Labor des iBHolz in Zusammenarbeit mit hbp (Daniel Kehl) durchgeführt.

Auf Grundlage der durchgeführten Messungen an vier landwirtschaftlichen Gebäuden durch das Büro hbp, recherchierter Messergebnisse anderer Forschungsvorhaben und Angaben aus der Literatur, kann für viele Nutzungsarten von landwirtschaftlichen Gebäuden eine Einsortierung in eine Nutzungsklasse nach DIN EN 1995 (Statik) und eine Gebrauchsklasse nach DIN 68800-1 (Holzschutz) vorgenommen werden. Diese Daten dienen als Grundlage für das digitale Modell, um die statischen Berechnungen durchführen und Gefährdung durch holzerstörende Pilze und Insekten in Form von Gebrauchsklassen festlegen zu können.

In vier landwirtschaftlichen Gebäuden (Ökoschweinestall, Ökoferkelstall, Reithalle, Kartoffellagerhalle) wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Holzfeuchte- und Klima-Messungen durchgeführt (Abbildung 11) und anschließend die Ergebnisse aus verschiedenen Blickwinkeln analysiert. Beispielhaft sind die Messergebnisse und Analysen in den folgenden Abschnitten dargestellt.



Abbildung 11: Eindrücke der installierten Messtechnik in landwirtschaftlichen Gebäuden (v.l.n.r.: Installierte Messstellen im Schweinestall Echem, Messtechnikbox mit Funkmodul für die Datenübertragung, Installierte Messstellen und Messbox in der Reithalle), Fotos © holz[bau]physik

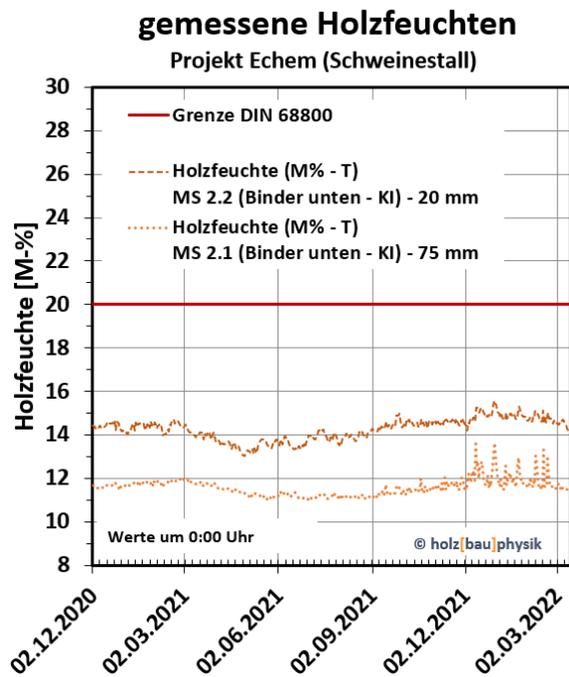


Abbildung 12: Gemessene Holzfeuchte in verschiedenen Tiefen des Holzes im Schweinestall Grafik: © holz[bau]physik, Daniel Kehl

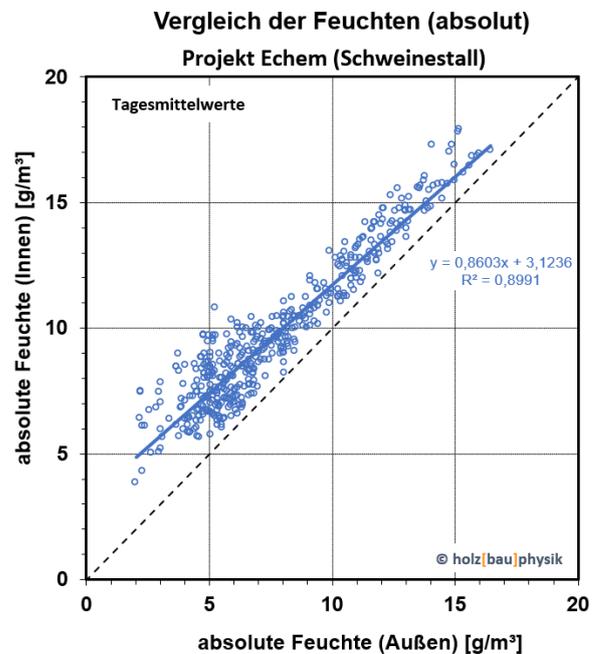


Abbildung 13: Vergleich der absoluten Luftfeuchte zwischen Innen- und Außenklima Grafik: © holz[bau]physik, Daniel Kehl

Die Holzfeuchten im Ökoschweinestall sind beispielsweise sowohl an der Oberfläche (Tiefe 20 mm) als auch im Inneren des Trägers (Tiefe 75 mm) trocken (Abbildung 12). Sie zeigen, dass die Hölzer in diesem Ökostalls für Mastschweine mindestens der Nutzungsklasse 2 nach DIN EN 1995 zugewiesen werden können. Auch die Gebrauchsklasse 1 nach DIN 68800-1 ist hier eindeutig zuordenbar. Das Holz ist nur auf Grund der Zugänglichkeit durch Insekten gefährdet, durch Pilze auch Grund des trockenen Holzes aber nicht. Damit ist das Holz des TimberPlan+ Daches der Gebrauchsklasse 1 (GK 1) zunächst zuzuordnen. Durch die Verwendung von technisch getrocknetem Holz oder resistenter Holzarten kann der Befallsdruck durch Insekten so stark dezimiert werden, dass keine Gefährdung durch Insekten mehr vorliegt. Damit fällt das Tragwerk in die Gebrauchsklasse 0.

Neben der obenstehenden Erkenntnis wurde das Innenraumklima der landwirtschaftlichen Gebäude analysiert. Dabei konnte ein guter physikalischer Zusammenhang zwischen Außen- und Stallklima festgestellt werden (Abbildung 13 – hier absolute Luftfeuchtigkeit). Dies ermöglicht es, das gemessene Stallklima über diesen Zusammenhang auf andere Standorte zu übertragen und so ein neues Stallklima für einen anderen Standort zu generieren. Um allerdings aus dem neuen Außenklima wieder auf die Holzfeuchte schließen zu können, ist es notwendig, dies mittels hygrothermischer Simulationen für den neuen Standort zu berechnen.

Dafür war es notwendig einen geeigneten Materialdatensatz für das Programm WuFi (Wärme und Feuchte instationär) des Fraunhofer Instituts für Bauphysik zu erstellen. Zunächst wurden alle vorhandenen Materialdatensätze systematisch analysiert und ein neuer Datensatz daraus generiert. Wie die folgenden Simulationen zeigen, konnte mit ihm sowohl bei trockenen (Abbildung 14) als auch höheren Holzfeuchten (Abbildung 15) eine zufriedenstellende Übereinstimmung gefunden werden. Die berechneten Holzfeuchten sollten dabei möglichst im Toleranzbereich und tendenziell etwas höher als die gemessenen Feuchten liegen, um später bei der Beurteilung auf der sicheren Seite zu liegen.

Mit den hygrothermischen Simulationen ist eine präzisere Bestimmung der Feuchten in Holzquerschnitten und eine bessere Eingruppierung in Nutzungs- und Gebrauchsklassen möglich.

## Holzfeuchteverlauf MS 3 Referenz

LBZ Echem - Öko-Stall für Mastschweine

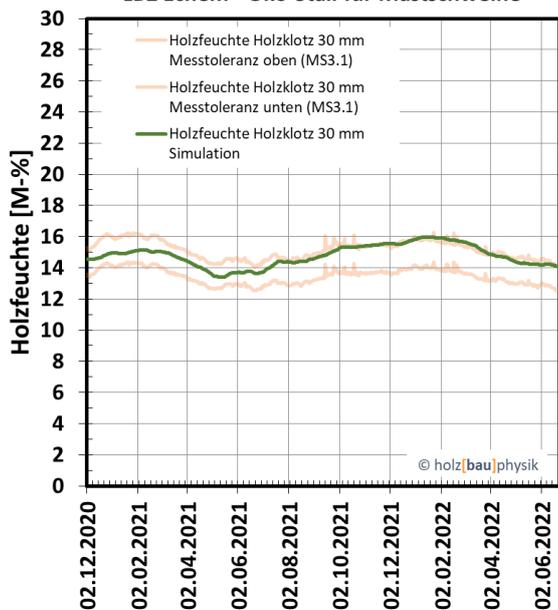


Abbildung 14: Vergleich der Holzfeuchte zwischen Simulation (grüne Linie) und Messung (Messtoleranz – blass-orange Linien) im Schweinestall Grafik: © holz[bau]physik, Daniel Kehl

## Holzfeuchteverlauf MS 3 Referenz

Projekt Luhmühlen

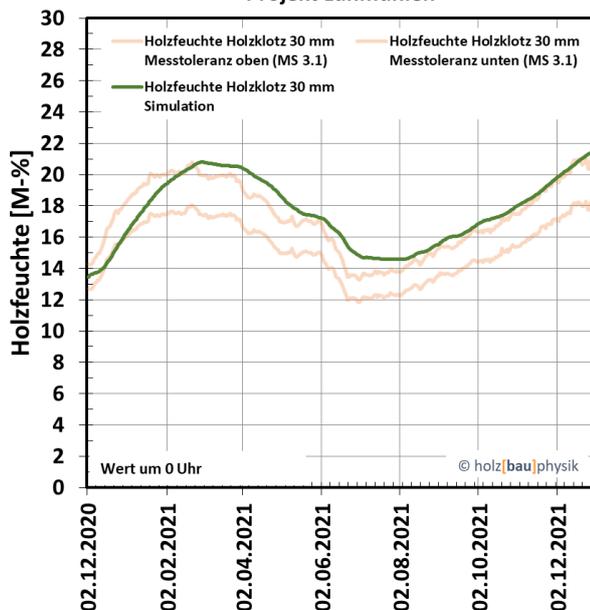


Abbildung 15: Vergleich der Holzfeuchte zwischen Simulation (grüne Linie) und Messung (Messtoleranz – blass-orange Linien) in der Reithalle Grafik: © holz[bau]physik, Daniel Kehl

Aus den Messungen bzw. Analysen der landwirtschaftlichen Gebäude und den Literaturrecherchen folgende Abschlusstabelle (Auszug Tabelle 2) entwickelt werden.

Tabelle 2: Übersicht über die zu erwartenden Holzfeuchten in landwirtschaftlichen Gebäuden und die Einteilung in eine Nutzungsklasse

Pos.	Art	Zu erwartende Holzfeuchte	NKL
<b>Lagergebäude (Obst, Gemüse, etc.)</b>			
1	Viele Obst- und Gemüsesorten <sup>1)</sup> (u.a. Äpfel, Birnen; Kartoffeln ...)	24 - > 30 M.-%	4
2	Zwiebeln	16 – 20 M.-%	2
<b>Tierhaltung<sup>2)</sup></b>			
1	Rinder / Kühe / Kälber	11 – 21 M.-% <sup>3)</sup>	2
2	Schweine	12 – 18 M.-% <sup>2)</sup>	2
3	Geflügel	10 – 19 M.-% <sup>2)</sup>	2
4	Reithalle	15 – 18 M.-%	2

<sup>1)</sup> Viele Obst- und Gemüsesorten müssen bei hohen rel. Luftfeuchten gelagert werden. Dies ist nicht zuträglich für Holz. Daher sollte in solchen Lagerhallen auf den Einsatz von Holz verzichtet werden. Wenn allerdings Obst- und Gemüsesorten unter Schutzatmosphäre (controlled atmosphere) in Containern gelagert werden, kann das umliegende Lager auch aus Holz bestehen.

<sup>2)</sup> Durch Reinigungsarbeiten (u.a. Geflügel, Schweine, Kühe) kann es im Bereich der Tiere zu höheren Holzfeuchten kommen, die aber nur kurz andauern.

<sup>3)</sup> Die Holzfeuchte überschreitet nur in wenigen Wochen die 21 M.-%.

Die Festlegungen und Definitionen von notwendigen Leitdetails und Priorisierung der konstruktiven Anforderungen sind abgeschlossen und in Form eines Katalogs zusammengestellt worden:

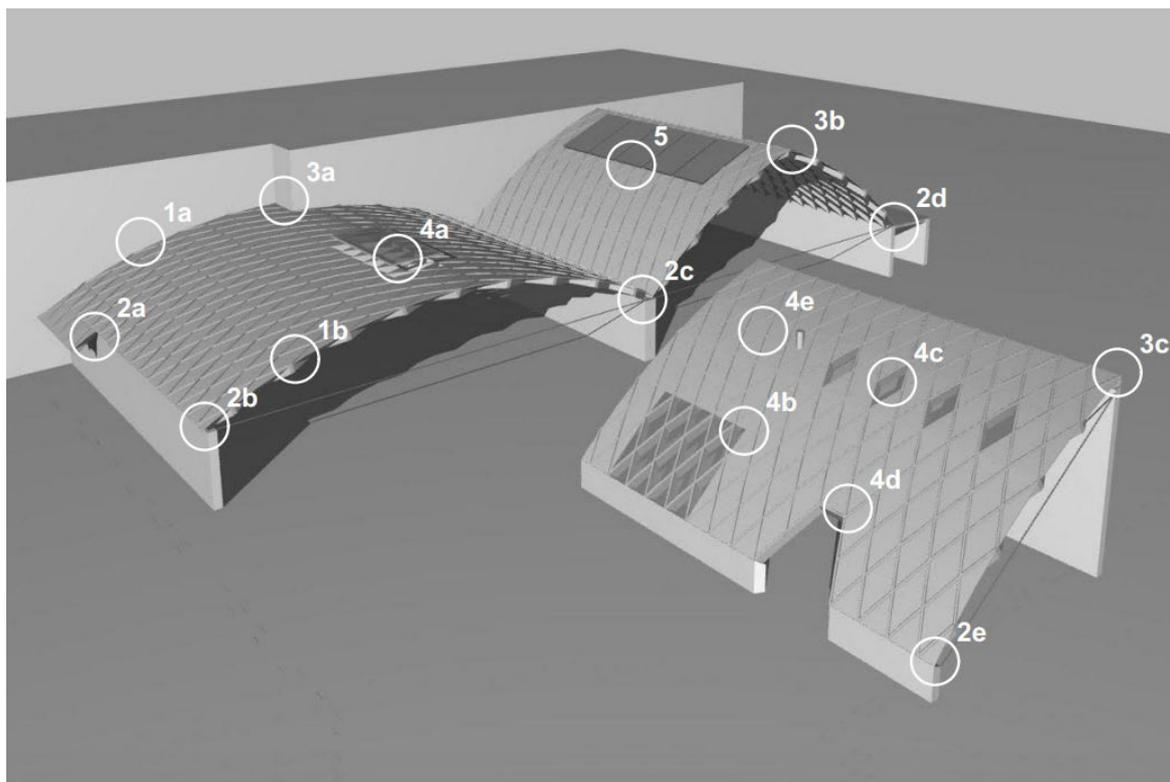


Abbildung 16: Gesamtparameterschema

#### AP 4.1: Definition notwendiger Leitdetails für Holzstabdachtragwerke:

- 1a Anschluss an Bestandswand
- 1b Ortgang
- 2a Traufe mit Überstand
- 2b Traufe mit Zugband
- 2c Kehle
- 2d Traufe mit Anbindung an Schleppdach oder Anbau
- 2e Traufe steil
- 3a Anschluss an Durchdringung bzw. Wand parallel zum First
- 3b First, Koppelung der vorgefertigten Segmente
- 3c First Pultdach
- 4a Lüftungs- und Belichtungsfirst
- 4b Rechteckige Fensteröffnung
- 4c Rautenförmige Fenster und Festverglasungen
- 4d Traufseitiger Einschnitt
- 5a Anschluss an technische Aufbauten innen
- 5b Anschluss an technische Aufbauten außen

#### AP 4.4: Entwicklung und Katalogisierung der Details und Anschlüsse unter Berücksichtigung der Disziplinen Bauphysik, Brandschutz und Statik

Es wurden Detailblätter im A3-Quer-Format mit einheitlichem Layout erstellt, angelegt an einen sich weiter vervollständigenden Katalog, welcher final als Gesamtkatalog für den Planer sowie den ausführenden Betrieb zur Umsetzung genutzt werden kann.



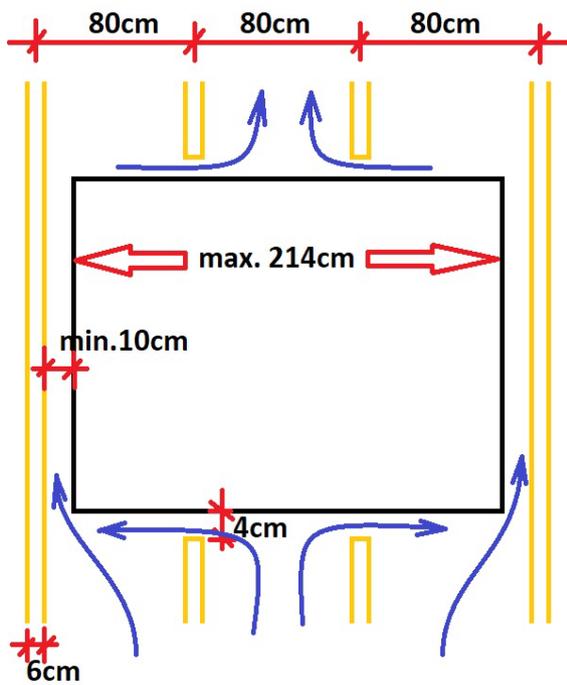


Abbildung 20: Hinterlüftungsschema

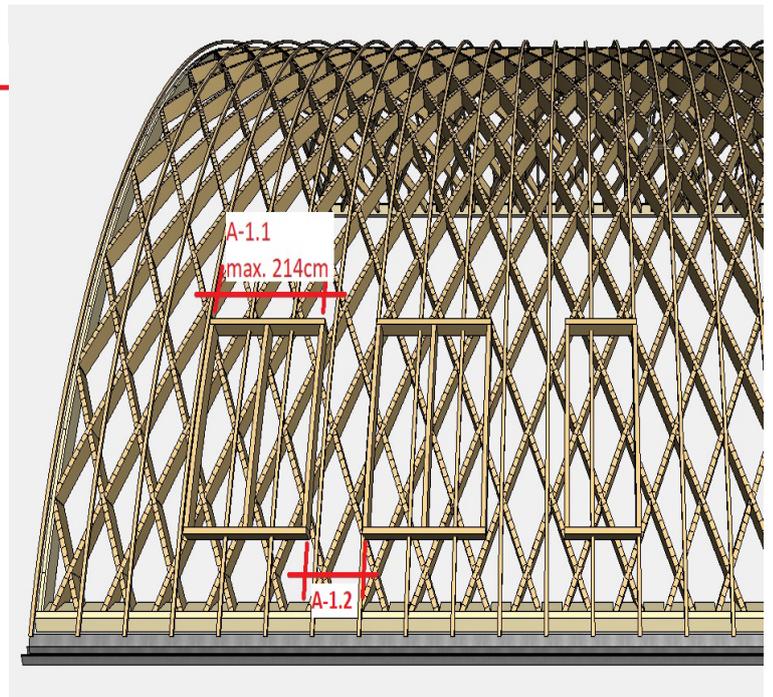


Abbildung 19: Adapterrahmen auf Tonnendach

Die Details wurden von einem CAD-basierten **3D-Gesamtmodell** abgeleitet, welches als Arbeitsmodell für alle Planungsbeteiligten auch im weiteren Prozess einer möglichen Umsetzung als Grundlage zur Anwendung kommt.

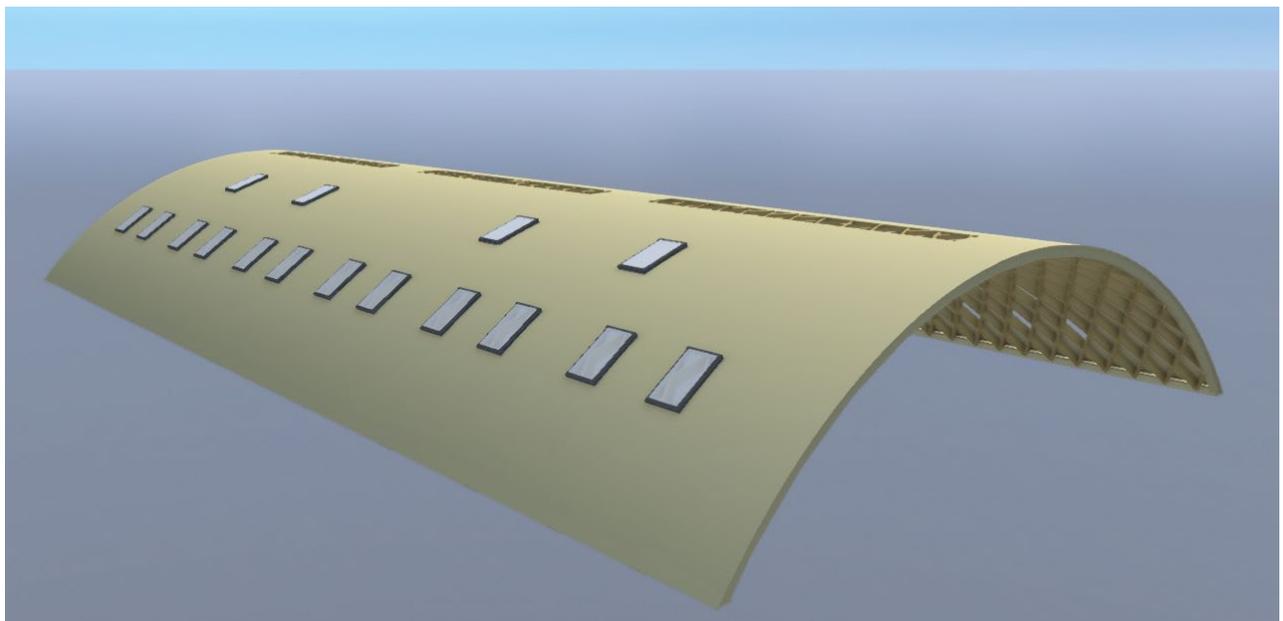


Abbildung 21: Halle nach dem Prinzip ReFlexRoof mit verschiedenen Fensteröffnungen

Es wurde ein **Belichtungsnachweis** erstellt, um die maximal erforderliche natürliche Belichtung über Fenster und damit die maximale Durchdringungsfläche des Gesamtdaches zu ermitteln. Daraus ergeben sich wiederum Anforderungen an die Statik.

Traufhöhe ca. 4,50m (Durchfahrt Landwirtschaftlicher Fahrzeuge)

→ 4,50m Maximalabstand der Dachfenster

Minimalbelichtung 10% Gesamtfläche NUF

Grundfläche Halle (netto)  $39,88 \times 20,85\text{m} = 831,50\text{m}^2$

→ 10% = **83,15m<sup>2</sup>**

Hubfirstbreite lt. Detail: 1,25 m; sinnvolle Länge Bezug nehmend auf Lamellenstruktur: 10,44m (in Summe von möglichen Teilelementen)

→ Fläche Hubfirste:  $1,25\text{m} \times 10,44\text{m} = 13,05 \times 3 \text{ Hubfirste} = 39,15\text{m}^2$

Fensterfläche gesamt:  $83,15 - 39,15\text{m}^2 = 44\text{m}^2$ ; d.h. je Seite:  $22\text{m}^2$

Veluxfenster: 94/160 (nach Absprache passendste Größe über der Raute) =  $1,504\text{m}^2$

→  $22\text{m}^2 : 1,504\text{m}^2 = 14,63$  Stück ~ **15 Stk Velux-Fenster**

Rautenfenster:  $78/169 = 0,661\text{m}^2$

→  $22\text{m}^2 : 0,661\text{m}^2 = 33,28$  Stück ~ **33 Stk Rautenfenster**

Für die Einzelumsetzung eines Details im realen Demonstrator-Modell auf dem Gelände der MFPA-Leipzig wurde das **Rautenfenster** (Abbildung 23) ausgewählt.

Hierzu konnte der Hersteller Velux Commercial als Projektpartner gewonnen werden. Er hat basierend auf sein Pfosten-Riegel-System *BA6-35-Ventria 3* ein für die rautenformpassgenaues Fenster entwickelt, welches relativ flexibel an die Rautengröße anpassbar ist und in Serie produziert werden kann.

Es wurde ein Musterfenster produziert und auf den Demonstrator als reales Modell eingebaut. Es konnten und können daraus wertvolle Erkenntnisse für die spätere Umsetzung gewonnen werden. Nachjustierungen für eine rationelle Montage und für die Gestaltung sind erforderlich, dennoch ist es bereits jetzt ein funktionierendes Fenstersystem mit Lüftungsfunktion für die Lamellendachkonstruktion, anwendbar nicht nur in der Landwirtschaft.

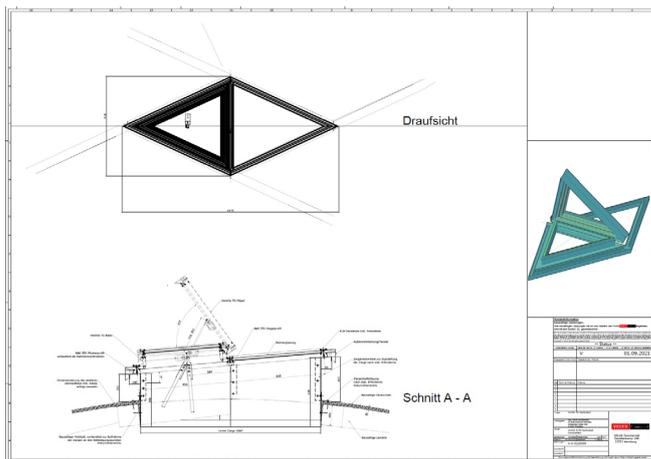


Abbildung 23: Detail Rautenfenster

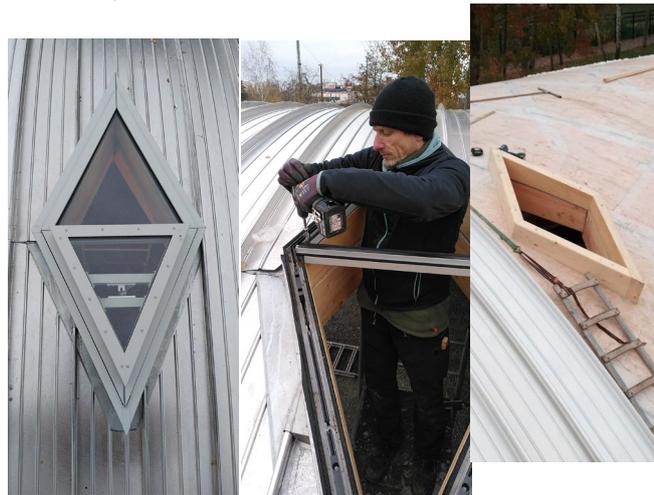


Abbildung 22: Fotos des Einbaus Rautenfenster

Zu den Details gab es im Allgemeinen stets gemeinsame Absprachen bezüglich statischer Möglichkeiten und Randbedingungen. Für den Demonstratorbau, aber auch für spätere Details, wurden einige Details näher betrachtet:

## Befestigung des Auflagerbalkens am Betonfundament

Für die Verankerung des Auflagerbalkens am Betonfundament wurden auf Basis der Lastangaben aus dem Flächen-Stabwerkmodell der HTWK Leipzig / HTW-Dresden die Bolzenankerverbindung zwischen dem Holzbalken und dem Betonfundament statisch ausgelegt.

Die Schwierigkeit bei der Befestigung des Auflagerbalkens bestand nicht in der Einwirkung, die zu einer axialen Beanspruchung (Auszug) des Bolzenankers führt, sondern im Nachweis der Beanspruchungen senkrecht zur Faser des Holzes und damit auch der Beanspruchung auf Abscheren des Bolzens. Weiterhin gilt zu beachten, dass die Unterlegscheibe der Bolzenverbindung explizit dimensioniert werden muss. Im vorliegenden Fall war eine größere Unterlegscheibe, als für den Bolzendurchmesser üblicherweise vorgegeben war, notwendig. Um die Einbindetiefe im Betonfundament in Verbindung mit der Länge des Bolzenankers zu gewährleisten, ist eine Einsatzbohrung notwendig. Gleichermäßen ist jedoch die Einbindetiefe im Holz einzuhalten. Deshalb sollte der Restquerschnitt des Holzes mind. 94 mm betragen. Es ist dabei zu beachten, die Querschnittsschwächung der Einsatzbohrung gering zu halten und damit eine entsprechend sinnvolle Klemmlänge des Bolzens anhand der Höhe des Auflagerbalkens und der einwirkenden Kräfte zu wählen.

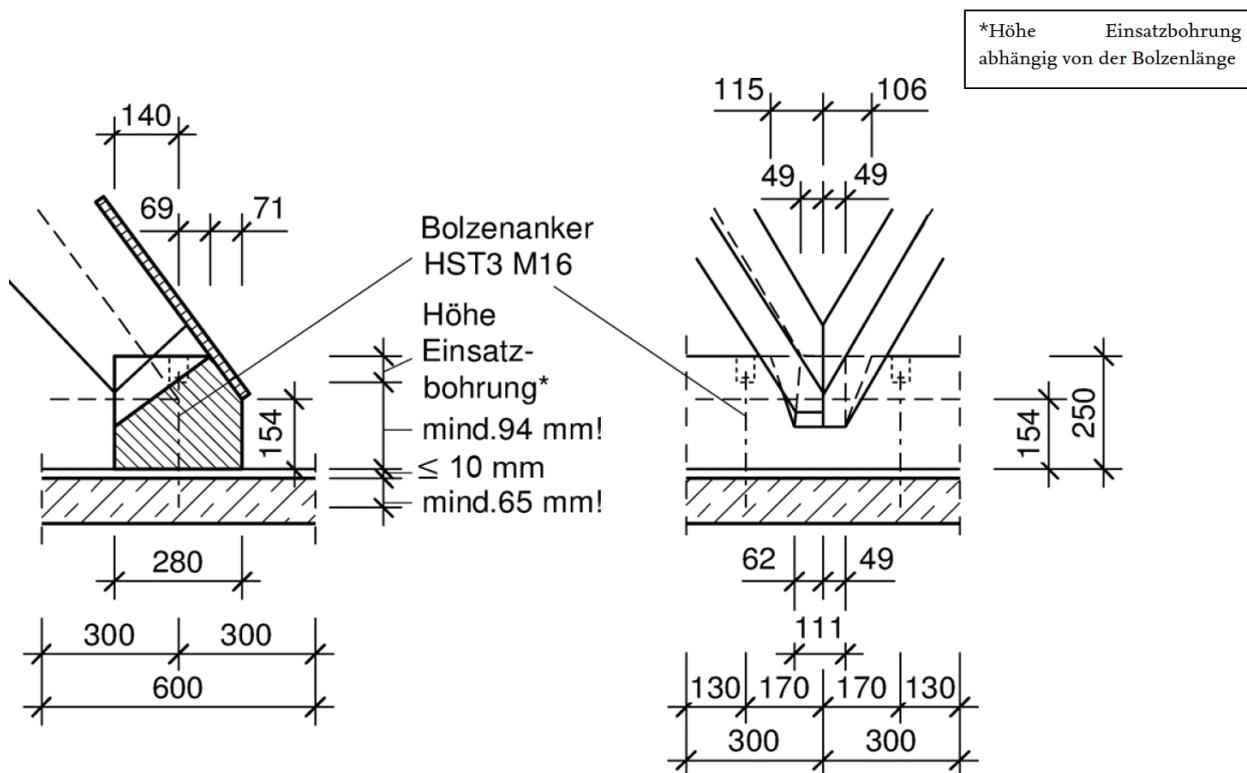


Abbildung 24: Detail zur Befestigung des Auflagerbalkens am Betonfundament

Die Parametrisierung des Bolzen-Anschlusses ist von der Höhe des Auflagerbalkens, der Klemmlänge des Bolzens, der einwirkenden Kräfte und den Angaben des Herstellers der Bolzenverbindung abhängig. Eine durchgehende triviale Parametrisierung ist dahingehend nur möglich, wenn diese Faktoren alle berücksichtigt und im Modell hinterlegt werden. Eine Vorabstimmung zur herstellerabhängigen Art der Bolzenverbindung wird empfohlen, um eine Parametrisierung anhand der einwirkenden Kräfte mithilfe einer Programmierung der notwendigen Nachweisgleichungen realisieren zu können. Diese Programmierung sollte jedoch nicht im aktuellen Flächen-Stabwerksmodell hinterlegt werden, sondern in einem weiteren Nachlaufskript zur Bestimmung und Nachweis der Anschlüsse. Eine Anschlusssteifigkeit des Bolzenanschlusses ist für das Tragwerksmodell jedoch realistisch zu wählen, um realitätsnahe Schnittgrößen erhalten zu können.

## Rautenfenster

Ein weiteres besonderes Detail stellten die Belichtungs- und Belüftungsöffnungen in der Konstruktion dar, die in Form von Rautenfenstern umgesetzt wurden. Um die Verblendung des Fensterrahmens montieren zu können, benötigt es an den gekrümmten Flächen des Tragwerks einen sogenannten „Aufsatzkranz“. So konnte eine ebene Fläche für die Fensterkonstruktion geschaffen werden. Der Aufsatzkranz wurde aus vier BSH-Lamellen gefertigt und mithilfe von jeweils zwei 45°-eingebrachten Schrauben in die darunterliegenden Lamellen montiert, wie in der nachfolgenden Abbildung zu erkennen ist:

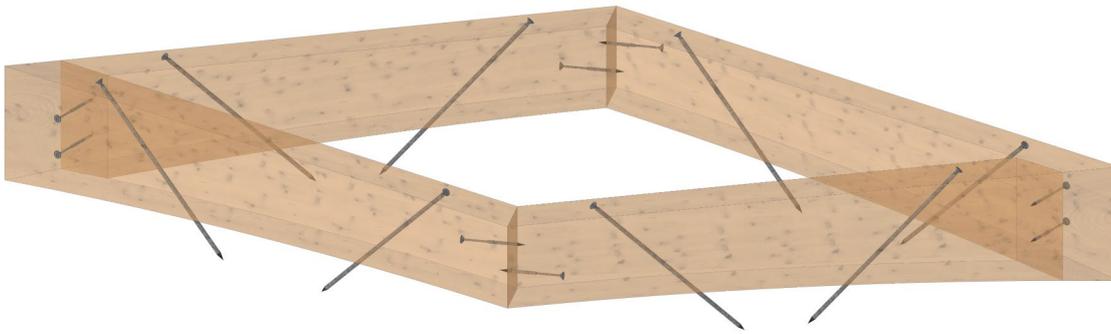


Abbildung 25: Darstellung des Konstruktionsrahmens und Verschraubung

Die einwirkenden Kräfte des Aufsatzkranzes setzen sich aus vertikal und horizontal einwirkenden Kräften zusammen. Die genauen Berechnungen und Lastannahmen wurden dokumentiert. Vor allem die Windkräfte sind als maßgebende horizontale Lasten anzusetzen, die längs und quer zum Aufsatzkranz, wie nachfolgend abgebildet, wirken:

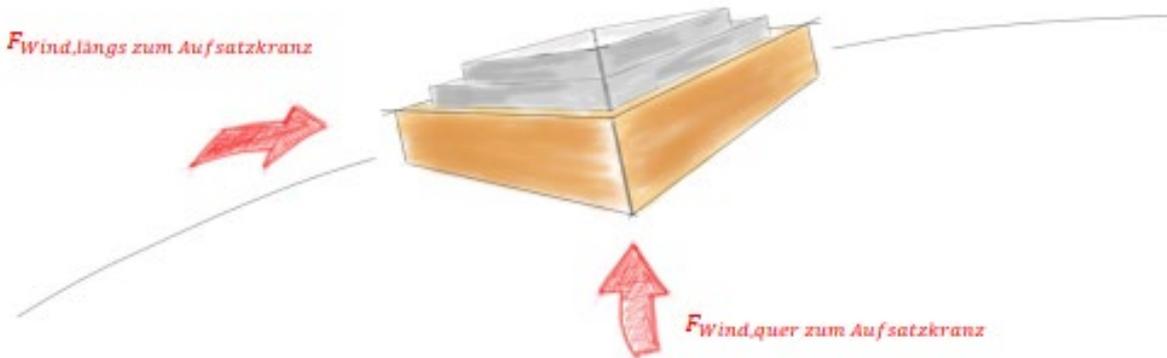


Abbildung 26: Schematische Darstellung der einwirkenden Windkräfte auf den Aufsatzkranz

Zur Bemessung wurde ein statisches Modell gewählt, dass in den Rauteneckpunkten eine gelenkige Verbindung aufweist (siehe Abbildung 27). Die Verschraubung in den Ecken, wie in Abbildung 25 zu entnehmen, wurde lediglich konstruktiv angesetzt. Die hauptsächlichen Lasten werden damit über die Rauten-Diagonalen des Aufsatzkranzes in die Lamellen des Tragwerks mittels der angeordneten Schraubenpaare übertragen.

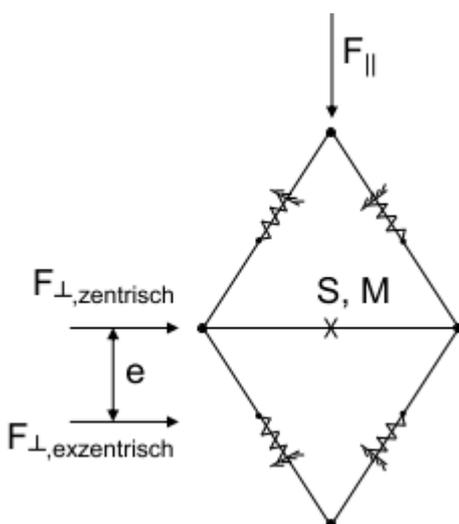


Abbildung 27: Darstellung des statischen Modells

Auch hier ist eine Parametrisierung wieder von der Schraubenart, den Querschnittsabmessungen und der Interaktion zwischen Verbindungsmittel und Holz abhängig. Daher bedarf es einer Vorabstimmung zu den gewählten Eingangsgrößen, damit lediglich eine geringe Anzahl an Schraubenparametern eingearbeitet werden muss. Eine Realisierung im Flächen-Stabwerksmodell erscheint wenig sinnvoll und schwierig handhabbar. Die einwirkenden Kräfte müssen für den Aufsatzkranz anhand der lokalen Einwirkungen (bei

Wind z. B. auf kleine Flächen ( $c_{pe,1}$ ) bestimmt werden. Dies kann über eine Programmierung geschehen und ist aktuell in einer Excel-Datei realisiert worden. Es ist zu empfehlen, die Berechnung der Verbindungsmittel – wie bereits für den Auflagerbalken erläutert – im Nachgang über eine Nachlaufskript umzusetzen, welches die lokalen und geometrischen Gegebenheiten aus dem globalen Flächen-Stabwerksmodell übernimmt und die Nachweise für die Verbindungen bereithält.

## Klammerverbindung

Die aussteifende Wirkung des Tragwerks wird über die flächige Beplankung realisiert, die über eine Klammerverbindung auf den Lamellen befestigt ist. Diese ist gemäß bekannter Schubfeldmethode umlaufend an den Rautenfeldern anzubringen, um ein ideales Schubfeld abbilden zu können. Für die aussteifende Wirkung wird damit die Übertragbarkeit der Schubflüsse maßgebend.

Der Klammervorbund ist vor allem an den Elementstößen konstruktiv, montage- und bemessungstechnisch in besonderer Weise zu betrachten. Besonders zu erwähnen sind hier die normativ zu geringen Randabstände, wenn Lamellen mit Breiten  $< 80$  mm gewählt werden. Damit wird eine wirtschaftlichere und ressourcenschonende Lösung ggf. in Frage gestellt (Abbildung 28).

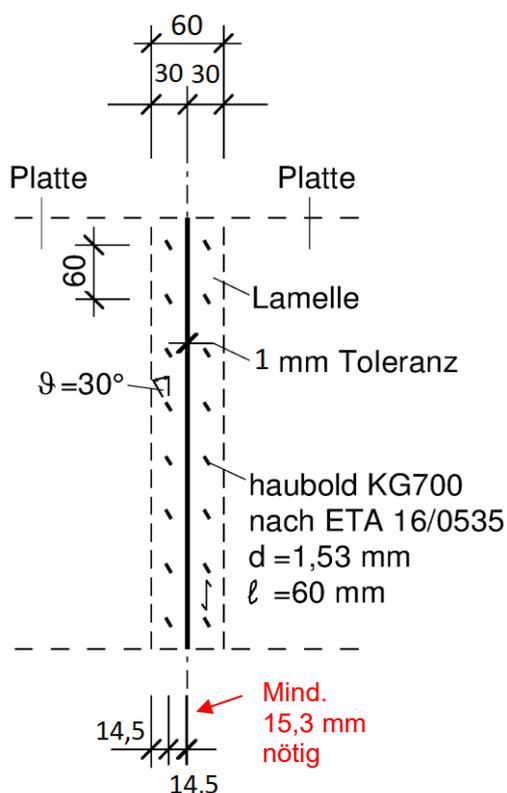


Abbildung 28: Darstellung des Elementstoßes mit den verfügbaren Abmessungen bei einer 60 mm breiten Lamelle im Vergleich mit dem notwendigen Abstand nach normativer Vorgabe (15,3 mm)

Eine weitere kritische Betrachtung ist am Flächen-Stabwerksmodell festzuhalten. Dort wurden Beanspruchungen des Klammervorbundes senkrecht zum Beplankungsrand und damit zur Lamellenlängsachse – Schubfluss  $s_{90}$  – festgestellt. Somit ist aktuell nicht mehr von einem ideellen Schubfeld auszugehen, welches nur Schubflüsse  $s_0$  in Richtung der Lamellenlängsachse beinhaltet. Da nun kein ideelles Schubfeld mehr vorliegt, sind Lamellen- bzw. Beplankungsänderungen beansprucht. Dahingehend müssen auch die normativen Randbedingungen und Mindestabstände zu den beanspruchten Lamellenrändern eingehalten werden. Unter Umständen reichen dann sogar die aktuellen Abstände an den Plattenstöße der 80 mm breiten Lamelle nicht mehr aus. Eine weitere Untersuchung dieser Umstände ist vorzunehmen, da sich vor allem im Flächen-Stabwerksmodell hinsichtlich dieser Betrachtung größere Spannungsspitzen ergeben haben. Es muss für das aktuelle Tragwerk aufgrund des vorliegenden Modells davon ausgegangen werden, dass die Klammern nur über die plastischen Tragreserven ausreichend dimensioniert vorliegen. Ob diese Tragreserven im Klammervorbund und Tragwerk vorliegen, sollten in experimentellen Untersuchungen näher untersucht und geklärt werden.

Die Parametrisierung des Klammervorbundes im Flächen-Stabwerksmodell ist aktuell nicht hinterlegt. Die Beanspruchung der Klammern kann jedoch über Linienfreigaben berechnet werden. Erläuterungen hierzu sind im Teilprojekt der HTW Dresden zu finden. Eine Bestimmung der Klammerabstände und damit der Anzahl der Klammern ist jedoch im aktuellen Flächen-Stabwerksmodell nicht möglich. Eine Implementierung wird

aufgrund des hohen Rechenaufwands nicht als zielführend erachtet. Des Weiteren ist es auch hier sinnvoll, bereits explizite Vorgaben für die eingehenden Parameter der Klammer zu geben. Über die Ausgabe der Beanspruchungen aus dem Flächen-Stabwerksmodell können wiederum in Nachlaufskripten die Verbindungsmittelanzahl und Abstände berechnet werden.

Wie bereits beschrieben, ist es notwendig, das mechanische Verhalten der Klammerverbindung unter Berücksichtigung der praktischen Randbedingungen näher zu untersuchen. Dabei sollte nicht nur die Beanspruchung senkrecht zu den Lamellen- bzw. Beplankungsrändern in einem gekrümmten Element näher betrachtet werden, sondern auch die axiale Ausziehtragfähigkeit der Klammern. Der letztgenannte Aspekt entsteht durch den Umstand, dass die Lamellen des Tragwerks im Mikro-Versatz-Knoten nicht in globaler z-Richtung gehalten werden. Das heißt, es sind keinerlei Verbindungsmittel angeordnet, die den Knoten gegenüber Querkräften  $Q_z$  in Lage halten und somit für eine entsprechende Tragfähigkeit sorgen. Dadurch ergibt sich eine mechanische Problematik, die weiter oben ins Tragwerk verlagert oder über bestehende Reibung im Knoten aktiviert werden muss. Im ersten Fall wird der Klammverbund axial auf Kopfdurchziehen beansprucht. Diese Beanspruchung ist für Klammern in einem ständigen Lastfall nur mit geringen Beanspruchbarkeiten zulässig und wird im Eurocode 5 limitiert. Dieser Aspekt ist kritisch zu hinterfragen und sollte in einer weiteren Untersuchung näher betrachtet werden. Im zweiten Fall gibt es keine Ansätze, die eine Reibung für Stirnversätze in der Bemessung zulässt und damit für das Tragwerk als valide zu betrachten sind.

### Schnittstelle zum Flächen-Stabwerksmodell der HTW Dresden

Während der gesamten Projektlaufzeit fand eine Zusammenarbeit zu den Fragestellungen der HTW Dresden von Seitens des iBHolzes statt. Diese zielten vor allem auf holzbauspezifische und statisch-mechanische Fragestellungen ab. Später wurden diese Diskussionen und der konstruktive Austausch durch das Ingenieurbüro Janke erweitert.

Im Zuge der Diskussionen wurden speziell Optimierungsmaßnahmen in den Kontaktknoten und Anschlüssen thematisiert. Das Augenmerk lag dabei vor allem in der Findung der Steifigkeitskennwerte für den Mikroversatzknoten und der Verbundeigenschaften zwischen den Lamellen und der Beplankung. Auf Basis dieser Untersuchungen und der Erkenntnisse, die mit dem Bau des Demonstrators erhalten wurden, wurde das statische Modell weiterhin optimiert. Die Untersuchungen fanden in Form von kleinformatischen Laborversuchen statt und wurden mittels photogrammetrischer und berührungsloser Messtechnik dokumentiert:

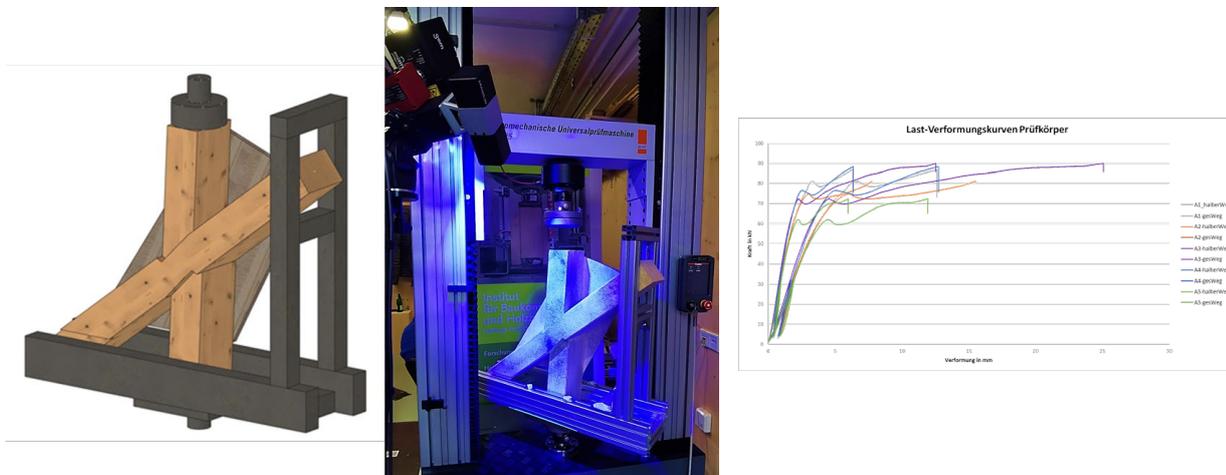


Abbildung 29: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Steifigkeit des Mikroversatzknotens und Auswertungsdiagramm

Ganz zu Beginn des Projektes wurden im Flächen-Stabwerksmodell der HTW Dresden hinsichtlich der axialen Steifigkeit des Mikro-Versatz-Knotens (MVK) keine exakt definierten Annahmen getroffen. Diese wurden im Projekt hinterfragt und dienten als ausschlaggebender Aspekt, die nachfolgenden experimentellen Untersuchungen durchzuführen.

Das axiale Trag- und Verformungsverhalten des Mikro-Versatz-Knotens (dargestellt in Abbildung 30) kann mithilfe von Steifigkeits- und Tragfähigkeitswerten in die Bemessung des Knotenpunktes auf Basis des Flächen-Stabwerksmodells integriert werden. Maßgeblich für diese Werte waren die Laboruntersuchungen an der TU Braunschweig, die an unterschiedlichen Zuständen der Knotenverbindung (mit/ohne Beplankung, mit/ohne Verschraubung des MVK, mit/ohne Toleranzen i.B. des MVK) untersucht wurden. Dabei wurde neben der Aufzeichnung mithilfe eines photogrammetrischen Messsystems auch eine Bild- und Videodokumentation sowie Kraft-Verformungskurven über die Prüfmaschine für die Bewertung des MVK genutzt (siehe Abbildung 29). Es stellte sich heraus, dass der MVK-Verbindung große elastische Verformungen und im Weiteren sogar plastische Reserven aufweist. Eine gesamtheitliche Aussage über die elastisch-plastische Tragfähigkeit war

in den Untersuchungen nicht vollständig möglich, da eine Begrenzung der auftretenden Verformungen aufgrund der Limitierungen des Prüfrahmens vorgenommen werden musste.

Die Erkenntnisse zum Klammerverbund, die aus diesem Versuch entnommen werden konnten, zeigten eine geringere Steifigkeit als anhand der bekannten Modellbildung und Annahmen vermutet wurde. Selbiges gilt für die zusätzliche Verschraubung des MVK ohne aussteifende Beplankung, die laut Patent für den MVK angesetzt werden müsste. Ausführungen und Erkenntnisse zum Einfluss der Beplankung als auch der Verschraubung auf das Trag- und Verformungsverhalten sind in der folgenden veröffentlichten Publikation zu finden:

Vögele, K., Tronnier, M., Plüss, Y., & Sieder, M. STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND DEFORMATION BEHAVIOUR OF AN ADVANCED CARPENTRY CONNECTION IN TIMBER CONSTRUCTION. DOI: 10.52202/069179-0199

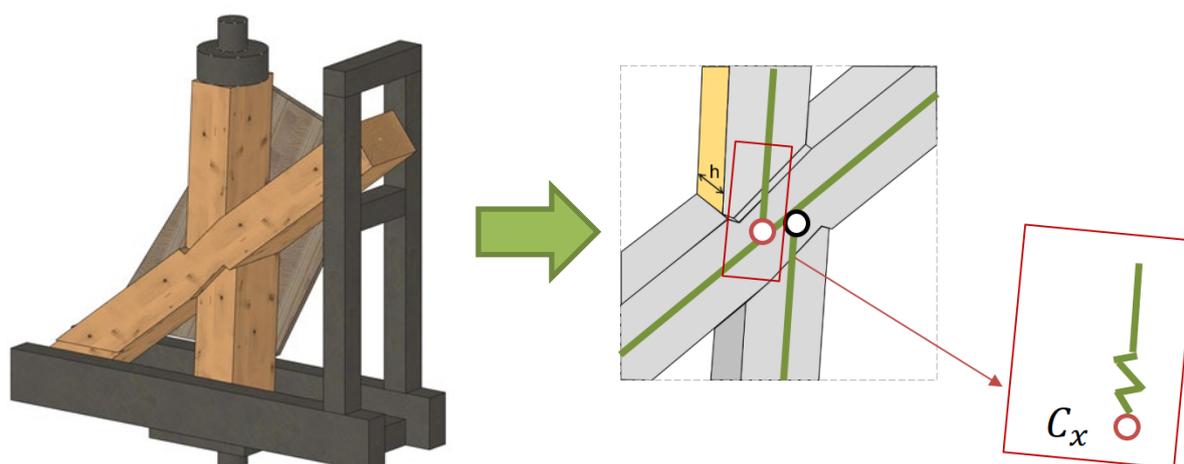


Abbildung 30: Untersuchung der axialen Steifigkeit des Knotens

### Entwicklung eines Stabwerkmodells

Um die Nachvollziehbarkeit der statischen Schnittgrößen herstellen zu können, wurde das Vorgehen der Abbildung der Beplankung statt mit Flächenelementen im Weiteren mit Ersatzstäben gewählt. Die Erkenntnisse hierzu folgen in einer abschließenden Veröffentlichung in einem Vergleich zum Flächen-Stabwerksmodell der HTW Dresden. Nachfolgend ist ein Vergleich der beiden Modelle für den Normalkraftverlauf dargestellt:

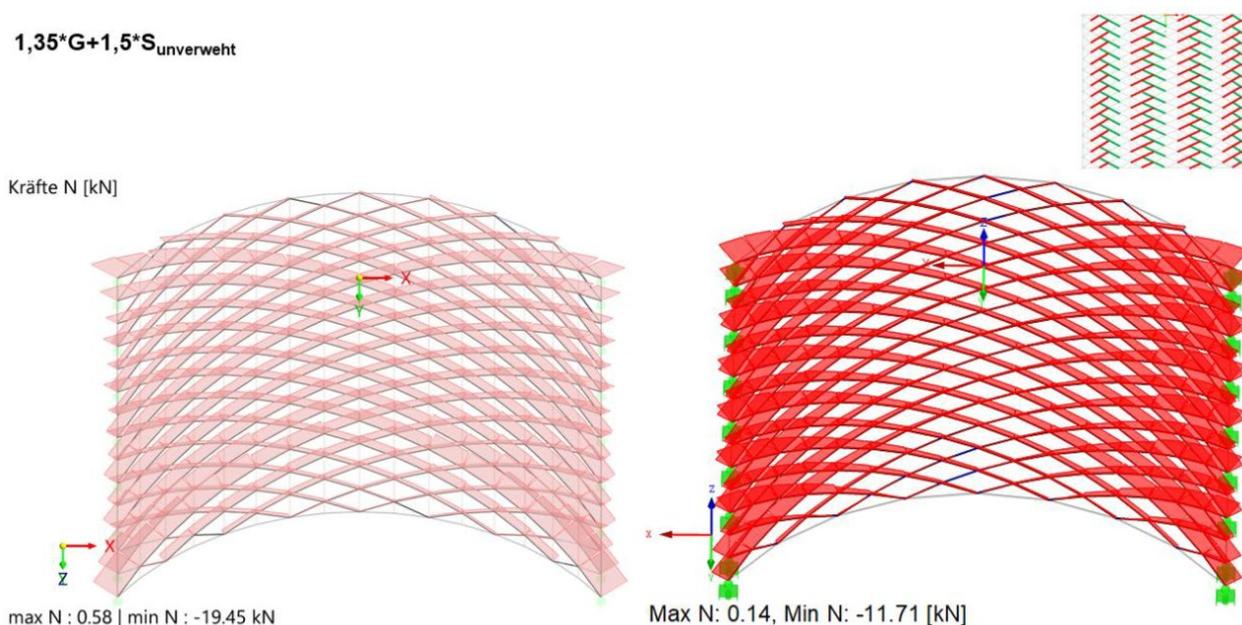


Abbildung 31: Vergleich der beiden Modellierungsarten anhand der Normalkräfte über die Dachfläche hinweg: Stabwerksmodell (links) und Flächen-Stabwerksmodell (rechts)

Es ist zu erkennen, dass die Schnittkraftverläufe im Flächen-Stabwerksmodell deutlich geringer sind als im Stabwerksmodell, wie in der Abbildung 31 an den Zahlenwerten für „min N/max N“ zu erkennen ist. Über das

Stabwerksmodell lässt sich eine Druckkraft von 19,45 kN bestimmen. Beim Flächen-Stabwerksmodell ist diese resultierende Kraft 11,71 kN. Bei der Modellbildung wurde darauf geachtet, dass die eingehenden Parameter für Einwirkungen, Gelenke und Anschlusssteifigkeiten in gleicher Größenordnung vorliegen. Einzig und allein die Plattenmodellierung und die Berechnung der Schnittkräfte (Deformationsmethode [RStab] und FE-Methode [RFEM]) unterscheiden sich in der Herangehensweise. Die Platte wurde im Stabwerksmodell mithilfe eines Ersatzstabes abgebildet, der über eine Rückrechnung die Schubflüsse aus dem Rautenfeld wiedergibt. Im Flächen-Stabwerksmodell wurde eine vollflächige Modellierung der Platte vorgenommen. Die flächige Modellierung zeigt deutlich größere Steifigkeiten, die zu kleineren Schnittkräften führen. Die Ersatzstabmethode ist jedoch für eine statische Nachvollziehbarkeit für die Modellierung der Platte vorzuziehen, da die Übertragung der einwirkenden Kräfte über die Klammerverbindung von Beplankung zur Lamelle nur über Schubflüsse möglich ist. Die Verbundsteifigkeit der Klammerverbindung ist jedoch nur sehr gering im Vergleich zur Steifigkeit der Fläche bzw. des Stabes. Eine vollflächige und damit eher steife Plattenmodellierung im Flächen-Stabwerksmodell bleibt kritisch zu hinterfragen.

Des Weiteren ist aus Abbildung 31 zu erkennen, dass sich die Normalkräfte beim Flächen-Stabwerksmodell in den Lamellenzügen bei einer symmetrischen Einwirkung nicht symmetrisch verhalten. Rechts- und linkslaufende Lamellen haben eine unterschiedliche Größe des Schnittkraftverlaufs. Dies bemerkt man vor allem im Firstbereich, speziell dort wo sich die Lamellenzüge treffen. Betrachtet man den Firstbereich des Stabwerksmodells so sind die Schnittgrößenverläufe bei einem Zusammentreffen der Lamellen gleich. Wie oder warum dieses Verhalten hervorgerufen wird, ist konkret noch nicht genau nachvollziehbar und sollte in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden.

Weitere Erkenntnisse zu den Unterschieden werden aktuell zwischen den Projektpartnern anhand einer studentischen Arbeit des iBHolzes diskutiert. Die Erkenntnisse hierzu werden im Nachgang des Projektes publiziert werden. Es ist hier jedoch nochmals deutlich herauszustellen, dass die Art der Modellierung entscheidenden Einfluss auf die Schnittgrößen haben. Daher ist es nötig, sich bereits vor der Modellbestimmung mit dem Tragwerk und seinen Eigenschaften auseinanderzusetzen, Kraftverläufe zu diskutieren und die realistischen Steifigkeiten abzuschätzen, um die Nachvollziehbarkeit des Modells gewährleisten zu können.

## Arbeitspaket 5: Erarbeitung eines Parameter gesteuerten, statischen Bemessungskonzeptes

Für die Erstellung des parametergesteuerten, statischen Bemessungskonzeptes erfolgte zunächst die Erarbeitung eines Statikmodells, welches das Trag- und Verformungsverhalten der projektspezifisch gewählten Zollingerkonstruktion möglichst realitätsgetreu abbildet. Gewählt wurde dafür ein Flächen-Stubwerksmodell, welches mit Hilfe der Statiksoftware RFEM von Dlubal GmbH unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode berechnet werden soll. Aufbauend auf dem Geometriemodell der HTWK Leipzig, welches bereits alle geometrischen Informationen enthält, wurden weitere statisch relevante Parameter, wie Lasten, Material oder Bauteilverbindungen, herausgearbeitet. Für die Erstellung des Statikmodells ist eine Übersetzung der Holzbauteile, sowie deren Verbindungen untereinander, in statische Elemente und Definitionen nötig. Abbildung 32 soll dafür beispielhaft den Übergang zwischen den konstruktiven Bauteilen des Demonstrationsobjekts in Holzbauweise (links) und den in statische Elemente im Statikmodell (rechts) darstellen. Lamellen, Auflagerbalken und Randbalken werden als Stabelemente erzeugt, die Beplankung als Flächenelement.



Abbildung 32: Erarbeitung des Statikmodells (rechts) auf Grundlage der konstruktiven Ausführung (links), Grafik: HTWD

Insbesondere wurde weiterhin die Modellierung der Verbindungssteifigkeit zwischen den Stabelementen bzw. zwischen Stab- und Flächenelementen betrachtet. Hierfür werden Stabendgelenke für die Verbindung zwischen Lamelle-Lamelle, Lamelle-Auflager und Lamelle-Randbalken definiert. Die entsprechenden Federsteifigkeiten oder Nichtlinearitäten werden abhängig von der konstruktiven Ausführung und der daraus resultierenden Kraftübertragung, sowie abhängig von der Staborientierung im Statikmodell, gewählt. In Tabelle 3: Zuordnung der Stabendgelenke zu verschiedenen Lamellengruppen (Axial- und Quergelenk) werden die sechs relevanten Stabendgelenkstypen dargestellt.

Tabelle 3: Zuordnung der Stabendgelenke zu verschiedenen Lamellengruppen (Axial- und Quergelenk)

	$u_x$	$u_y$	$u_z$
Auflager Lamelle I	Fest	Fest wenn $V_y$ positiv	Fest
Auflager Lamelle II		Fest wenn $V_y$ negativ	
Stabanfang – Lamelle I	$C_{ux}$ = Federkonstante Nichtlinearität: Federausfall bei Zugkraftübertragung	Fest wenn $V_y$ positiv	Fest wenn $V_z$ positiv
Stabende – Lamelle I			Fest wenn $V_z$ negativ
Stabanfang – Lamelle II		Fest wenn $V_y$ negativ	Fest wenn $V_z$ positiv
Stabende – Lamelle II			Fest wenn $V_z$ negativ

Die Verbindung zwischen Lamelle und Beplankung erfolgt mit Hilfe von Linienfreigaben. Die Definition der Federsteifigkeit ist hierbei abhängig vom Verschiebungsmodul der Klammerverbindungen nach DIN EN 1995-1-1. Dieser wird wiederum über den Klammerabstand und Klammerdurchmesser ermittelt.

Weitere Untersuchungsergebnisse und Erläuterungen zu Modellierungsansätzen werden im Anhang bei den wesentlichen Ergebnissen des Teilvorhabens 2 vorgestellt.

Durch die Systematisierung der Geometrielemente (Knoten, Linien und Flächen) und die darauf aufbauende Zuordnung der statischen Bauteilkomponenten entsteht eine parametrische Umgebung zur Erstellung des Statikmodells. Für einen konsistenten Informationsfluss wird das parametrische Statikmodell direkt in das

digitale Gesamtmodell implementiert und an die bereits bestehenden Parameter der anderen Projektbeteiligten angeknüpft. Hierfür wird die grafische Programmieroberfläche des Programms Grasshopper in Verbindung mit Rhinceros von McNeel verwendet.

Die schematische Darstellung in Abbildung 33 beschreibt die bereits erläuterten Schritte des Bemessungskonzeptes, ausgehend vom Geometriemodell und den erforderlichen statischen Parametern. Das erzeugte parametrische Statikmodell ist als eine umfassende Programmdatei zu verstehen, in welcher folgend alle erforderlichen Parameter entsprechend des Bauauftrags angepasst werden können. Hier entstehen die notwendigen Definitionen und Verknüpfungen zur Erstellung eines berechnungsfähigen Strukturmodells, sodass der zukünftige Anwender lediglich die Eingangsparameter einstellen muss. Änderungen, beispielsweise der Geometrie oder der Standortinformationen, können aufgrund der parametrischen Entwurfsumgebung schnell und effizient angepasst werden. Im Vergleich zu konventionellen Planungsprozessen ist kein wiederholtes, manuelles Erstellen von Modellvarianten erforderlich.

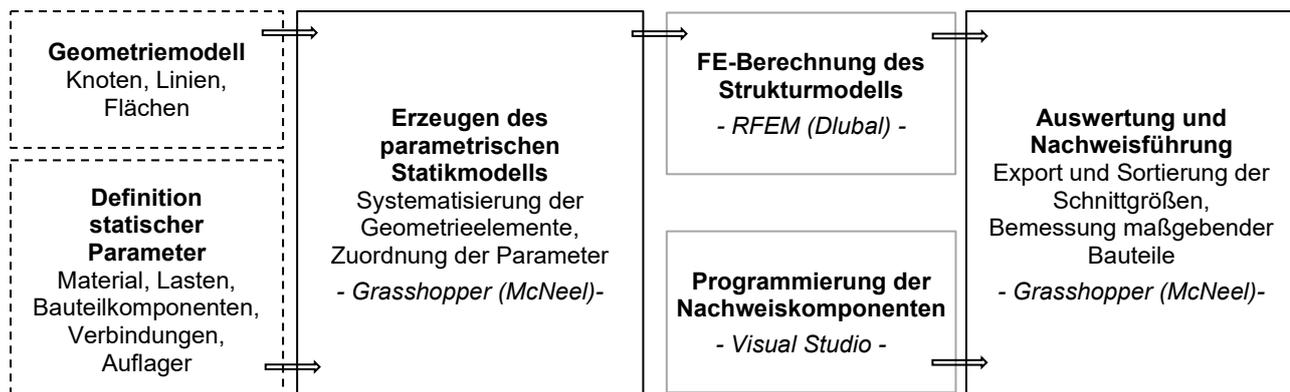


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Teilleistungen im parametrischen Gesamtkonzept zur statischen Bemessung, Grafik: HTWD

Mit Hilfe der Programmschnittstelle zwischen Grasshopper und RFEM kann folgend das erzeugte Flächen-Stabwerksmodell direkt exportiert und als FE-Modell berechnet werden. Dabei werden alle notwendigen Informationen, wie Bauteilquerschnitte und Material, sowie Lasten und Verbindungsdefinitionen mit übermittelt. Anschließend erfolgt die Berechnung aller bemessungsrelevanten Schnittgrößen und Verformungen der Stab- und Flächenbauteile. Diese können visualisiert am Ergebnismodell, wie in Abbildung 34 dargestellt, oder als Ergebniswerte tabellenförmig ausgegeben werden.

Für die Auswertung und Nachweisführung werden die berechneten Schnittgrößen als Ergebniswerte in die programmierte Umgebung des digitalen Gesamtmodells zurückgespielt und entsprechend der bemessungsrelevanten Bauteile und Verbindungsstellen sortiert.

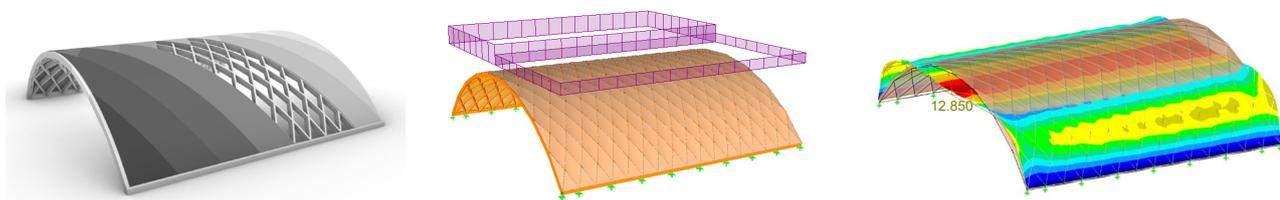


Abbildung 34: Relevante räumliche Modelle für Bemessungskonzept – Geometriemodell, Statikmodell und Ergebnismodell mit Verformung, Grafik: HTWD

Gleichermaßen entsteht eine zweite Programmschnittstelle zum Programm Visual Studio, wie in Abbildung 6 gezeigt. Als Teilleistung des Arbeitspaketes 5 wurden, neben der Erstellung eines Struktur- und Berechnungsmodells, Programmkomponenten für die Nachweisführung erstellt. Hierfür wurden die maßgebenden Holzbaunachweise nach EC5 unter Verwendung des Programms Visual Studio und der Programmiersprache C# umgesetzt.

Die auf Grundlage der Nachweisgleichungen und den erforderlichen Eingangsparametern programmierten Komponenten konnten anschließend in Grasshopper implementiert werden. Folglich kann die Bemessung der maßgebenden Bauteile abhängig von den Ergebnissen der FE-Berechnung und den parametrischen Eingangswerten direkt innerhalb des digitalen Gesamtmodells erfolgen.

Im Rahmen der Planung des Demonstrationsobjektes 2021 wurde das entstandene Bemessungskonzept getestet und evaluiert. Die gewählten Abmessungen und Anforderungen wurden auf der Eingabeseite des parametrischen Statikmodells definiert, so dass das Strukturmodell unter Anwendung des Statikprogramms RFEM berechnet werden konnte. Die Schnittgrößen wurden wiederum in die Gesamtparametrik zurückgespielt. Abbildung 35 stellt beispielhaft den Normalkraftverlauf unter symmetrischer Lasteinwirkung dar. Es ist zu erkennen, dass die Lamellen ausschließlich auf Druck und der Auflagerbalken auf Zug beansprucht werden. Mit Hilfe der programmierten Nachweiskomponenten wurden die entsprechenden Querschnittsnachweise geführt, sowie die erforderlichen Querschnittsmaße für Lamellen, Randbalken und Auflagerbalken ermittelt. Auf Grundlage der Bestätigung bzw. Anpassung der Querschnittsmaße konnten anschließend die Fertigungsdaten erstellt werden.

Weiterhin erfolgten im Rahmen des Arbeitspaketes 5 Parameterstudien zur Evaluation des entstanden Statikmodells und des Auswertungskonzeptes. Die Ergebnisse dieser sind zusammenfassend im Anhang unter den wesentlichen Ergebnissen des Teilvorhabens 2 dargestellt.

EK1 : GZT (STR/GEO) - Ständig / vorübergehend - Gl. 6.10  
Stäbe Schnittgrößen N  
Ergebniskombinationen: Max- und Min-Werte

Isometrie

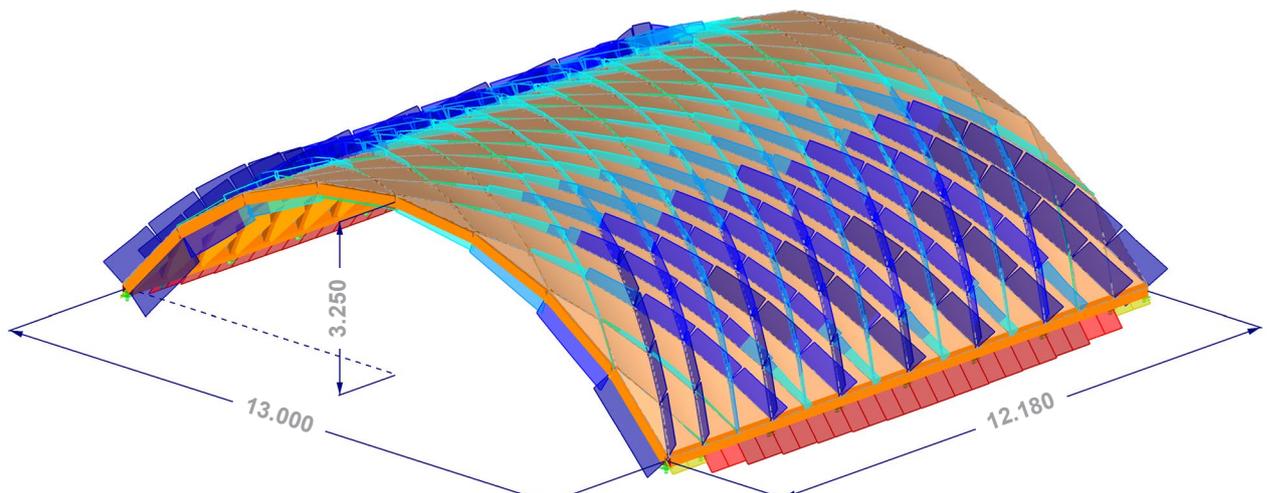
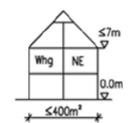
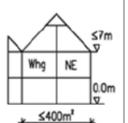
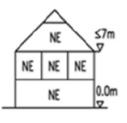
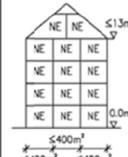
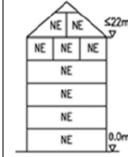


Abbildung 35: Ergebnismodell mit Normalkraftverlauf der Stäbe zur Bemessung des Demonstrators, Grafik: HTWD

## Arbeitspaket 6: Entwicklung eines ganzheitlichen nutzungsbedingten Brandschutzkonzeptes inklusive zugehöriger anlagentechnischer und organisatorischer Maßnahmen

Die brandschutztechnischen Anforderungen an landwirtschaftliche Gebäude werden auf Basis der jeweiligen Landesbauordnungen nach Anzahl und Ausdehnung der Geschosse sowie Art der Nutzungseinheiten bestimmt. Geringe brandschutztechnische Anforderungen werden an freistehende land- und forstwirtschaftliche Gebäude, für die kein Sonderbautatbestand gemäß § 2 (4) MBO zutrifft, gestellt. Für diese Gebäude, welche der Gebäudeklasse 1 zugeordnet werden, treten versicherungstechnische Anforderungen in den Vordergrund.

Werden die landwirtschaftlichen Gebäude an andere Gebäude auf demselben Grundstück oder an der Grundstücksgrenze angebaut, sind umfassendere brandschutztechnische Betrachtungen erforderlich. In diesem Fall fallen die landwirtschaftlichen Gebäude in die Gebäudeklasse 2 oder 3.

Gebäudeklasse	1	2	3	4	5
Gesamtfläche	≤ 400 m <sup>2</sup>	≤ 400 m <sup>2</sup>	-	-	-
Fläche einer Nutzungseinheit	-	-	-	≤ 400 m <sup>2</sup>	-
Anzahl der Nutzungseinheiten	≤ 2	≤ 2	-	-	-
					

Hinweis: Gebäudeklasse 5 mit Aufenthaltsräumen > 22 m = Hochhäuser, Whg - Wohnung, NE - Nutzungseinheit

Hinweis:

Unterteilung GKL 1:

- freistehende Gebäude mit einer Höhe ≤ 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt ≤ 400 m<sup>2</sup> und
- freistehende land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude

Abbildung 36: Einstufung in Gebäudeklassen (§ 2 MBO)

Weitere brandschutztechnische Anforderungen ergeben sich, wenn ein Sonderbautatbestand zutrifft, u.a. wenn die Brutto-Grundfläche des Geschosses mit der größten Ausdehnung 1.600 m<sup>2</sup> überschreitet. In den meisten Fällen des landwirtschaftlichen Bauens sind für die Sonderbautatbestände keine Sonderbauverordnungen verfügbar. Es kommt zu länderspezifischen Unterschieden in der Beurteilung der erforderlichen Maßnahmen, da die für das Baurecht zuständige Stelle bzw. der Prüfsachverständige für den Brandschutz im Einzelfall prüfen.

Abgeleitet aus den vorgenannten Ausführungen ergeben sich folgende Anforderungen an das Dachtragwerk (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Anforderungen an Dachtragwerke in landwirtschaftlichen Gebäuden

Einstufung	GKL 1	GKL 2	GKL 3
Anforderung			
Brandabschnitte ≤ 1.600 m <sup>2</sup> bzw. ≤ 10.000 m <sup>3</sup>	Keine Anforderung an Feuerwiderstand  Baustoffe mindestens normal entflammbar	Feuerwiderstand 30 Minuten, wenn a) (notwendige) feuerwiderstandsfähige Trennwand nicht bis zur Dachhaut geführt ist b) Dach aussteifende Konstruktion für feuerwiderstandsfähige Wände c) Anforderung an Dachkonstruktion aus Sonderbautatbestand und ggfs. geltender -vorschrift	
Brandabschnitt > 1.600 m <sup>2</sup> bzw. > 10.000 m <sup>3</sup>	Feuerwiderstand 30 Minuten		

Um einen einheitlichen Bewertungsstandard zu erhalten, wurde die brandschutztechnische Leistungsfähigkeit der Dachkonstruktion in theoretischen und experimentellen Untersuchungen ermittelt. Neben den anlagentechnischen und organisatorischen Maßnahmen bilden die baulichen Maßnahmen einen wichtigen Bestandteil der ganzheitlichen nutzungsbedingten Betrachtung.

Zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit der Tragwerksstruktur wurden Untersuchungen unter nomineller Temperaturzeitkurve (hier: Einheitstemperaturzeitkurve) und einem Naturbrandmodell gemäß EN 1991-1-2 [1] durchgeführt. In den Versuchen wurde die Temperaturentwicklung innerhalb der Lamellen, der Knotenverbindungen mit und ohne Verbindungsmitteln sowie auf der brandabgewandten Seite der oberen Beplankung aus Sperrholzplatten (Produktnorm DIN EN 14374 [2]) bestimmt.

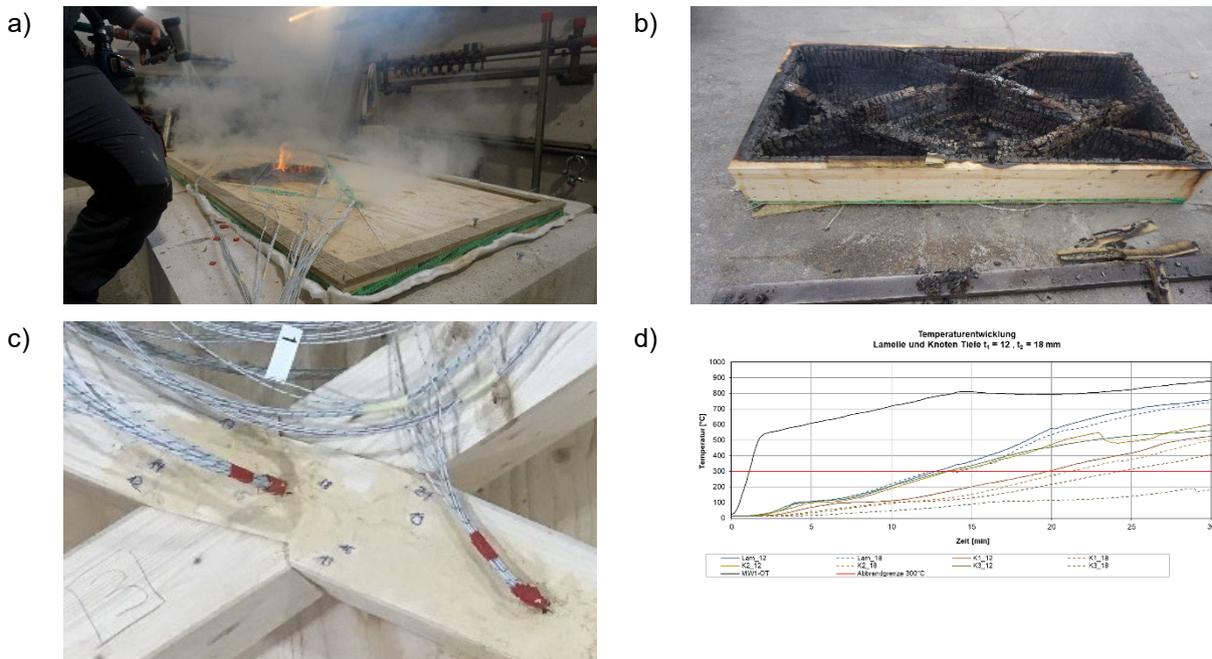


Abbildung 37: Brandversuche im Kleinmaßstab  
 a) V1 – Durchbrand Beplankung, b) V1 – Abbrand Lamellen, c) Instrumentierung Knoten 3 (Messstellen 12 bis 21), d) Vergleich Temperaturentwicklung – Messstellen Lamelle und Knoten in Tiefe  $t_1 = 12 \text{ mm}$ ,  $t_2 = 18 \text{ mm}$

Auf Grundlage der Versuche konnte eine vergleichende Bewertung der experimentell ermittelten Abbrandraten unter Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) und der Naturbrandkurve zu den materialbezogenen Kennwerten und Bemessungsverfahren der europäischen Norm EN 1995-1-2 [3] vorgenommen werden.

Gleichzeitig dienen die Abbrandraten als Berechnungsgrundlage eines Gesamttragwerkes unter Berücksichtigung lokaler Brandereignisse und auch Vollbrandereignisse.

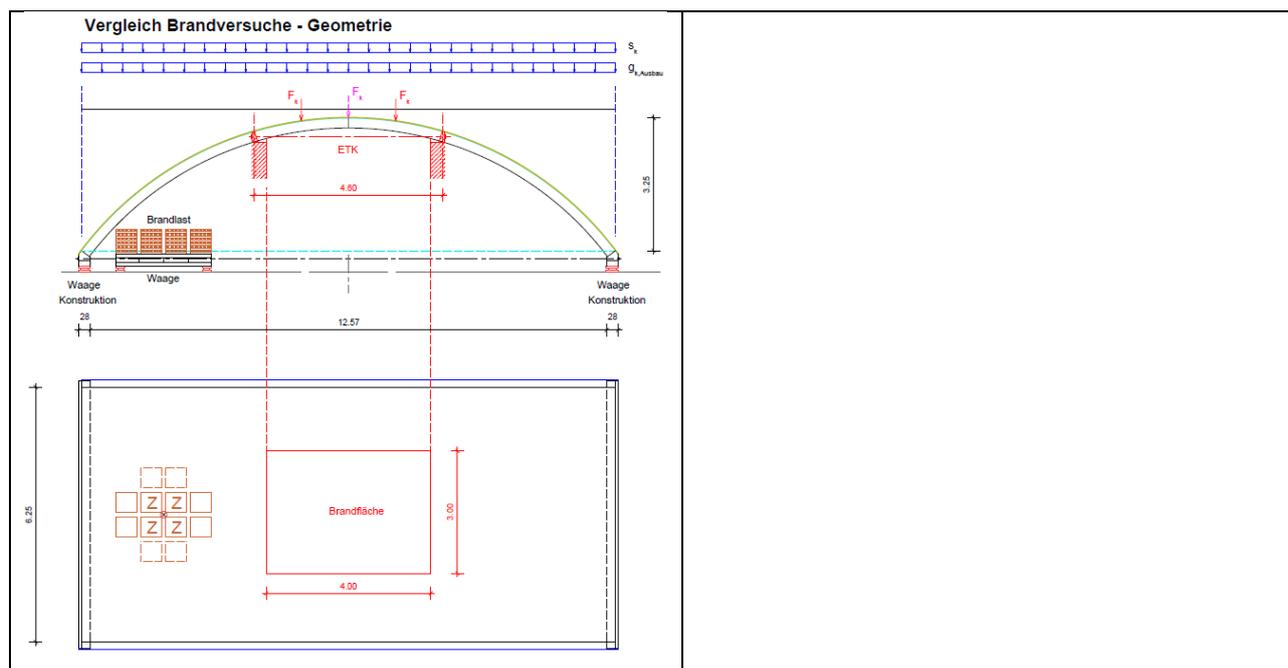
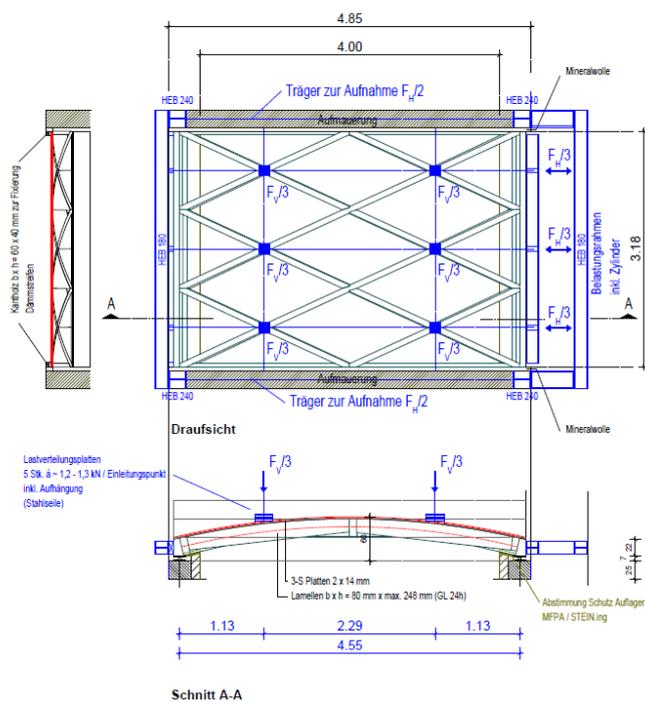


Abbildung 38: Brandschutztechnische Versuchsplanung weitgespannter Tragwerke und Skalierung auf Normbrandofen nach DIN 1365-2

Im Vergleich zur Antragstellung wurden Realbrandversuche an einem belasteten gekrümmten Tragwerk mit einer Spannweite von  $L_{exp} = 12,85$  m geplant. Grundlage für die Festlegung der Brandlasten aus Holzkrippen bildete DIN 18234-1 [4] in Verbindung mit einer nutzungsabhängigen Analyse. Das Ziel war es, die Brandausbreitung ausgehend von einem lokalen Brandereignis in Abhängigkeit des Tragwerksverhaltens aufzunehmen.

Aufgrund der exponentiell gestiegenen Versuchskosten, resultierend u.a. aus der pandemischen Lage im Vergleich zum Zeitpunkt der Antragstellung wurden die Versuche für den Normbrandofen nach DIN EN 1365-2 [5] umgeplant. Im Vergleich zu dem Realbrandversuch kann die Brandausbreitung nicht aufgenommen werden, da nur ein kleinerer Brandbereich mit einer beanspruchten Fläche von  $12 \text{ m}^2$  und einer Spannweite  $L_{exp} = 4,55$  m zur Verfügung steht. Mit Beginn des Brandversuches steht der komplette Prüfkörper unter Brandeinwirkung.

Des Weiteren muss neben der vertikalen Belastung eine horizontale Last eingetragen werden, um vorgegebene maximale Spannungszustände in den Lamellen und Knoten zu erzeugen. Aus den Überlegungen ergaben sich zwei Versuche, bei denen das Brandverhalten unter der maximalen Momenten- und Normkraftbeanspruchung bestimmt wurde.



#### Brandversuche im Deckenbrandofen gemäß DIN EN 1365-2:

- 1) Prüfbedingungen: gemäß DIN EN 1363-1
- 2) Belastung: Versuch 1 (max N)  $F_H = 29,5 \text{ kN}$   $F_V = 3,6 \text{ kN je Reihe}$   
 Versuch 2 (max M)  $F_H = 13,7 \text{ kN}$   $F_V = 3,9 \text{ kN je Reihe}$
- 3) Messstellen (Typ K mit Perle\* / Plättchen\*\*):
  - a) Prüfkörper Bestimmung Temperaturprofil
    - + Thermoelemente\* innerhalb Lamellen und Knoten (40 Messstellen Typ K Perle pro Versuch)
    - + Thermoelemente\*\* innerhalb Zwischenschicht 3-S-Platten (10 Messstellen pro Versuch)
  - b) Oberfläche Messstellen nach DIN EN 1365-2
    - o Thermoelemente\*\* für den mittleren Temperaturanstieg (Festlegung MPA)
    - o Thermoelemente\*\* für den maximalen Temperaturanstieg (Festlegung MPA)

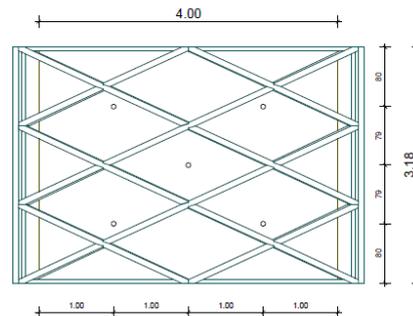
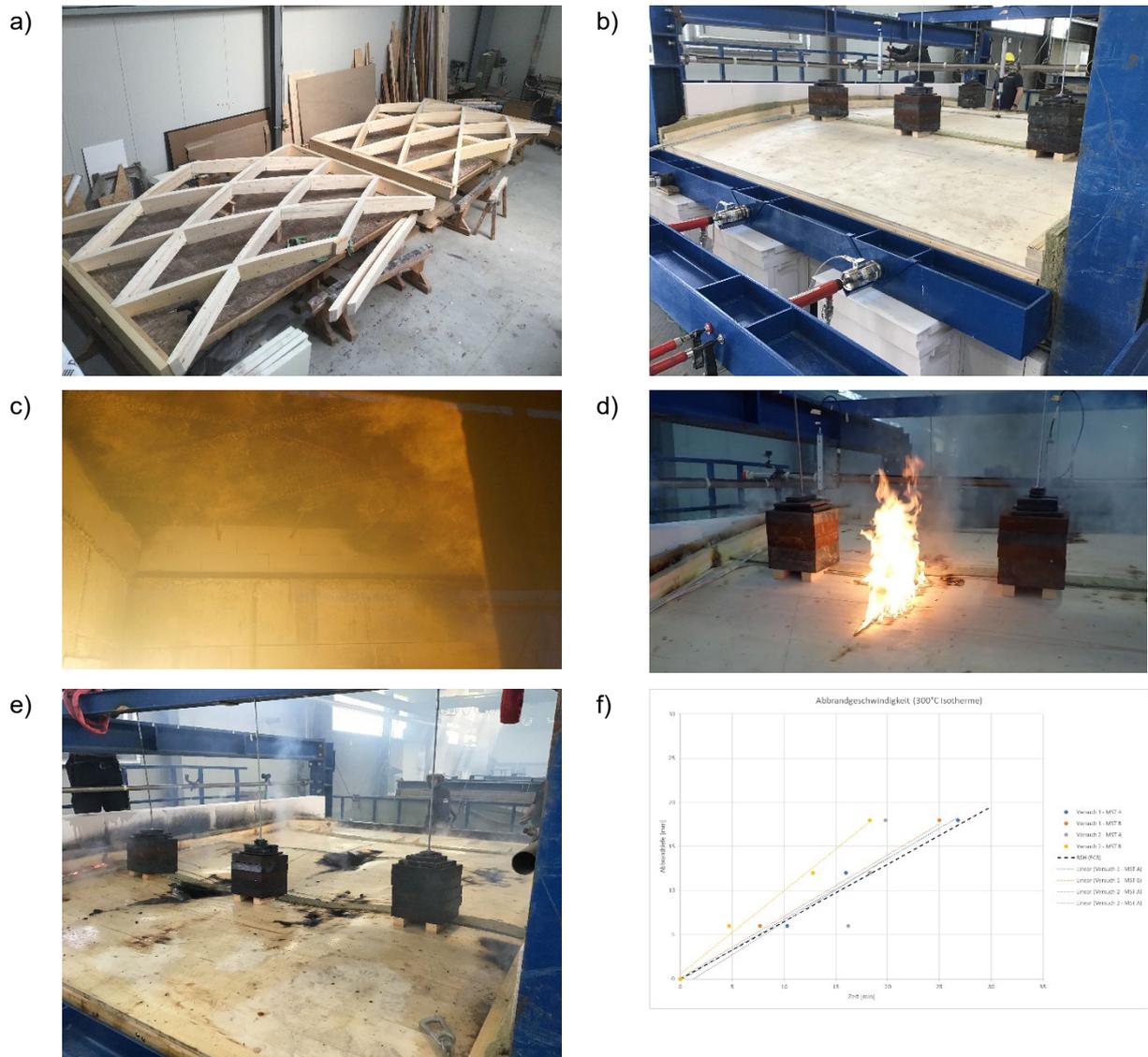


Abbildung 39: Brandversuche im Norm-Deckenbrandofen (Brandversuch nach DIN EN 1365-2)

Aus den Norm-Brandversuchen wurden folgende Ergebnisse für das belastete gekrümmte Tragwerke ermittelt:

- Einfluss der Toleranzen der Beflammungs- und Druckbedingungen im Prüfofen auf die Prüfkörper
- Abbrandraten Lamellen und Verbindungen (Knoten) sowie Beplankung aus Holzwerkstoffplatten (3-S-Platte gemäß Produktnorm DIN EN 13353)
- Schutz- und Versagenszeiten ( $t_{ch}$ ,  $t_f$  gemäß DIN EN 1995-1-2) von Bekleidungs- / Beplankungslagen inklusive der Auswirkung von Fugen
- Verhalten Knotenverbindung mit Stirnversatz und Beplankung (3-S-Platte) unter Brandeinwirkung

Die beiden Versuche zeigen, dass ein wesentlicher Einfluss der Beflammungs- und Druckbedingungen innerhalb des Prüfofens auf den Prüfkörper vorliegen. Nach DIN EN 1363-1, Abschn. 5.1.2 dürfen prozentuale Abweichungen auftreten. Der Vergleich beider Versuche zeigt, dass die Abweichung bei Versuch 2 über einen längeren Zeitraum vorliegt (vgl. Abbildung 40 und zu einem schnelleren Temperturdurchgang durch den Prüfkörper führt und in der Folge zum früheren Erreichen der Versagenskriterien führt. Zum Beispiel wurden Unterschiede im Temperaturdurchgang durch die obere Beplankung von bis zu vier Minuten gemessen.



**Abbildung 40:** Brandversuche im Großmaßstab  
 a) Vorbereitung Prüfkörper 1 + 2, b) Belastungseinrichtung – Totlasten vertikal und hydraulische Pressen horizontal, c) Brandversuch V1 – 11. Minute, d) Brandversuch V1 - Versagen Beplankung Prüfkörper durch Aufreißen in Spannrichtung, e) Brandversuch V1 - Verformung des Prüfkörpers nach Entlastung, f) Vergleich Abbrandrate – Lamelle unten (Messstelle A) / seitlich (Messstelle B) und Norm EC 5

Die vertikale Verformung des Prüfkörpers fällt bei dem ersten Prüfkörper durch die dreimal größere Horizontalkraft ebenfalls größer als bei dem zweiten Versuch. Aus dem ersten Versuch können zwei wesentliche Bereiche der Vorformungszunahme abgelesen werden. Zwischen der 15. und 20. Minute gibt es eine nahezu lineare Verformungszunahme. Danach steigt die Vorformung zunehmend bis zur 25,5. Minute an und geht dann in einen fortwährenden steilen Anstieg über. Dieser Zeitpunkt kann als Versagenszeitpunkt infolge Tragfähigkeitsverlustes angesehen werden. Der Raumabschluss war zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht.

Die Herleitung des Versagensmechanismus wird aus den weiteren Temperaturmessungen innerhalb der Knoten und der Beplankung / Bekleidung abgeleitet. Das Versagen des Stirnversatzes kann zum Zeitpunkt angenommen werden, wenn die 300°C-Isotherme die tiefste Stelle des Stirnversatzes erreicht. Der Zeitraum korreliert mit der steileren Verformungszunahme zwischen der 15. und 20. Minute. Ebenfalls erreichte die 300°C-Isotherme die zweite Lage der Beplankung (3-S-Platten). Ein kombinierter Einfluss kann hier nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Nach der 25,5. Minute und dem Übergang in den fortwährenden steilen Anstieg ist augenscheinlich auf die Beanspruchung der oberen Beplankung zurückzuführen. In den Feldern am Firstbereich kam in der 29. und 30. Minute zum Aufreißen der Beplankung, welche auf das Erreichen der Beanspruchbarkeit der Holzwerkstoffplatten infolge Zugspannung führte. Kurz davor kam zu sichtbaren Verformungen in den Feldern, die auf sich einstellende Stabilitätsprobleme (Beulen) durch die kontinuierliche Dickenabnahme der Holzwerkstoffplatten deuten.

Der Verlust der aussteifenden Wirkung der Plattenwerkstoffe wurde nach Wegnahme der Horizontallast ersichtlich. Die Rückverformung des Prüfkörpers zum Prüfofen war deutlich größer als im Vergleich zur Ausgangssituation.

Im Umkehrschuss bedeutet das, dass die Tragfähigkeit des Stirnversatzes unterhalb 20 Minuten anzusetzen ist. Als Verbesserung wird ein Fersenversatz vorgeschlagen. Die Versuche zeigten, dass in der Mittelachse des Stirnversatzes keine größere Schädigung vorhanden war. Der Fuge des Anschlusses bleibt durch die kontinuierliche Druckbeanspruchung innerhalb des Tragwerks geschlossen.

Der Einfluss der Beplankung auf die Tragfähigkeit ist von wesentlicher Bedeutung für die Spannweite des Tragwerks. Die Bemessung der Beplankung muss u.a. unter Berücksichtigung des Stabilitätsverhaltens in Abhängigkeit des Abbandes durchgeführt werden.

Hier müssen zwei Brandmodelle zur Bemessung des Tragwerks unterschieden werden:

#### 1) Nominelle Brandmodelle (Einheits-Temperaturzeitkurve)

Die Tragfähigkeit der Dachkonstruktion ist wesentlich abhängig von der Wirksamkeit des Schubfeldes der Beplankung. Die Beplankung übernimmt gleichzeitig die Aussteifung des Tragwerks und die Lagesicherung des Stirnversatzes sowie auch die Lastweiterleitung nach Versagen des Stirnversatzes am Knoten.

Für die notwendige Beplankung unter Normalbrandbedingungen ist eine Mindestdicke in Abhängigkeit von der Abbrandtiefe einzuhalten. Anhaltswerte liefert DIN EN 1995-1-2, Abschnitt 7.1.1.

#### 2) Parametrische Brandmodelle

Die Ergebnisse aus den Brandversuchen können nach den aktuellen Erkenntnissen für das Verfahren angewendet werden.

Im Primärbrandbereich wird eine Brandbeanspruchung gemäß nomineller Brandkurve (Einheits-Temperaturzeitkurve - ETK) angesetzt. Weiter entfernt erfolgt der Abbrand in Abhängigkeit von der angesetzten Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Der Versagenszeitpunkt einzelner Knoten wird an den Abbrand der Beplankung und Sicherstellung Stabilität (u.a. Beulverhalten der Beplankung) gekoppelt.

Der Nachweis des Gesamttragwerks unter Brandeinwirkung kann unter Berücksichtigung des Ausfalls einzelner Stäbe und Knoten geführt werden.

## **Arbeitspaket 7: Konzipierung eines flexiblen Interaktionsmodells für regional tätige KMU in Vorfertigung, Vormontage und Montage auf Basis digitaler Planungsdaten**

**AP 7.1:** Erarbeitung der Wertschöpfungskette sowie Identifikation und Erfassung der KMUs in einer Datenbank

Hierzu war zunächst eine umfangreiche Desk-Recherche als Grundlage geplant, um Unternehmen zu identifizieren und Kompetenzen dieser Unternehmen auf Basis veröffentlichter Daten zu erfassen. Weiteres Ziel ist es, Möglichkeiten der Zusammenarbeit zwischen den Betrieben in der Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“ darzustellen.

**AP 7.2:** Erfassung bisheriger Kooperations- und Interaktionsmodelle sowie Erarbeitung der Anforderungen an die Kooperation sowie an die Interaktionen zwischen den regionalen KMU auf organisationaler und technischer Ebene

Hierzu wurde eine Interviewstudie mit ausgewählten Unternehmen bzw. Stakeholdern (in AP 7.1 identifiziert) durchgeführt und die Anforderungen an erfolgreichen sowie flexiblen Kooperationsmodellen entwickelt. Dieser Arbeitsschritt setzte ein Verständnis der Geschäftsmodelle der kleinen Betriebe voraus, die im Rahmen der Interviewstudie erfasst wurden. Es ist davon auszugehen, dass die Kooperationsmodelle mit den Geschäftsmodellen der einzelnen Betriebe stark zusammenhängen.

**AP 7.3:** Entwicklung eines geeigneten innovativen Kooperationsmodells mit Fokus auf KMU im ländlichen Raum

Auf den Arbeitsschritt 7.2 aufbauend, wurden die erarbeiteten Anforderungen zu einem Modell überführt, welches die Zusammenarbeit zwischen den regional tätigen KMUs innerhalb definierter Kooperationen ermöglichen soll. Das Kooperationsmodell soll generisch und je nach Situation (z.B. Umfeld, Geschäftsmodelle) adaptierbar sein.

**AP 7.4:** Validierung und Reflektion über das Kooperationsmodell anhand des aktuellen Projekts

Das entwickelte Kooperationsmodell wurde prototypisch mit ausgewählten Betrieben getestet und validiert. In verschiedenen Arbeitssitzungen wurde die Praxistauglichkeit des Modells kritisch betrachtet. Beispielsweise sind wirtschaftliche, rechtliche sowie technische Fragestellungen zu berücksichtigen.

**AP 7.5:** Konzeption, Durchführung und Nacharbeitung einer Veranstaltung zur Netzwerkbildung

Geplant war es, Akteure (KMU, Verbände, Handelskammer) als Vertreter der gesamten Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“ einzuladen und für unser Forschungsvorhaben zu aktivieren, mit dem Ziel, Netzwerkstrukturen aufzubauen und zu unterstützen. Formate wie World Café und Speed Dating werden genutzt, um den Informationsaustausch zu fördern.

## Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik an einem Demonstrationsobjekt und Darstellung der Einzelergebnisse am Gesamtmodell

Zur Überprüfung der Prozesskette, sowie zur Verifizierung der entwickelten Segmentierungs- und Fügelogik wurde die Ausführung eines Demonstratorbaus im Maßstab 1:1 im Zeitplan vorgezogen. Es erschien sinnvoll, die Montageprozesse in kleinerer jedoch baustellengerechter Dimension zu prüfen.

Die Analyse und Dokumentation des Datenflusses und der Datenschnittstellen zur reibungslosen Überführung von Geometriedaten in Maschinencode durch die Firma STRAB hat stattgefunden und wurde an die Planer der HTWK und BWA weitergegeben. Die Fertigung der für den Demonstrator erforderlichen Elemente wurde vorbereitet. Bei Vorversuchen konnten bereits Erkenntnisse zur Anbringung der Dämmung auf der Schale gewonnen werden. Das neue Fügungsprinzip wurde hierbei geprüft.

Als ausführendes Holzbauunternehmen wurde durch die Firma STRAB innerhalb des AP8 die Fertigung der Lamellen via Abbund-Maschine ausgeführt. Auch das Herstellen der großformatigen Halbschalen-Elemente fand mit Unterstützung aller Projektpartner – im Besonderen im Zusammenspiel mit der HTWK Leipzig – statt.

Die Fertigung der Lamellen erfolgte im angedachten Prozessablauf vollautomatisch. Für die Fertigung des Demonstrators wurde die Umsetzung einiger Leitdetails in teilmanueller Weise vorangetrieben. Dabei erfolgte die Erstellung der Volumengeometrie auf der Basis der Modelldaten automatisch, die Steuerdaten für die Abbundmaschine wurden dann aus diesen Volumenmodellen in konventioneller Weise generiert.

Die geplante Geometrie des Auflagerbalkens in einem Stück erwies sich als problematisch für die Fügung mehrerer Segmente. Für die weitere Detailentwicklung ist es sinnvoller, die Lagerbalken in eine Lagerebene und erst bei der Montage einzusetzende Füllhölzer zu unterteilen. Diese Vorgehensweise wurde erfolgreich bei der Montage des Giebelbalkens erprobt.

Dieses Vorgehen der teilmanuellen Fertigung ermöglichte die schnelle Reaktion auf erkannte Probleme bei der Montage. Auf die Umsetzung in eine automatische Generierung der Fertigungsdaten auch für die bisher noch manuell erstellten Elemente wurde mangels Relevanz für den Projektabschluss verzichtet.

Die Segmente wurden im Anschluss auf das Gelände der MFPA Leipzig gefahren und dort mittels Autokran und Hubsteiger montiert. Dadurch konnte sowohl der Transport auf öffentlichen Straßen, als auch die theoretische Fügung unter realitätsnahen Praxisbedingungen getestet werden.

Für die Erprobung des Fensterdetails wurde zusammen mit BWA ein rautenförmiges Dachfenster angefertigt. Der Aufsatzrahmen des Fensters als Leitdetail wird dabei ebenfalls aufgrund der automatisch generierten Grundgeometrie manuell den Erfordernissen der Bauphysik und des Architekten angepasst.

Die manuelle Entwicklung dieser dreidimensionalen Details ist Grundlage der automatisierten Umsetzung im Planungsprozess.



Abbildung 41: Fertigung der Halbschalenelemente des Demonstrators in der Werkhalle der Fa. STRAB, Grafik @ FLEX, Marius Zwigart, M.A. | Architekt



Abbildung 42: Aufbau der Halbschalenelemente zum Demonstrator auf der Baustelle,  
Grafik @ FLEX, Dipl. Ing. Hannes Löschke, M.A.



Abbildung 43: Großdemonstrator einer Halle nach dem Prinzip ReFlexRoof (timberplan+),  
Grafik @ FLEX, Max Höhne, M.A.

Wie unter 1.) („ Aufzählung der wichtigsten Ergebnisse und anderer vorhabenrelevanter Ereignisse“) beschrieben, wurden im Rahmen der Denkmal-Messe 2022 Durch die Firma STRAB innerhalb des AP8 zwei weitere *TimberPlan+* Segmente gefertigt und einer breiten Öffentlichkeit präsentiert.

Bei der Fertigung wurde abweichend zum bisherigen Verfahren geprüft, ob die Lamellen grundsätzlich zu einem fugenfreien Verbund zusammengesetzt werden können. Die Lamellen wurden entsprechend nur an den Randkanten fixiert und im Übrigen frei auf der Schale positioniert. Im Ergebnis konnte die Passgenauigkeit der Lamellen untereinander verbessert werden. Es blieb jedoch eine Fuge bestehen, die sich nicht durch weitere Verschiebung der übrigen Lamellen schließen ließ.



Abbildung 44: Fertigung der Halbschalenelemente des Demonstrators mit Bauteilen der Fa. STRAB,  
Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Marius Zwigart, M.A. | Architekt



Abbildung 45: Fertigung von zwei Halbschalen nach dem Prinzip ReFlexRoof (TimberPlan+)  
für die Denkmalmesse 2022,  
Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Marius Zwigart, M.A. | Architekt

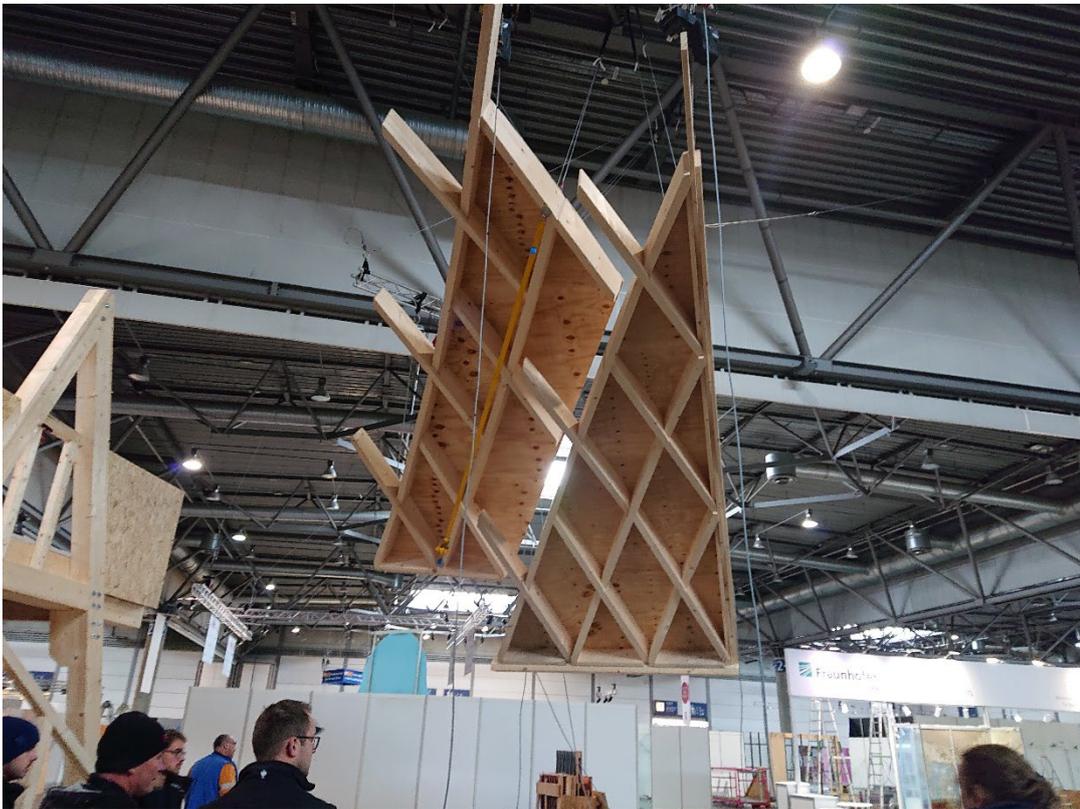


Abbildung 46: zwei Halbschalen nach dem Prinzip ReFlexRoof (TimberPlan+)  
auf der Denkmalmesse 2022

Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.

Eine Überprüfung der Passgenauigkeit der Segmente untereinander war aufgrund des geplanten Messeaufbaus nicht möglich. Die Segmente wurden unabhängig von der Hallendecke abgehängt.

Da weiterhin unklar ist, ob die verbleibenden Fugen im Segment auf Ungenauigkeiten der Positionierung oder auf die bekannten Genauigkeitsgrenzen der CNC-Bearbeitung zurückzuführen sind, wurde der Versuch unternommen, die gefertigten Lamellen zu vermessen.

Einer direkten Vermessung sind die Lamellen nur schwer zugänglich, da die bearbeiteten Flächen in der Regel windschief zueinander sind. Die Endpunkte gerader Kanten sind nicht systematisch zu erfassen.

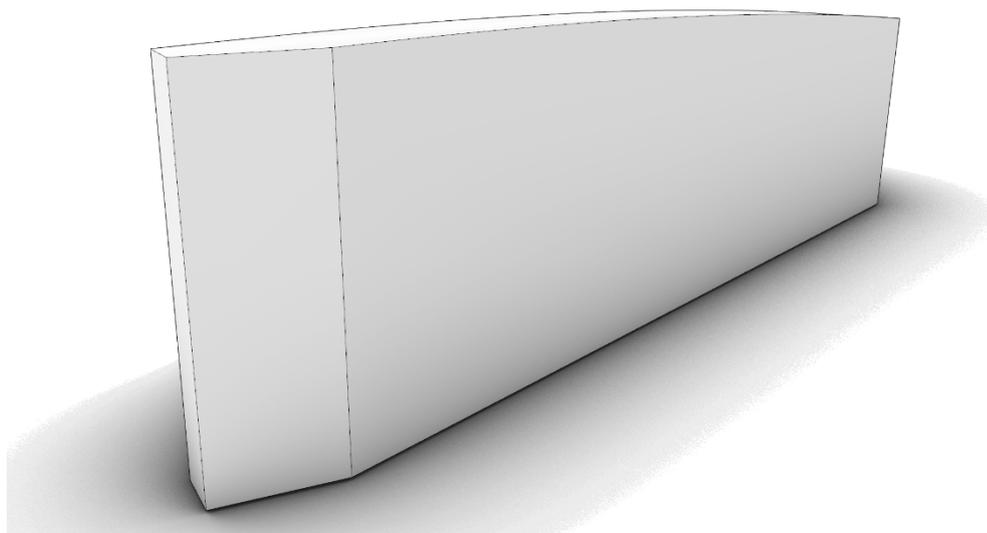


Abbildung 47: theoretische Lamelle ohne Fase aus (Roh-) Holzproduktion

Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.

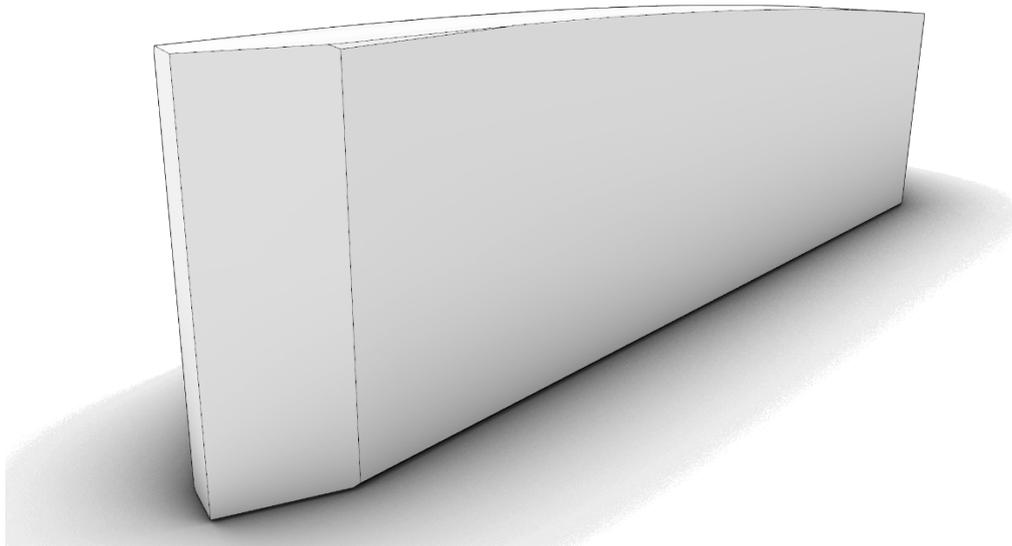


Abbildung 48: theoretische Lamelle mit Fase aus (Roh-) Holzproduktion  
Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.

Unter Einsatz eines Artec LEO 3D Scanners wurden die gefertigten Lamellen digitalisiert. Der LEO-Scanner erzeugt mit Laserdistanzmessungen Teilpunktwolken in einem Abstand von 0,5 m bis 1 m und einer abgetasteten Fläche von etwa A3. Der Scanvorgang selbst erlaubt dabei die Erfassung kleinster Oberflächenrauigkeiten.

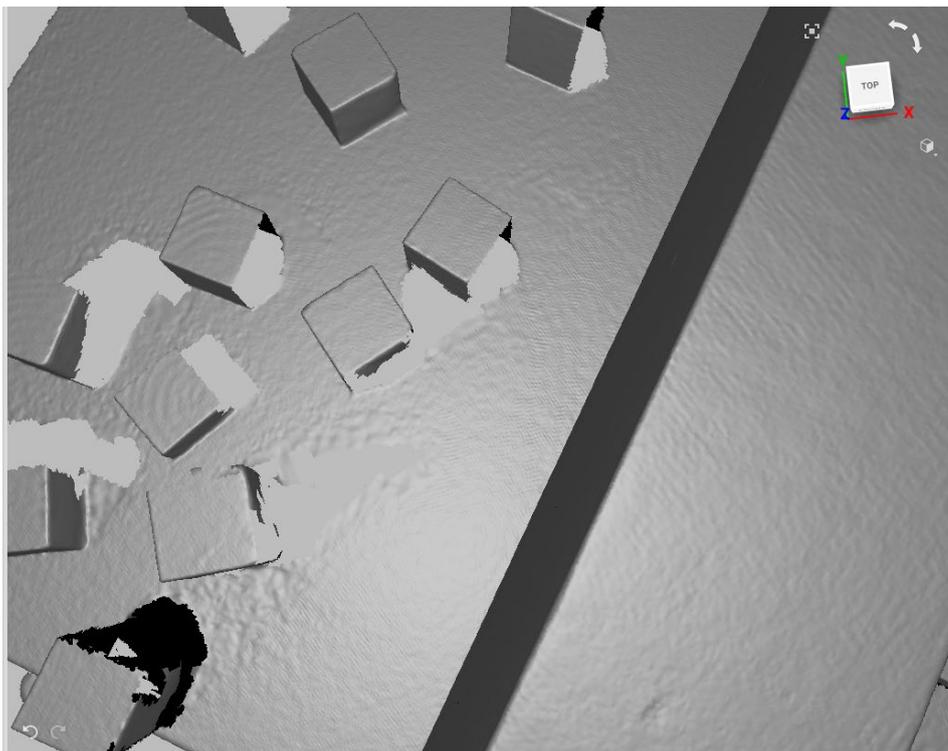


Abbildung 49: (Teil-) Scan aufgenommen mit dem Artec LEO 3D Scanner  
Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.

Da die Flächen der Lamellen so niemals in einer Einzelmessung erfasst werden, muss das gesamte Objekt durch Überlagerung mehrerer Abtastvorgänge rekonstruiert werden. Zusätzlich zum absoluten Messfehler der Einzelmessung entsteht ein Fehler bei der Zusammensetzung der Teilflächen.



*Abbildung 50: gescannte Lamelle (Ergebnis des Scans mit dem Artec LEO 3D Scanner)  
Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.*

Zur Unterstützung der Abtastung und der Rekonstruktion wurden im Umfeld der Lamellen Holzwürfel positioniert. Zum Abgleich der absoluten Größe wurden zudem zwei Leisten mit bekannter Länge abgelegt. Obwohl der Scan grundsätzlich maßgetreu erscheint, konnte so die absolute Skalierung der Scans überprüft und korrigiert werden. Die Skalierung erfolgte für 8 Scans des gleichen Lamellentyps.



*Abbildung 51: Versuchsaufbau „Scan Lamelle“  
Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.*

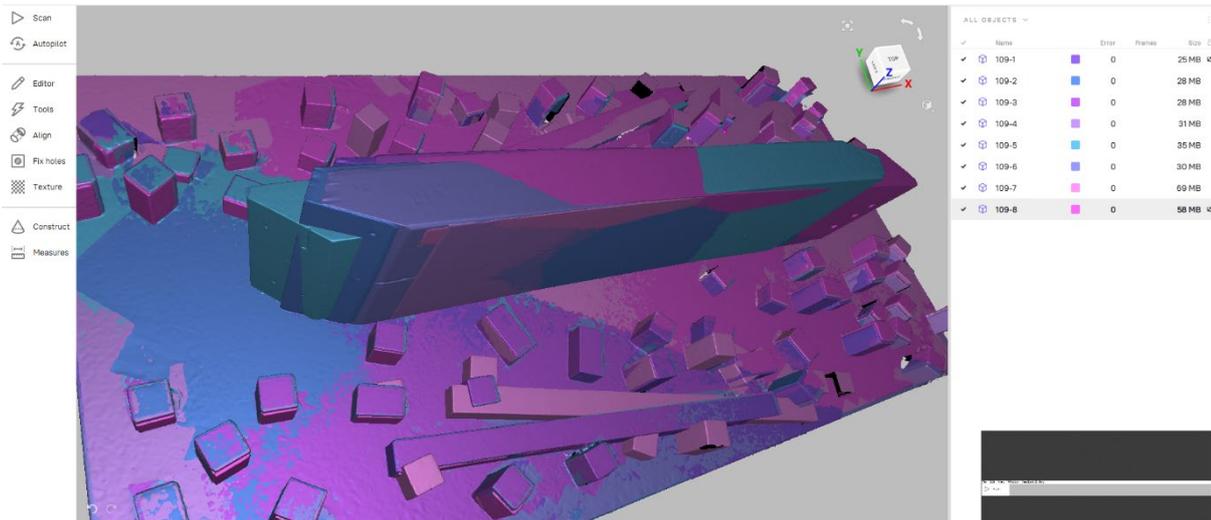


Abbildung 52: Überlagerung der einzelnen gescannten Lamellen  
 Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.

Die Scans waren im Mittel um 0,6% zu groß. Die Standardabweichung der Skalierung betrug 0,28%.

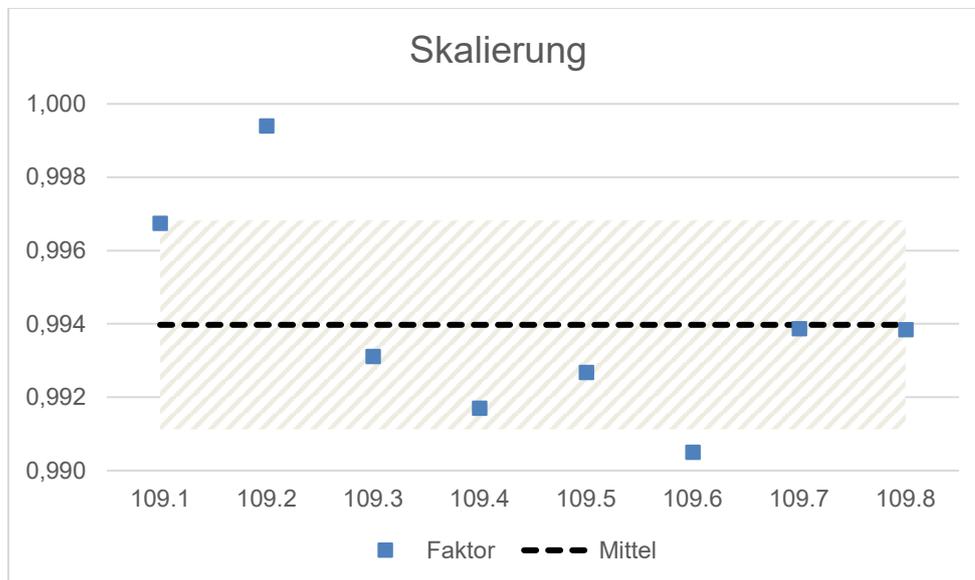


Abbildung 53: Auswertung der Abweichung der einzelnen gescannten Lamellen  
 Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Dipl.-Ing. Hannes Löschke, M.A.

Da sich auch nach dem Abgleich der Skalierung Differenzen auf der Tischgeometrie ergeben, kann nicht abschließend geklärt werden, wie groß der Fehler des Scanvorgangs ist. Da die beobachtbaren Abweichungen im Millimeterbereich liegen, muss festgestellt werden, dass die Technik nicht ausreichend präzise ist, um die Maßhaltigkeit der gefertigten Lamellen zu überprüfen.

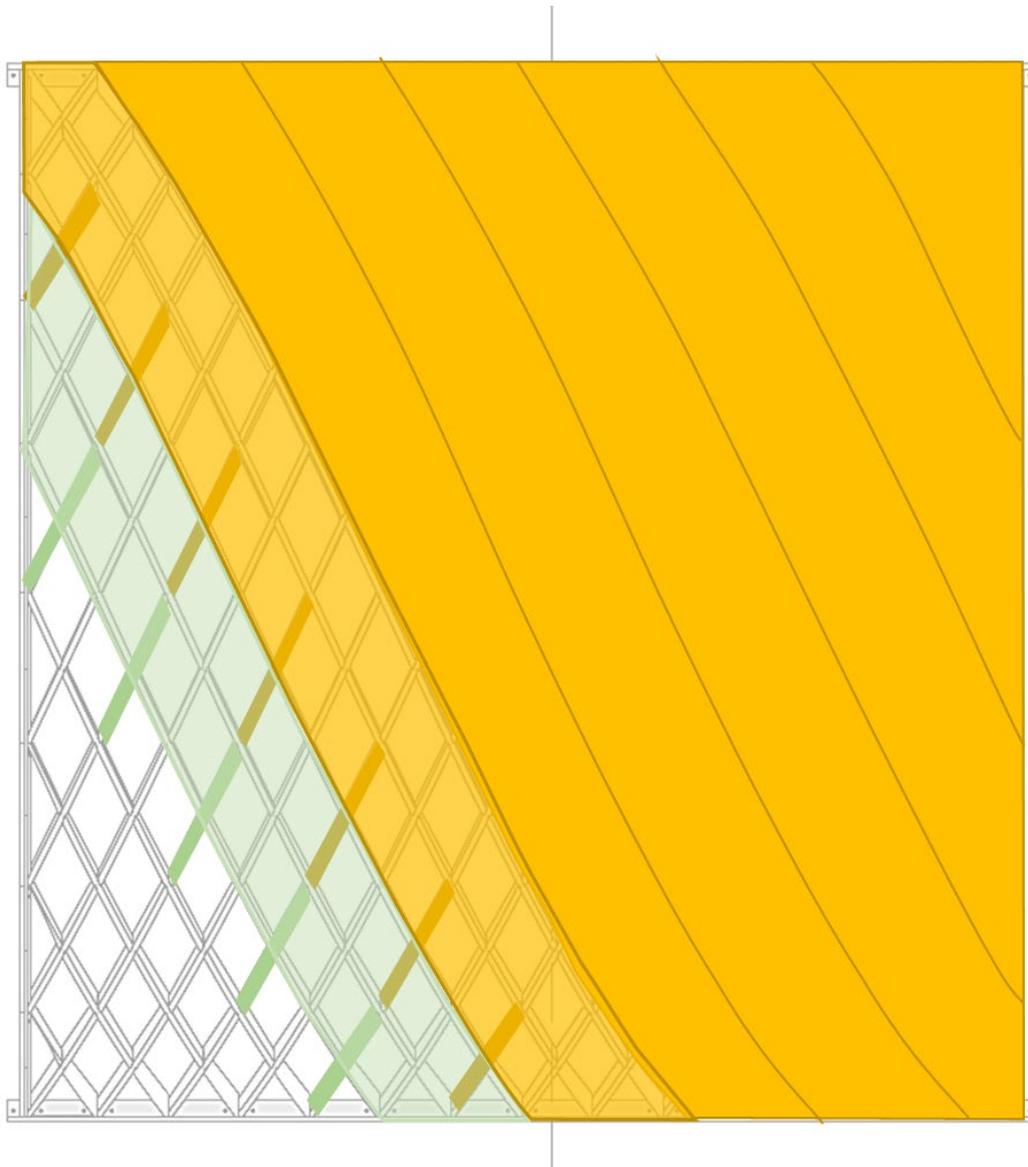
Als weiterer Meilenstein kann die finale Fertigstellung des Großdemonstrators inkl. Details wie Dachfenster (Spezialanfertigung „Raute“) und Dachdeckung aus Stehfalzblech gewertet werden.



*Abbildung 54: Großdemonstrator einer Halle nach dem Prinzip ReFlexRoof (TimberPlan+) auf dem Gelände der MFPA Leipzig inkl. Dacheindeckung und Rautenfenster, Grafik: FLEX @ HTWK Leipzig, Marius Zwigart, M.A. | Architekt*

Aufgrund der Fertigungs-/ Montage-Toleranzen, die sich beim Bau des Demonstrators aufgezeigt und manifestiert haben – besonders der teilweise fehlende Formschluss des MVK – muss die Beplankung einen deutlich größeren Anteil bei der Lastabtragung des Gesamtragsystems übernehmen, als bisher angenommen. Das Verhalten lässt sich aktuell daran vermuten, dass die Lamellen mit der verklammerten verformten Beplankung beim Herausheben aus der vorgehaltenen Schalung in der Fertigungshalle nicht formstabil bleiben. Die für die Montage verformte Beplankung kann sich teilweise zurückverformen, da die Steifigkeit der Klammer nicht ausreichend ist, um der Rückverformung entgegenzuwirken. Auf der Baustelle zeigen sich dann merkbare Toleranzen in Form von nennenswerten Fugen zwischen den segmentierten Elementen. Es wird aktuell daran gearbeitet, diese Umstände und die damit zusammenhängende Prozesskette zu optimieren.

Von Seiten des iBHolz sind die Fugen, die am MVK durch den Umstand der Elementierung in der Fertigung entstehen, vermessen worden (Abbildung 55). Die genauen Erkenntnisse wurden in einer studentischen Arbeit ausgewertet und dokumentiert.



*Abbildung 55: Belegung der Plattenelemente über das gekrümmte Dachtragwerk in Form von Elementstreifen*

Zur Erläuterung der nachfolgenden Abbildung 56 ist in der Abbildung 55 die Plattenbelegung in Form von Streifen über das Tonnendach gegeben. Hier ist zu erkennen, dass die Elementstreifen jeweils eine auskragende Lamelle besitzen, die nur zur Hälfte in der Fertigung beplankt und auf der Baustelle an das nebenliegende Element montiert wird. Deutlich wird dies am grün-transparenten Element, das sich an das nebenliegende braun-transparente Element fügt. Das grüne als auch das braune Element haben jeweils eine auskragende Lamelle. Diese sind farblich gesättigt dargestellt. Um also einen Elementstreifen zu fügen, muss die auskragende Lamelle des eben genannten Elementes auf der Baustelle an die Beplankung des nächsten Elementes über eine Klammerverbindung befestigt werden. Durch diesen Umstand kam es zu größeren Fugen an bestimmten Stellen des Tragwerks, die nachfolgend dokumentiert sind.

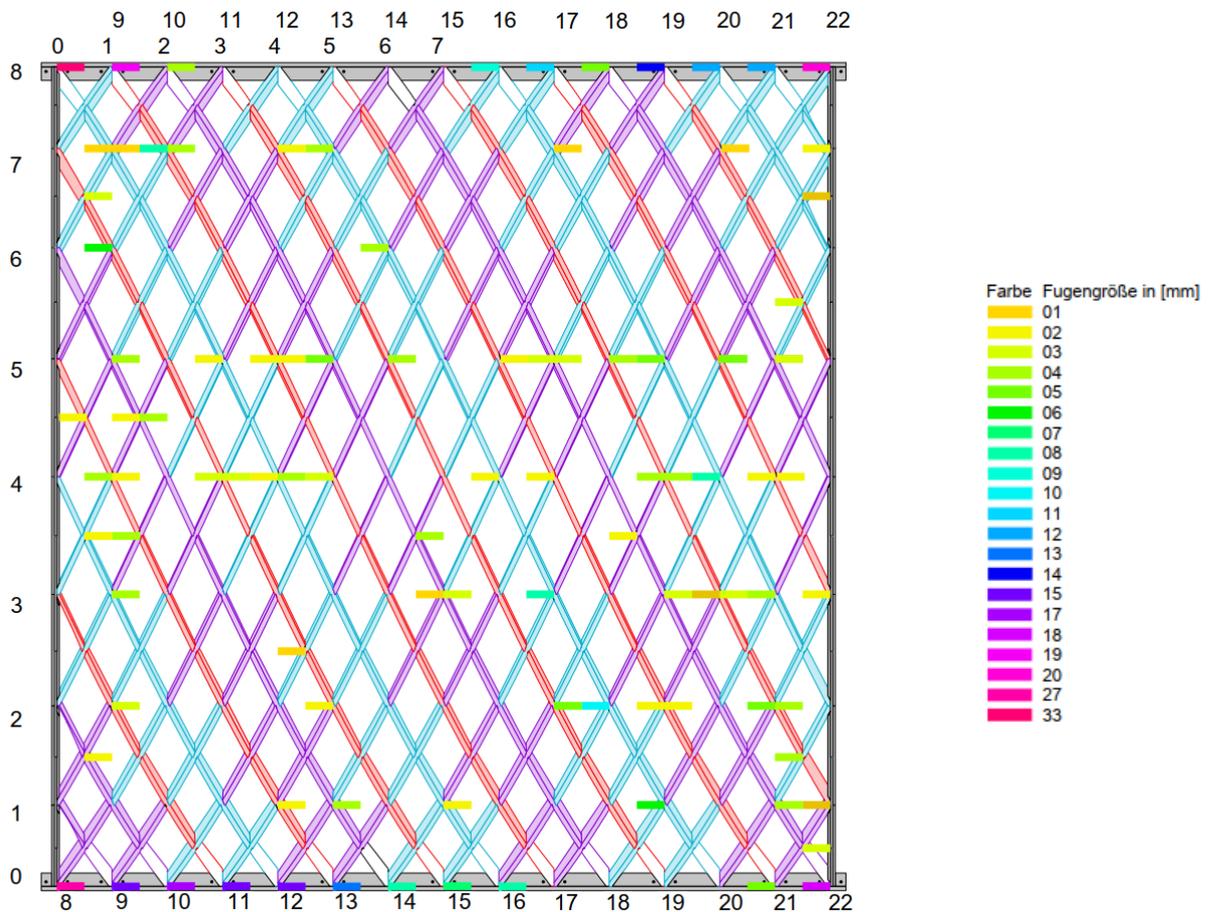


Abbildung 56: Abbildung zu den unterschiedlichen Fugengrößen (farbig markierte Balken an Knotenpunkten)

Rot dargestellt sind die Lamellenzüge, die Montage-/ Elementstöße und damit Plattenstöße wiedergeben. Die blauen und lila eingefärbten Lamellen sind die Lamellen, die jeweils an einem Element befestigt sind. Die Montage der Lamellen fand über Elementstreifen statt. Auf einen blau markierten Elementstreifen folgte also ein nebenliegendes Element mit einem lila markierten Elementstreifen. Dort wo lila und blau markierte Lamellen aufeinandertreffen, sind somit oftmals Fugen zu erwarten. Dies kann im obenstehenden Bild in den allermeisten Fällen auch festgestellt werden.

Alle vorhandenen Fugen sind anhand der beigefügten Farblegende (rechts) in obenstehender Abbildung dokumentiert. Die eingefärbten Balken an den Knoten spiegeln die Fugengröße wider. Dabei ist zu erkennen, dass vor allem an den Auflagerpunkte deutlich große Fugen entstanden sind. Innerhalb des Demonstrators verteilen sich die Fugengrößen in einem Bereich von 1 mm bis ca. 10 mm. Insgesamt zeigte das Ergebnis, dass bei 19 % aller Knoten Fugen vorhanden waren. Weitere Ergebnisse sind in einer studentischen Bachelorarbeit zu finden und sind dem Projektteam zugänglich.

### Überprüfung der Machbarkeit der Details

Des Weiteren sind die Details, die im vorangegangenen Arbeitspaket 3 beschrieben wurden, für den Demonstrator bemessen und getestet worden. Dabei wurden keinerlei Problematiken festgestellt.

## **2. Verwertung**

### **a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen**

Es wurden keinerlei neu Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen oder Schutzrechte erteilt. Das bereits bestehende Patent (mit der Nummer DE 10 2017 008 746 A1) zum Mikro-Versatz-Knoten wurde nur inhaltlich näher untersucht, nicht verändert.

### **b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Das Dachtragwerk ReFlexRoof und die dazugehörige Standardisierung des Tragwerks zeigen großes Potential für eine erfolgreiche Durchsetzung im deutschen als auch europäischen Markt. Das Tragwerk, welches architektonisch als auch historisch bedingt aus der Masse heraussticht, kann sich damit auch in anderen Gebäudenutzungssektoren (wie Sport- und Versammlungshallen) fortsetzen. Die Nutzung eines digitalen parametrischen Modells ist, rein wirtschaftlich betrachtet, eine schnelle und einfache Möglichkeit, Schnittstellen miteinander zu verknüpfen und agieren zu lassen. Vor allem der fertigungstechnische Abbund kann durch die Datenübermittlung der Volumenkörper großes Potential schöpfen, dass sich in den nächsten zwei bis drei Jahren noch weiterentwickeln und in weitaus schwierigen Abbundsszenarien einsetzen lassen wird.

### **c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Mit der technischen und wissenschaftlichen Auseinandersetzung von komplexen Tragwerken werden im Holzbau neue Wege bestritten, zu denen es noch wenig bis gar keine Erkenntnisse gibt. Die modelltechnische Abbildung wird in den nächsten Jahren deutlich zunehmen. Dahingehend wird ein konkreter Forschungsbedarf auch in den nächsten fünf bis zehn Jahren zu komplexen Tragwerken vor allem im Bereich der Steifigkeiten und Nachgiebigkeit nötig sein. Zusätzlich zeigt sich, dass auch Holz ohne eine hohe Anzahl an metallischen Verbindungsmitteln auskommen kann. Auch hier wird in den nächsten ein bis zwei Jahren noch intensivere Forschung notwendig, die jedoch jetzt schon mit erfolgreichen Potentialen begründet werden kann.

Zudem konnten die Klimabedingungen und Holzfeuchten in verschiedenen Ställen und Lagerhallen auf Grund von Recherchen und Messungen zusammengestellt werden. Die Messungen in mehreren landwirtschaftlichen Gebäuden haben die Datengrundlage erweitert. Damit ist eine zuverlässigere Planung in Bezug auf Statik und Holzschutz möglich. Zudem konnten ausgiebige Informationen zur Messung von Holzfeuchten zusammengestellt werden. Die Erkenntnisse werden Unternehmen, Firmen und Forschungsstellen im Rahmen eines Forschungsberichts noch in diesem Jahr zur Verfügung gestellt.

### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Der Übergang der Modelle zwischen Architektur (CAD) und Statik (CAE) erfordert noch tiefergehende Untersuchungen. Bei der 3D-Modellierung werden Fragestellungen aufgerufen, die in der Tragwerksplanung nur mit zeitintensiven Arbeitsschritten in statisch sinnvolle und funktionable Modelle überführt werden können. Die Problematiken und zeitkritische Aspekte sind zu dokumentieren und Lösungsstrukturen können anhand der vorliegenden Tragstruktur erarbeitet werden. Die Findung einer stringenten und möglichst robusten Methodik ist durchaus auch für andersartige Tragsysteme im Holzbau von großer Relevanz. Es benötigt eine grundsätzliche Plattform, die hierfür verwendet werden kann. Aktuell gibt es dafür keinerlei Möglichkeiten. Auch die Abbildung durch BIM ist derzeit noch zu wenig ausgereift, als damit wirtschaftliche Ergebnisse geschaffen werden können. Eine nächste Phase wäre hinsichtlich der digitalen Parametrisierung die Erstellung einer Plattform, die generationsfähig ist, so dass Neuerungen von Schnittstellenprogramme leicht eingearbeitet werden können.

Das ReFlexRoof als innovatives Dachtragwerk kann wirtschaftlich durchaus auch in anderen Gebäudenutzungsarten (z. B. im Bereich der Sport- und Versammlungsstätte) als architektonisches und historisch wichtiges Tragwerk angewendet werden. Dabei ist es jedoch notwendig, sich nochmal mit den technischen Erkenntnissen auseinander zu setzen. Aktuell sind größere Spannweiten noch nicht einwandfrei möglich. Deshalb muss das Trag- und Verformungsverhalten nicht nur in den Knoten, sondern auch am Gesamttragwerk näher untersucht und im Nachgang in der Konstruktionsweise optimiert werden. Der Prozess zu einer wirtschaftlicheren und auch wissenschaftlichen Lösung kann mit einem Zeithorizont von drei bis vier Jahren abgeschätzt werden. Dahingehend können auch Dauerstandversuche geführt werden, die darüber hinaus zu einem Bemessungskonzept führen können.

Der Klammerverbund scheint aktuell nicht die beste Lösung für die Verbindung der Lamellen zur Beplankung zu sein. In den Versuchen zeigte sich, dass die elastische Tragfähigkeit recht schnell erreicht wird. Da die Versuche nicht auf die Untersuchung des Klammerverbunds ausgelegt waren, sollte die Schubverbindung nochmals genauer an einem gekrümmten bzw. längerem Element untersucht werden. Das axiale Ausziehen der Klammer scheint keine dauerhafte Verbindung zu sein. Es sollte dahingehend an eine Optimierung der Verbindung zwischen Beplankung und Lamelle gedacht werden.

Bei den Brandschutzversuchen sollte der Raumabschluss nochmalig überdacht und entsprechend untersucht werden. In den Versuchen versagte das Kriterium des Raumabschlusses zuerst, so dass der Versuch nicht weitergefahren wurde. Es bleibt daher die Frage, welches Verhalten der Knotenpunkt noch bereitgehalten hätte. Dies ist an einem weiteren Brandexperiment zu evaluieren.

Das einwandfreie Fügen der Elemente auf der Baustelle führte bis jetzt zu keiner zufriedenstellenden Lösung. Auch hier ist eine tiefgehendere Beschäftigung mit der Fügungsmechanik notwendig.

Die Verbindungsmittellanzahl kann aktuell nicht im digitalen Modell implementiert werden. Eine Abbildung hängt mit vielen Faktoren zusammen, die die Parameteranzahl in der Rechenleistung womöglich übersteigen und dahingehend zu keiner sinnhaften Anwendung führen wird. Hier ist denkbar eine weiterführende Programmierung mit bspw. Python vorzunehmen, die eingehenden bemessungsrelevanten Einflussfaktoren separat einzupflegen und eine jeweilige individuelle Lösung abseits des großen Modells anzubieten.

### 3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Projektlaufzeit sind dem Projektteam keine Erkenntnisse Dritter bekannt geworden.

### 4. Veröffentlichungen

Während des Projektzeitraumes wurden 9 Veröffentlichungen der einzelnen Projektpartner publiziert. Diese teilen sich wie folgt auf:

#### hbp

[1] Kehl, D.: Richtige Messung der Holzfeuchte - Grundlagen für Sachverständige, Beitrag in der Zeitschrift Holzbau – die neue quadriga, Ausgabe 04-2022, Kastner-Verlag, Wolnzach 2022

[2] Kehl, D.; Krawczyk, N.: Schlussbericht TimberPlan+ mit dem Arbeitspaket: Hygrothermisches Verhalten von Holzbauteilen in landwirtschaftlichen Gebäuden und Entwicklung von Anschlussdetails, Eigenverlag, Leipzig (noch unveröffentlicht – Voraussichtlich: Ende 2023)

#### HTW Dresden:

Folgende Veröffentlichungen wurden während der Projektlaufzeit erstellt:

[3] A. Stahr, C. Heidenreich, A. Kilian, C. Dijoux, L. Franke and R. Hallahan, "Load test on ribbed timber shells for medium span roofs", in *Proceedings of the IASS Symposium 2020/21*, Guilford, 2021.

[4] C. Heidenreich, A. Kilian, J. Büttner, S. Scherer, „Derivation of wind loads for shell structures using CFD analyses“, in: *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023*, Melbourne, 2023.

[5] C. Heidenreich, J. Büttner, A. Kilian, „Parametric analysis of “zollinger type“ ribbed timber shells“, in *Journal of the international association for shell and spatial structures*, 2023.

Des Weiteren sind Veröffentlichungen, u.a. in Zusammenarbeit mit Projektpartnern, zum Thema Modellierung, Brandversuche und Tragverhalten bei Öffnungen geplant.

## TU Braunschweig:

Im Rahmen der World Conference on Timber Engineering (WCTE) wurden im Juni 2023 Ergebnisse zu den prüftechnischen Untersuchungen des axialen Trag- und Verformungsverhalten des MVK vorgetragen und in Form eines Papers in den zugehörigen Proceedings veröffentlicht:

[6] Vögele, K., Tronnier, M., Plüss, Y., & Sieder, M. STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND DEFORMATION BEHAVIOUR OF AN ADVANCED CARPENTRY CONNECTION IN TIMBER CONSTRUCTION.

DOI: 10.52202/069179-0199

Weitere Veröffentlichungen sind im Nachgang zum Forschungsprojekt zu Untersuchungen der Klammerverbindung und der Entwicklung eines Stabwerkmodells für das ReFlexRoof geplant.

## HTWK Leipzig:

[7] Löschke H., Stahr A., Schröder T. H., Schmidt-Kleespies F., Hallahan R., Segmentation and assembly strategy for lamella roof shell structures, in Inspiring the Next Generation - Proceedings of the International Conference on Spatial Structures 2020/21 (IASS2020/21-Surrey7), Behnejad S. A. et al, (eds.), Spatial Structures Research Centre of the University of Surrey 2021, 2800-2808.

[8] Stahr A., Dijoux C., Franke L., Tremel M. and Bialozyt J., Der Mikroversatzknoten - eine innovative Holzverbindung, Bauen mit Holz, 2019; 3; 22–29.

[9] Stahr A., Schmidt-Kleespies F., Zwigart M., Löschke H., Landwirtschaftliches Bauen mit Holz Bauen mit Holz, 2020; 5; 30–37.

Darüber hinaus erfolgte im Auftrag des Gesamtverbundvorhabens eine filmische Begleitung des Projektes durch Christian Kortüm und Falko Schuster (ehem. *newsdoc3*)

[10] Kortüm Ch., Schuster F. (2021), TimberPlan+ | Holz als Baustoff für landwirtschaftlich genutzte Gebäude | FLEX.research, veröffentlicht am 22.10.2021 <https://www.youtube.com/@flexresearch1297>, abgerufen am 31.01.2024

[11] Kortüm Ch., Schuster F. (2022), TimberPlan+ | Dokumentation zum ersten Versuchsdemonstrator | FLEX.research, veröffentlicht am 13.01.2022 <https://www.youtube.com/@flexresearch1297>, abgerufen am 31.01.2024

Zwei weitere Film-Teile zum Thema Brandschutz und fertiger Konstruktion wurden abgedreht und auf Messen gezeigt (Denkmal Leipzig, EASTWOOD). Eine Veröffentlichung auf dem youtubekanal der Forschungsgruppe FLEX an der HTWK Leipzig ist darüber hinaus fest eingeplant.

# ANHANG

## Teilvorhaben 1: Entwicklung digital basierter Planungsprozesse für Holzkonstruktionen

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Rahmen des Teilvorhabens 1 soll ein effizienter digital basierter Planungsprozess für Holzkonstruktionen entwickelt werden.

Hierzu sind folgende wesentliche Arbeitspakete umzusetzen:

1. Projektkoordination
2. Entwicklung eines digital basierten Gesamtmodells auf Basis der erstellten Varianten für Dachtragwerke
3. Rekursive Analyse, Beschreibung, Systematisierung der Prozesskette von Montage der Dachelemente bis zu Vorplanung/ Grundlagenermittlung
4. Definition der Inhalte der Leistungspakete unter Berücksichtigung fachlich-organisatorischer Schnittstellen, Abhängigkeiten
5. Entwicklung eines Workflows auf Basis durchgängiger Daten- bzw. Informationsketten unter Berücksichtigung zeitlicher, organisatorischer Randbedingungen
6. Abbildung des Workflows in einem parametrischen Strukturmodell
7. Implementation bzw. Integration der Teilleistungen in das digital basierte Gesamtmodell
8. Entwicklung und Evaluierung einer gekoppelten, digital basierten Herstellungs-, Vorfertigungs- und Montagestrategie
9. Herstellung der Prüfkörper sowie Vorbereitung und Durchführung von Brandversuchen
10. Aufbereitung der gewonnenen Erkenntnisse zur Anwendung im integralen Planungsprozess
11. Evaluierung der Planungsmethodik an einem Demonstrationsobjekt und Darstellung der Einzelergebnisse am Gesamtmodell

### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

#### Arbeitspaket AP1 Projektbegleitende Maßnahmen

Die erste Aufgabe war die Ausarbeitung und spätere Überwachung eines Kooperationsvertrags. Regelmäßige Projekttreffen mit schriftlichen Protokollen wurden von der HTWK organisiert. Die Projektpartner fertigten gemeinsame Zwischenberichte über den aktuellen Stand der Entwicklung an und stellten diese dem Projektträger zur Verfügung.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden in Form von Veröffentlichungen, Vorträgen in Absprache mit den Kooperationspartnern veröffentlicht.

In mehreren Videobeiträgen der Produktionsfirma *newsdoc3* wurde das Forschungsvorhaben medial festgehalten. Die Beiträge wurden über die entsprechenden Websites der HTWK Leipzig, der TU-Braunschweig und des Fraunhofer IMW publiziert. Ebenso wurden die Filme auf verschiedenen Messen (z.B. Denkmal 2022, SPIN 2030, EASTWOOD Leipzig 2022 und 2023) auf Messeständen der Projektpartner gezeigt.

Durch den Großdemonstrator sowie zwei im Rahmen der Denkmal Messe 2022 gefertigte Segmente wurden die Projektergebnisse einem breiten Publikum zugänglich gemacht.

#### Arbeitspaket AP2: AP2.3 Digitales Gesamtmodell

Unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen von landwirtschaftlich geprägten Gebäuden wurde ein digital basiertes Gesamtmodell entwickelt. Die Entwicklung eines digital basierten Gesamtmodells auf Basis der in den vorgelagerten Arbeitspaketen untersuchten Varianten.

#### Arbeitspaket AP3 Planungsmethodik

Inhalt des Arbeitspaketes 3 war der Entwurf einer Planungsmethodik für ein in flexibel adaptierbares, ressourceneffizientes Bausystem aus Holz. Hier bei stand zunächst die Konzipierung einer alternativen Organisationsstruktur für einen konstruktionsbezogenen Planungsprozess unter Berücksichtigung der Interaktion der Planungsbeteiligten im Vordergrund.

Die rekursive Analyse, Beschreibung und Systematisierung der Prozesskette von der Montage der Dachelemente bis zur Vorplanung/Grundlagenermittlung erfolgte parallel zur Implementierung in das digitale Gesamtmodell.

Die Übergabe von „plattformunabhängigen“ Fertigungsdaten aus den abgestimmten erfolgte über das Gerätespezifische Datenformat der Abbund-Maschine. Weitere Fertigungsdaten wurden in Form von Zuschnitt- und Abwicklungszeichnungen der Deckschale erzeugt und an den Lieferanten übergeben-

Zur Entwicklung einer NC-gestützten, automatisierten Herstellungsstrategie für die Vorfertigung der Bauteile der Dachkonstruktion im Werk wurden grundlegende Festlegungen aus den AP 3, die die Variabilität des Holzstabdaches in Abhängigkeit von der Nutzung und Größe des Gesamtbauwerkes betreffen, in das Modell übernommen.

Die gekoppelte, digital basierten Herstellungs-, Vorfertigungs- und Montagestrategie wurde im Rahmen des Forschungsprojektes fortlaufend an der Bereitstellung der Versuchskörper getestet, die für die Brandversuche benötigt werden.

Der finale Test erfolgte anhand des Demonstrationsobjektes, welches auf dem Gelände der MFPA Leipzig errichtet wurde.

### **Arbeitspaket AP8 Evaluation**

Aufbauend auf allen APs und zur Überprüfung der einheitlichen digitalen Planungsmethodik wurde ein Demonstrationsobjekt produziert, transportiert und montiert. Der Grundriss des Objektes beträgt etwa 12m Länge und 12 m Spannweite.

Hierbei wurde der Entwurf, die Planung und Realisierung eines großmaßstäblichen Demonstrators erprobt und die Planungsmethodik evaluiert.

Es erfolgten am finalen Demonstrationsobjekt Bewitterungsbeobachtungen, Feuchtemessungen sowie eine Vermessung der Fugengeometrie.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Im Ergebnis der Teilvorhabens steht ein teilautomatisiertes digitales Gesamtmodell, das wesentliche Teile der Planungsmethodik abbildet.

Die Datenübergabe an die Statik wurde mit vollständigen Gitternetzen erfolgreich erprobt. Eine Ergänzung für unvollständige Schalen mit Ausschnitten beispielsweise für Tordurchfahrten konnte im Rahmen des Projektes nicht implementiert werden.

Die Ausgabe von Fertigungsdaten an die Produktion konnte mit den gerätespezifischen Datenformaten erfolgreich getestet werden. Eine Erweiterung der unterstützten Maschinen ist aufgrund des Modularen Aufbaus des Modells möglich.

Die hinterlegten Geometriebeschreibungen können für Visualisierungszwecke als 3D Volumengeometrie in verschiedenen Datenformaten exportiert werden.

Im Rahmen der Produktion des Großdemonstrators wurden verschiedene Fügestrategien untersucht, die zuvor theoretisch und im Modell erfolgreich getestet wurden. Im Großmaßstab zeigt sich ein erheblicher verbleibender Einfluss von Maßtoleranzen in der Produktion. Die umgesetzte Segmentierungsstrategie lässt sich im Vergleich zur in früheren Projekten eingesetzten Segmentierung leichter montieren. Die bei der Fügung der Segmente auftretenden Passungengenauigkeiten konnten noch nicht vollständig beseitigt werden. Hierfür sind andere Ansätze zum Umgang mit der Knotengeometrie und der Segmentierung erforderlich.

Die Ergebnisse der Teilprojektes wurden in Tagungsbeiträgen und einer Videodokumentation veröffentlicht.

## **Teilvorhaben 2: Entwicklung des parametergesteuerten statischen Bemessungskonzepts**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Mit dem Teilvorhaben 2 soll ein statisches Bemessungskonzept in das Projekt „Digital basierte, integrale Planungsmethodik für Systemhallendächer aus Holz mit Fokussierung auf automatisierte Fertigungs- und Vormontageprozesse“ implementiert werden.

Im Kern des Teilvorhabens soll in der digitalen Entwurfsumgebung neben den konstruktiven Randbedingungen auch eine statische Bemessung der notwendigen Tragstruktur erfolgen. Dafür werden Bemessungsroutinen der genormten Nachweise nach Eurocode 5 notwendig. Im Teilvorhaben 2 werden mit Hilfe von Visual Studio Nachweise programmiert und später in den digitalen Planungsprozess eingefügt, um so eine Echtzeitbemessung der Tragstruktur zu ermöglichen.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

Im Teilvorhaben 2 wurden die Arbeitspakete 2, 3, 5 und 8 bearbeitet. Nachfolgend sind die wichtigsten Bearbeitungsschritte im gesamten Projektzeitraum den jeweiligen Arbeitspaketen zugeordnet. Eine ausführlichere Darstellung der bearbeiteten Arbeitspakete befindet sich im gemeinsamen Teil des Abschlussberichts.

#### **Arbeitspaket 2: Entwicklung eines BIM-basierten Gesamtmodells für landwirtschaftliche Gebäude mit ressourceneffizientem Dachtragwerk**

Es erfolgte eine Variantenuntersuchung hinsichtlich des statischen Tragverhaltens und des Materialbedarfs von relevanten Hallentragsystemen. Auf Basis statischer Modelle konnte die Ressourceneffizienz von Zollingerkonstruktionen im Vergleich zu konventionellen Hallenkonstruktionen verdeutlicht werden.

Zudem wurden Modellierungsvarianten abhängig von Nutzungsansprüchen aufgestellt, um statisch relevante Detailpunkte herauszuarbeiten.

#### **Arbeitspaket 3: Entwurf einer Planungsmethodik für ein in flexibel adaptierbares, ressourceneffizientes Bausystem aus Holz**

Im Arbeitspaket wurde aufbauend auf der Beschreibung des Leistungspakets Statik und der Schnittstellen zu anderen Projektbeteiligten ein Workflow entwickelt und dargestellt. Bei der Erarbeitung des Planungsablaufs wurden insbesondere die Abhängigkeiten zwischen den Projektbeteiligten und die für die Statik relevanten Parameter definiert. Der entstandene Informationsfluss wurde in das digitale Gesamtmodell integriert.

#### **Arbeitspaket 5: Erarbeitung eines Parameter gesteuerten, statischen Bemessungskonzeptes**

Die Erarbeitung des parametrischen, statischen Bemessungskonzeptes erfolgte in drei Teilleistungen – Erarbeitung der Grundlagen für ein digitales Statikmodell, Entwicklung der parametergesteuerten Umgebung, sowie Auswertung und Nachweisführung. Aufbauend auf dem digitalen Geometriemodell der HTWK wurden die statischen Parameter definiert, sodass ein parametergesteuertes Strukturmodell entsteht. Mit Hilfe der eigenprogrammierten Nachweiskomponenten nach Eurocode 5 kann die Tragstruktur ausgewertet werden. Eine Implementierung des parametrischen Statikmodells und der Nachweisroutine in das digitale Gesamtmodell ist erfolgt.

#### **Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik an einem Demonstrationsobjekt und Darstellung der Einzelergebnisse am Gesamtmodell**

Das erarbeitete Bemessungskonzept wurde bei der Planung des Demonstrationsobjektes getestet. Weiterhin wurde das parametrische Konzept im Rahmen von Parameterstudien auf Grenzen und Verbesserungsmöglichkeiten untersucht. In weiterführenden Projekten könnten Belastungsversuche an realen Konstruktionen zur Evaluierung des statischen Systems erfolgen.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Der grundlegende Aufbau und Ablauf des entstandenen parametergesteuerten Bemessungskonzeptes wird im Rahmen des gemeinsamen Schlussberichts im Arbeitspaket 5 erläutert. Im Folgenden werden weitergehende Untersuchungen, welche als Grundlage oder fortführende Evaluation dienen, vorgestellt.

## Erarbeitung der Grundlagen für ein digitales Statikmodell

**Modellvergleich** In Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig und dem Ingenieurbüro Janke erfolgte eine Variantenuntersuchung hinsichtlich der statischen Modellierung der Tragstruktur. Dabei wurden folgende Modellierungsvarianten untersucht: reines Stabwerk ohne mittragende Beplankung, ein Flächen-Stabtragwerk, wie es Bestandteil des Bemessungskonzeptes ist, sowie ein Ersatzstabwerksmodell, bei welchem die Beplankung mittels Ersatzstäben modelliert wird. Es erfolgten Modellvergleiche hinsichtlich des Modellierungsaufwandes, des Konvergenzverhaltens abhängig der Verbindungssteifigkeiten und der Ergebnisse.

Das reine Stabwerksmodell weist zwar den geringsten Modellierungsaufwand auf, erreicht jedoch aufgrund der fehlenden Beplankung auch die größte Querschnittsbeanspruchung in den Lamellen. Für die unterschiedliche Modellierung der Beplankung, als Stab oder Fläche, wurden insbesondere die Elementverbindungen untersucht, um adäquate Steifigkeitsverhältnisse abzubilden. Die Ergebnisse der drei Modelle spiegeln besonders den Einfluss der Verbindungssteifigkeiten und die Auswirkungen einer mittragenden Beplankung wider. Weiterführende Erkenntnisse und Vergleiche sollen in Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig veröffentlicht werden.

**Beplankungsstoß** Aus fertigungstechnischen Anforderungen ist eine Unterteilung der Gesamtkonstruktion in einzelne Konstruktionssegmente vorgesehen. Die Größe der Beplankungssegmente und damit einhergehend die Anzahl der Beplankungsstöße, wie in Abbildung 9 dargestellt, ist stark abhängig vom gewählten Beplankungsmaterial und den Fertigungsbedingungen. In Bereichen dieser Beplankungsstöße ist aus statischer Sicht keine durchgängige, mittragende Fläche anzusetzen. Um diese konstruktionsbedingten Eigenschaften auch im Statikmodell effizient und parametrisch umsetzen zu können, wurden verschiedene Ansätze in der statischen Modellierung und Auswertung untersucht.

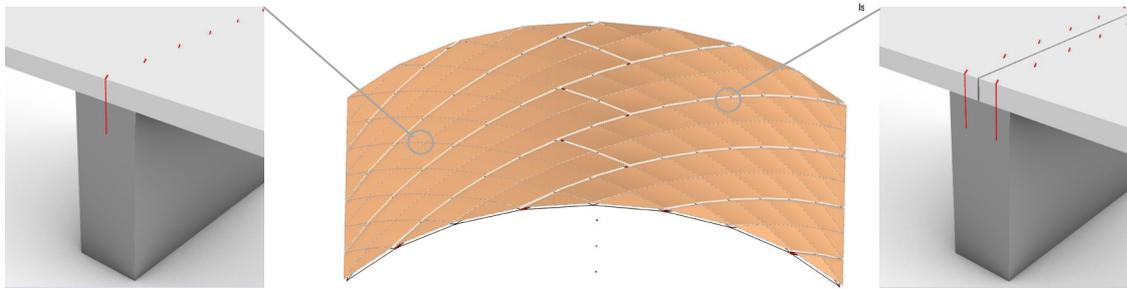


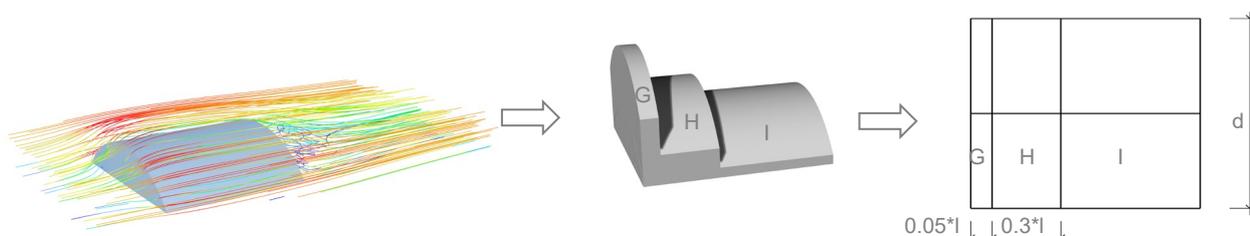
Abbildung 9: Detaildarstellung der Verbindung Lamelle-Beplankung bei durchgehender Beplankung und am Beplankungsstoß, Grafik: HTWD

Eine Möglichkeit bildet dabei die diskrete Modellierung der Beplankungsstöße, indem die Flächenelemente getrennt und die Verbindungen zum Stabelement „Lamelle“ über starre Koppelstäbe hergestellt werden. So können, angenähert an das reale Tragverhalten, am Beplankungsstoß zwar Druck- und Zugkräfte zwischen Beplankung und Lamelle, jedoch keine Biegung zwischen den Flächenelementen, übertragen werden. Insbesondere in Bezug auf die Parametrisierung ist diese Modellierungsvariante jedoch durch die entstehende Knotenvielzahl und damit verbundene Sortierung und Zuordnung mit einem sehr hohen Modellierungsaufwand verbunden. Für die Auswertung wurde weiterhin die Anwendung von Glättungsbereichen untersucht, welche die Schnittkräfte entlang des Stabes oder innerhalb der Fläche mitteln. So können berechnungsbedingte, aber nicht bemessungsrelevante Spannungsspitzen vermieden werden.

**Windlasten** Vor dem Hintergrund einer ressourceneffizienten Gestaltung des Dachtragwerks erfolgte eine Untersuchung der Windlastannahmen unter Verwendung numerischer Strömungssimulation, kurz CFD-Analyse (computational fluid dynamics). Die hierbei ermittelten Winddruckbeiwerte ermöglichen im Vergleich zum Ansatz der normierten Belastungswerte für Dächer eine wirtschaftlichere Bemessung der Tragstruktur.

Da zudem in der europäischen Norm keine Winddruckbeiwerte für längsangeströmte Tonnendächer angegeben werden, erfolgte im Rahmen der CFD-Analyse eine Ableitung von Zonen gleichen Winddruckes, siehe Abbildung 10. Unter Verwendung der ermittelten Winddruckzonen kann innerhalb des parametrischen Bemessungskonzeptes die Lastannahme an jede neue Tragwerksgeometrie angepasst werden. Auf eine weitere Schnittstelle zu einem externen Programm für die Durchführung einer CFD-Analyse kann somit verzichtet werden.

Die Ergebnisse der Untersuchung wurden weiterhin im Rahmen des IASS Symposium in Melbourne 2023 veröffentlicht [2].



*Abbildung 10: CFD-Analyse und Ermittlung von Zonen gleicher Winddruckbeiwerten für ein materialsparendes Tragsystem, Grafik: HTWD*

### **Entwicklung der parametergesteuerten Umgebung**

Für die parametrisierte Anwendung des Bemessungskonzeptes wurde aufbauend auf dem Geometriemodell der HTWK eine digitale Entwurfsumgebung zur Erstellung eines parametrischen Statikmodells entwickelt, siehe Abbildung 11. Für die Eingabe der Querschnittswerte und Materialien wurden Schieberegler und Listen hinterlegt. So können die Eingangswerte des Statikmodells einfach und schnell angepasst werden. Diese sind wiederum direkt mit den Komponenten zur Erstellung der Bauteilelemente, sowie zur Nachweisführung verbunden.

Um eine umfänglich variable Gestaltung der Geometrie, wie Quer- und Längsteilung oder Außenabmessungen, zu gewährleisten, werden die Knoten, Linien und Flächen systematisiert. Die Knoten werden dabei aufsteigend nach der Anordnung nummeriert. Die Linien, welche die Grundlage für die Stabelemente der Lamellen bilden, werden in Gruppen sortiert. Die gewählten Lamellengruppen richten sich dabei nach den konstruktiven Bedingungen der Lamellen und deren Verbindung zu anschließenden Bauteilen. Für jede Lamellengruppe wurden dafür die entsprechenden statisch notwendigen Definitionen, wie Stabengelenke oder Stabdrehung, abhängig des Einbauortes im Gesamttragwerk festgelegt.

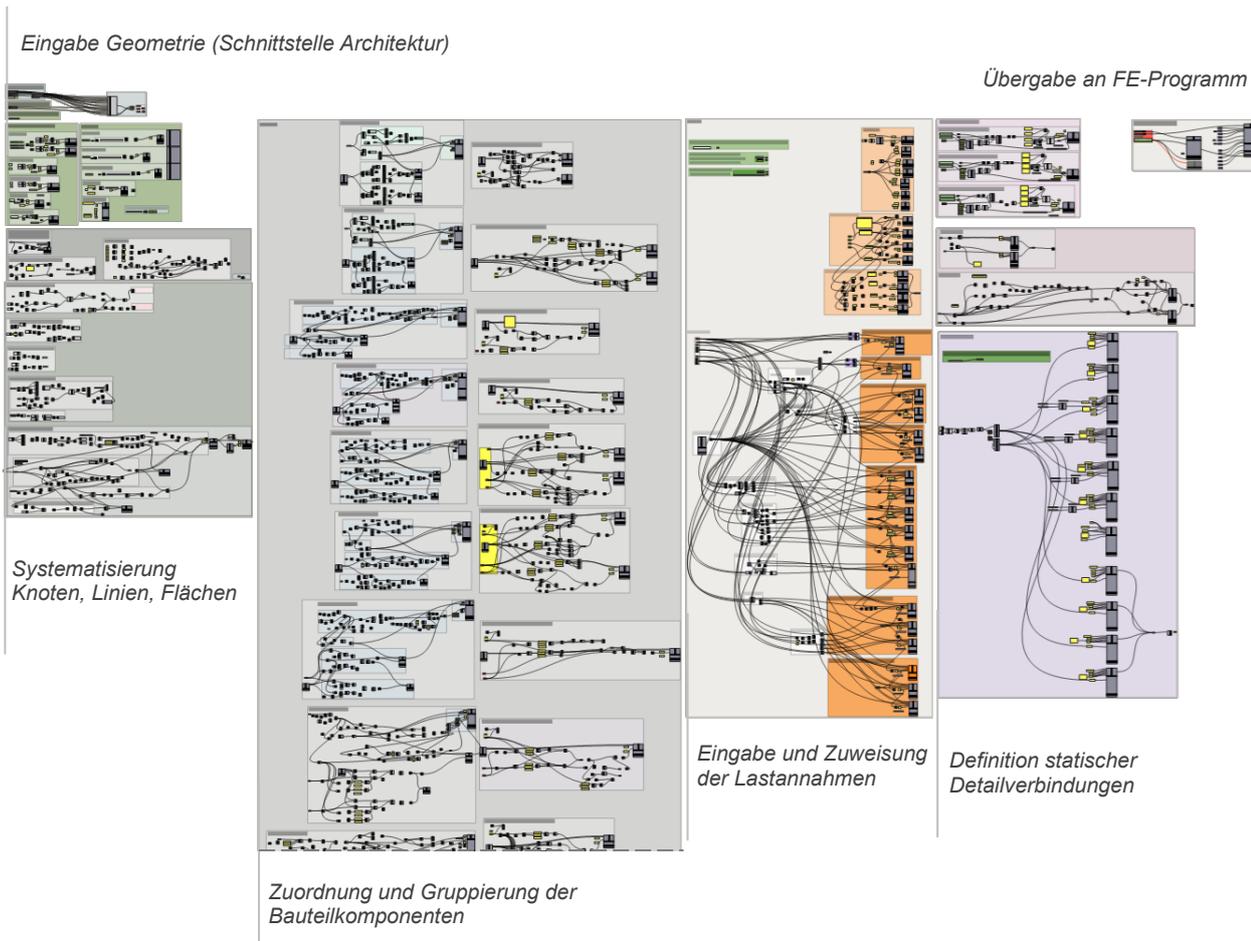


Abbildung 11: Ausschnitt der grafisch programmierten Grasshopper-Oberfläche zur parametrischen Modellerstellung und Bemessung, Grafik: HTWD

Die Flächenelemente können anschließend über die Knoten und Linien definiert werden. Je nach Material und deren Steifigkeitsmatrix wird zusätzlich das lokale Koordinatensystem der Flächenelemente gedreht, sodass die „starke Achse“ parallel zu den Lamellenstreifen angeordnet ist.

Die Definition der Lasten erfolgt, bedingt durch die Programmiermöglichkeiten von RFEM, als freie Rechtecklasten. Je nach Laststellungen werden die Lastwerte den zuvor nummerierten Flächen zugeordnet. Die Lastwerte für Wind- und Schneelasten werden dabei automatisiert innerhalb der parametrischen Umgebung entsprechend des Standorts und der Gebäudemaße ermittelt.

Nach Einstellung aller Eingabewerte kann das entsprechende Modell anschließend für die Berechnung an das Statikprogramm übergeben werden. Die entstandene parametrische Umgebung wurde als Teil des statischen Bemessungskonzeptes in das digitale Gesamtmodell implementiert.

### Auswertung und Nachweisführung

Für eine konsistente Auswertung der Bemessungsergebnisse werden die Schnittgrößen der Holzbauteile aus den RFEM-Ergebnistabellen in Grasshopper importiert und nach Lastkombinationen sortiert zusammengefasst. Die maßgebenden Ergebnisse fungieren gleichzeitig als Eingangswerte für die eigenentwickelten Nachweiskomponenten. Damit kann ein geschlossener Arbeitsfluss entstehen - von der Einstellung der Parameter über die Übergabe und Berechnung des Statikmodells bis zur Auswertung und Nachweisführung der bemessungsrelevanten Bauteile.

Eine Teilaufgabe zur Entwicklung des statischen Bemessungskonzeptes bildet die Programmierung der Nachweiskomponenten mit Hilfe Visual Studio in der Programmiersprache C#. Dabei wurden im Rahmen des Projektes die Querschnittsnachweise der Lamellen nach DIN EN 1995-1-1 fokussiert. Die programmierten Komponenten wurden als Plug-In für die Zusatzmodulbibliothek des Programms Grasshopper entwickelt und können so ohne weitere notwendige Schnittstelle von allen AnwenderInnen implementiert und genutzt werden.

Eine parametrisierte Nachweisführung der Flächen und Verbindungspunkte zwischen Fläche und Stab wurde während der Projektlaufzeit vorgedacht. Aufgrund von berechnungsbedingten Singularitäten und

Spannungsspitzen der Flächenschnittgrößen ist jedoch eine parametrisierte Auswertung bisher nicht möglich. Im Rahmen von weiterführenden Projekten kann darauf aufbauend eine tiefere Untersuchung von Auswertungsstrategien der Flächenschnittgrößen erfolgen.

### Parameterstudien und weiterführende Untersuchungen

Zur Evaluierung und Kontrolle des entstandenen parametergesteuerten, statischen Bemessungskonzeptes sind Parameterstudien unter Variation der Geometrie und der Bauteilverbindungen erfolgt.

**Klammerverbindung** Mit Hilfe des entstandenen parametrischen Statikmodells erfolgte eine Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens abhängig von der Verbindungssteifigkeit zwischen Beplankung und Lamelle. Diese hängt nach der Berechnung des Verschiebungsmodul nach DIN EN 1995-1-1 (7.1) wiederum maßgebend von der Klammeranzahl und -anordnung ab. Untersucht wurden dafür Modelle mit den Spannweiten 13, 16 und 19 m unter Beachtung der Steifigkeitswerte für Klammerabstände zwischen 30 und 200 mm. In Abbildung 12 ist beispielhaft die Auswertung der globalen Verformungswerte dargestellt. Mit größerem Klammerabstand wird die Verbindungssteifigkeit, und damit einhergehend die Gesamtsteifigkeit des Konstruktion, reduziert und der Verformungswert steigt. Weiterführende Ergebnisse zur Schnittkraftverteilung zwischen den Bauteilen und dem Einfluss auf das Gesamttragverhalten wurden in der Veröffentlichung [3] im Rahmen des "Journal of the international association for shell and spatial structures" abgebildet.

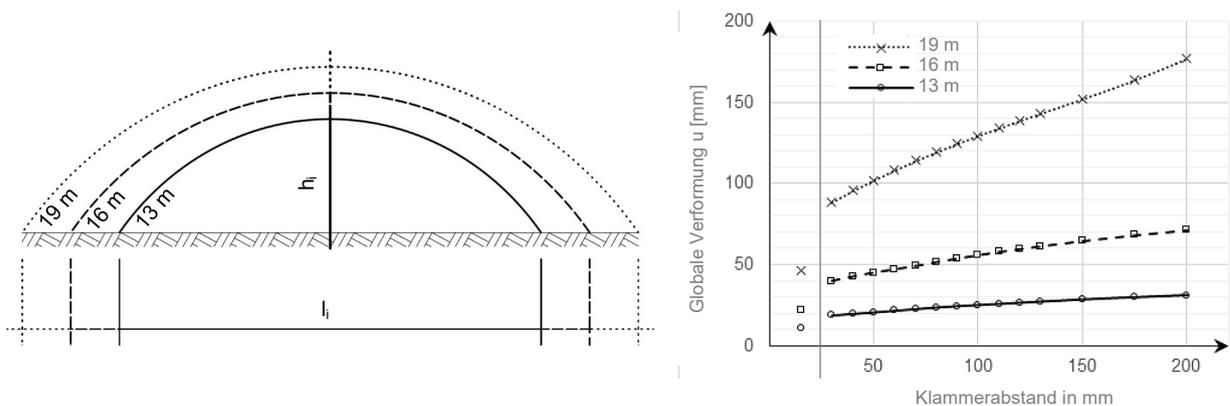


Abbildung 12: Untersuchung des Tragverhaltens abh. vom Klammerabstand für die Spannweiten 13m, 16m und 19m, Grafik: HTWD

**Brandversuche** Des Weiteren erfolgten gemeinsam mit TU Braunschweig und Ingenieurbüro Janke statische Untersuchungen im Rahmen der Vorbetrachtungen für die Brandversuche im Großmaßstab (AP6). Neben Berechnungen zum Ansatz erforderlicher Querschnittsabmessungen der Lamellen wurde die Konstruktion hinsichtlich des brandbedingten Bauteilausfalls statisch untersucht. Infolge der Kraftumlagerung auf bestehende Bauteile (siehe Abbildung 13) resultiert zwar eine höhere Auslastung der Stabelemente. Ein Stabilitätsversagen des statischen Modells ist jedoch auch bei einem Abbrandradius bis 1,50 m nicht festzustellen. Für die Untersuchungen wurde eine theoretisch realistische Abbrandrate und Ausbreitungsgeschwindigkeit angesetzt, welche in großmaßstäblichen Brandversuchen bestätigt werden müsste.

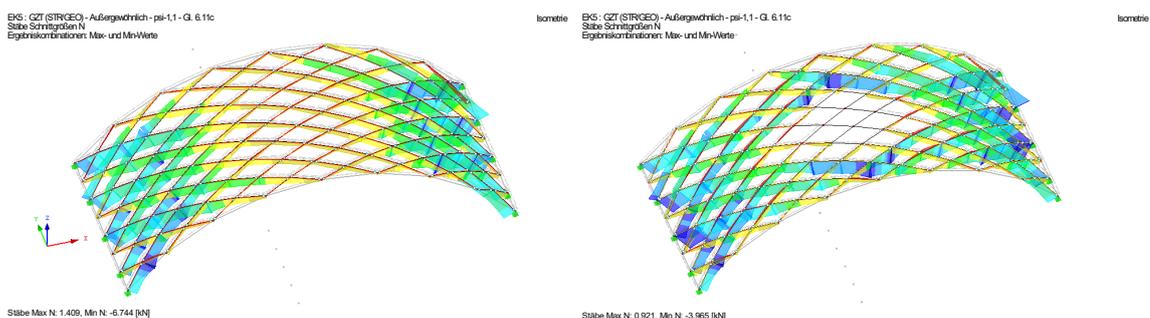


Abbildung 13: Bemessung mit (rechts) und ohne (links) Bauteilversagen infolge Brandausbreitung, Grafik: HTWD

Statt der großmaßstäblichen Brandversuche wurden in Zusammenarbeit mit STEIN.Ing mit Beginn 2023 kleinmaßstäbliche Brandversuche geplant, welche im Mai durchgeführt wurden. Ziel dieser war es, einen bemessungsrelevanten Knoten mit Hilfe eines Brandmodells von 4,55m x 3 m unter Lasteintragung zu rekonstruieren und die Standsicherheit unter Brandlast (ETK/Normbrandofen) nachzuweisen.

**Öffnungen** Abhängig vom Nutzungsanspruch der Halle sind im Dachtragwerk, genauer in der tragenden Beplankung, Öffnungen für Fenster oder Lichtbänder vorzusehen. Untersucht wurde dafür der Einfluss verschiedener Öffnungsgrößen und -anordnungen auf das Trag- und Verformungsverhalten der Konstruktion. Abbildung 14 zeigt beispielhaft die Untersuchungsergebnisse der globalen Verformung, sowie drei beispielhafte Darstellungen von Öffnungsanordnungen auf der Traufseite und im First. Aus den Untersuchungsergebnissen geht u.a. hervor, dass eine Unterbrechung der Lamellenstreifen maßgebenden Einfluss auf das Verformungsverhalten hat. Vor der Hintergrund einer ressourceneffizienten Gestaltung des Tragwerks wird daher empfohlen, bei der Planung von Öffnungen, lediglich die Beplankungsfläche zu entfernen und das durchgehende Lamellen-Stabtragwerk zu erhalten.

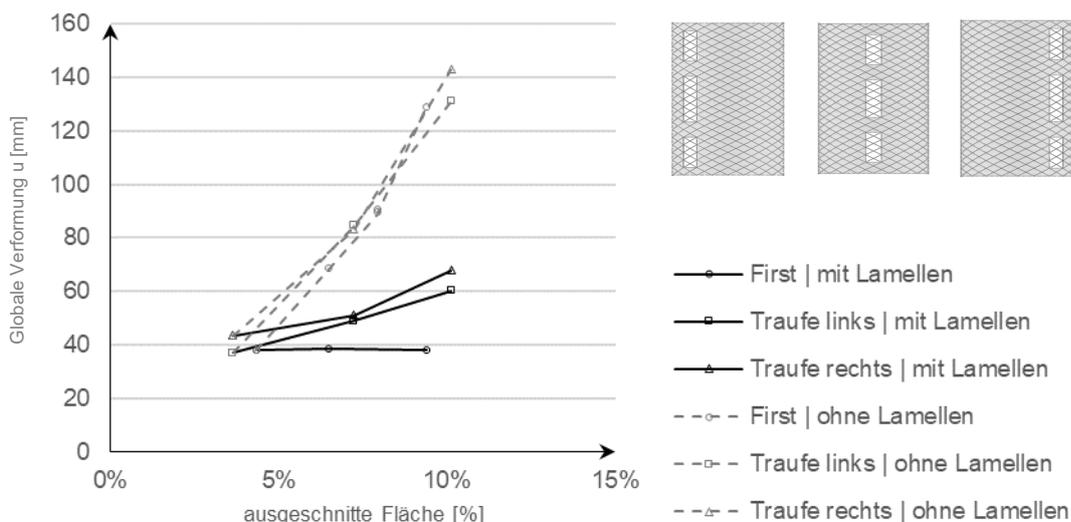


Abbildung 14: Einfluss von Öffnungen auf das Verformungsverhalten abh. von Größe und Anordnung, Grafik: HTWD

## Teilvorhaben 3: Leitdetails – Konstruktion und Bauphysik

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Die einzelnen Projektziele lassen sich in fünf Hauptpunkte gliedern, die jeweilig mit den zu untersuchenden Gegenständen aufgeführt sind.

1. Die Definition notwendiger Leitdetails für Dachtragwerke
  - a. Vermeidung von Planungs- und Ausführungsfehler aufgrund der eingeschränkten Datenlage zu derartigen Dachtragwerken
  - b. Definition von Leitdetails (Traufe, Ortgang, First, Anschlüsse, Durchdringungen)
  - c. konstruktive Festlegungen mit Angabe von Materialien der Anschlussbauteile und Einbauelemente
2. Die Zusammenstellung bauphysikalischer Anforderungen
  - a. Varianz der bauphysikalischen Anforderungen aufgrund vielfältiger Nutzung von landwirtschaftlichen Gebäuden (Feuchteschutz)
  - b. unzureichende Messungen für landwirtschaftliche Nutzungen → Durchführung von Messungen in Ställen und landwirtschaftlich genutzten Hallen durch Kooperationspartner "holz[bau]physik"
3. Die Übertragung der bauphysikalischen Anforderungen auf Holzbauten im landwirtschaftlichen Bereich
  - a. Übertragung der ermittelten und evaluierten bauphysikalischen Anforderungen auf Holzdachtragwerke im landwirtschaftlichen Bau
  - b. Darstellung der erforderlichen Nachweise in Form eines Ablaufschemas
4. Die Entwicklung und Katalogisierung der Details und Anschlüsse unter Berücksichtigung der Disziplinen Bauphysik, Brandschutz und Statik
  - a. Definition von spezifischen Nutzungsarten mit bauphysikalischen Anforderungen auf Basis der Literaturrecherche und der Auswertung der Messungen
5. Die Aufbereitung der gewonnenen Erkenntnisse zur Anwendung im integralen Planungsprozess
  - a. Darstellung der Erkenntnisse und Anwendungsgrenzen zur Erleichterung der Anwendung im integralen Planungsprozess
  - b. Überprüfung der Effektivität und Praxistauglichkeit am Demonstratorbau

### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

Das iBHolz (TU Braunschweig) hat im Rahmen des Teilvorhabens 3, die Arbeitspakete 1, 4 und 8 bearbeitet.

#### Arbeitspaket 1: Projektbegleitende Maßnahmen

In diesem Arbeitspaket wurden die koordinativen und öffentlichkeitswirksamen Aspekte näher bearbeitet. Darunter fallen studentische Arbeiten, eigene Veröffentlichungen, Vorträge und Teilnahme an Veranstaltungen, wie Konferenzen.

#### Arbeitspaket 4: Konstruktive Leitdetails

Anhand von bauphysikalischen, brandschutztechnischen und statischen Randbedingungen wurden Leitdetails für das ReFlexRoof entworfen. Dabei haben Klimata-Messungen in landwirtschaftlichen Hallen im Bezug auf die Holzfeuchte stattgefunden, die auf Grundlagen von Recherchen aufbauen. Die Leitdetails wurden so aufarbeitet, dass bereits Materialien der Anschlüsse und Bauteile bestimmt wurden. Die Details wurden diskutiert und dann unter Berücksichtigung der holzbauspezifischen Schnittstellen zu Bauphysik, Statik und Brandschutz in einen Katalog umgesetzt.

#### Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik am Demonstrationsobjekt

Die in Arbeitspaket 4 bestimmten Leitdetails wurden und werden immer noch am Demonstrator und dessen Bau getestet. Es werden dabei Realisierbarkeit, Praxistauglichkeit und Anwendungsgrenzen im Bezug auf das digitale Modell evaluiert.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

#### **Zu Arbeitspaket 1: Projektbegleitende Maßnahmen**

Das Koordinationstreffen der TU Braunschweig konnte auch während der Covid-19-Pandemie in Präsenz stattfinden, was den Projektfortschritt unterstützen konnte.

Neben den Zuarbeiten zu den Zwischenberichten wurden in Summe sieben studentische Arbeiten zur Unterstützung der Forschungsarbeit erstellt. Darunter befand sich eine Bachelorarbeit zum Aufmaß der montagebedingten Fugen am Demonstrator, zwei Masterarbeiten, die sich mit der erweiternden Stabwerksmodellierung auseinandersetzten, eine Master- und eine Studienarbeit, die die Ergebnisse der prüftechnischen Untersuchungen des MVK erarbeitete, eine Studienarbeit, die die prüftechnischen Untersuchungen der Klammerverbindung näher betrachtete sowie eine kooperative Studienarbeit mit der Hochschule Augsburg und Daniel Kehl (holz[bau]physik) zur Holzfeuchtemessung.

Darüber hinaus entstand ein Vortrag mit Veröffentlichung der prüftechnischen Untersuchungen des Mikro-Versatz-Knotens im Rahmen der WCTE 2023 in Oslo.

Im Nachgang des Projektes werden weitere Veröffentlichungen geplant sowie Teile der Ergebnisse in einer Dissertation münden.

#### **Zu Arbeitspaket 4: Konstruktive Leitdetails**

Das Arbeitspaket 4 beinhaltet den Hauptbestandteil der Untersuchungen im Teilvorhaben 3. Die konkreten Ergebnisse beziehen sich dabei auf die bauphysikalischen Messungen und Recherchen sowie der architektonischen Entwürfe der Partner in den Unteraufträgen der HTWK Leipzig. Diese wurden zusammen mit dem Brandschutz und der Statik stetig diskutiert und weiterentwickelt. Dabei wurde ein Leitdetailkatalog herausgearbeitet, der als Grundlage für eine parametrische Modellierung herangezogen werden kann.

Des Weiteren wurden prüftechnische Untersuchungen am Mikro-Versatz-Knoten hinsichtlich des Trag- und Verformungsverhaltens durchgeführt. Diese deuten auf ein ausgeprägtes elastisches Verhalten des Knotens mit einem teilweise ausgeprägten plastischen Verhalten hin. Der Anteil der Beplankung wie auch der Verschraubung des MVK am Lastabtrag der MVK-Verbindung hat sich bei planmäßiger Ausführung als untergeordnet herausgestellt, im Wesentlichen erfolgt die Lastübertragung über den Kontakt und dem damit vorliegenden Formschluss der anschließenden Bauteile. Die Steifigkeit des Mikro-Versatz-Knoten kann parametrisch in der Modellierung eingearbeitet werden.

Die Leitdetails wurden statisch überprüft und können in Teilen parametrisch angewendet werden. Eine genauere Modellierung im parametrischen Modell ist angesichts der kleinteiligen Modellierung der Verbindungsmittel nur schwer mit überschaubarem Rechenaufwand umzusetzen. Es sollte auf eine nachgehende Bemessung der Verbindungsmittel anhand der ermittelten Schnittgrößen zurückgegriffen werden. Dazu dienen die dokumentierten Ausführungen zur Bemessung der Anschlüsse.

Die Klammerverbindung bedarf einer näheren Beurteilung, da eine axiale Tragfähigkeit für ständige Lasten nicht gewährleistet werden kann.

#### **Zu Arbeitspaket 8: Evaluierung der Planungsmethodik am Demonstrationsobjekt**

Beim Bau des Demonstrators hat sich herausgestellt, dass der Verbund Lamelle-Klammer-Beplankung aufgrund von Fertigungs- und Montage-Toleranzen (im Hinblick auf die Ausbildung der Fugen bei der Montage) einen deutlich größeren Anteil bei der Lastabtragung des Gesamttragsystems übernehmen muss, als bisher angenommen. Die axiale Beanspruchung der Klammern ist basierend auf den aktuellen Erkenntnissen und dem Stand der Technik dafür nicht ausgelegt. Vor allem die Rückbiegewirkung der Beplankung als auch eine nötige Vorspannung der Elemente sollte als Optimierung in der Prozesskette näher untersucht werden, damit die Auswirkungen dieser Aspekte auf die Beanspruchbarkeit der Bauteile erfasst werden können.

Die Leitdetails wurden am Demonstrator erfolgreich getestet und können entsprechend für weitere Bauten herangezogen werden.

## Teilvorhaben 4:

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Konzipierung eines flexiblen Interaktionsmodells für regional tätige KMU in Vorfertigung, Vormontage und Montage auf Basis digitaler Planungsdaten

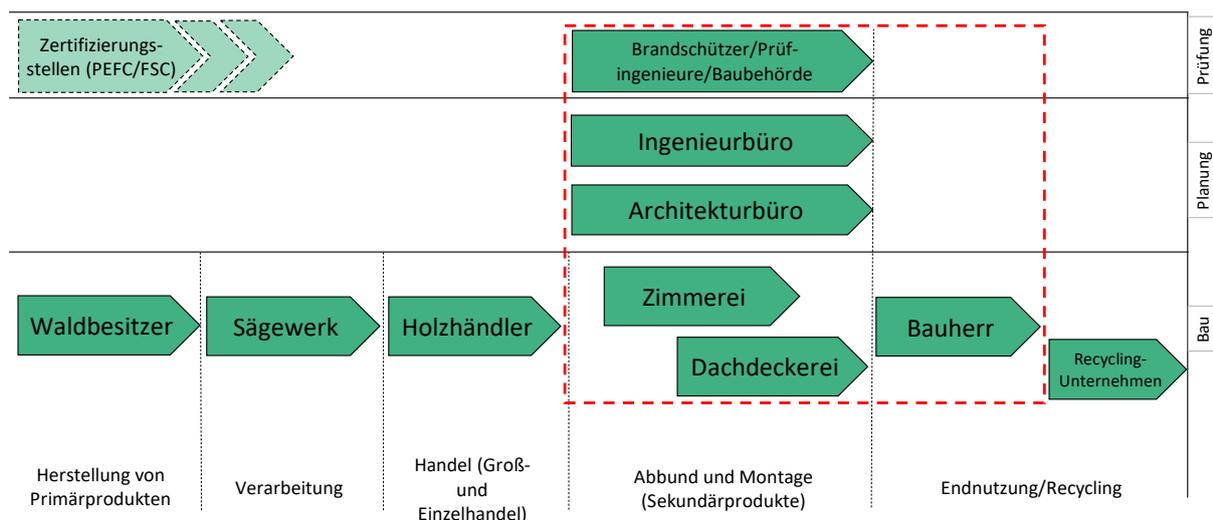
### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

**Arbeitspaket 7: Konzipierung eines flexiblen Interaktionsmodells für regional tätige KMU in Vorfertigung, Vormontage und Montage auf Basis digitaler Planungsdaten**

**AP 7.1: Erarbeitung der Wertschöpfungskette sowie Identifikation und Erfassung der KMUs in einer Datenbank**

a) Erarbeitung der Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“

Basierend auf einer Literatur- und Desktop-Recherche wurde die Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“ erstellt. Ziel war es, die einzelnen Wertschöpfungs-schritte von der Herstellung von Primärprodukten bis hin zum Endnutzer modellhaft so darzustellen, dass sich die Abbildung als Grundlage für die weiteren Aufgaben des AP7 eignet. Dabei sind die Akteure, die im Rahmen des TimberPlan+-Projekts von besonderer Relevanz sind, rot umrahmt.



- Zertifizierungsstellen betreffen teils unterschiedliche Aktivitäten der WSK, bspw. zertifiziert FSC nur Waldbesitzer, PEFC hingegen die gesamte Kette von Produktion bis zum fertigen Endprodukt  
 - Weitere Bauprodukte, wie bspw. Beton, Stahl, Schrauben etc., werden in dieser WSK nicht als wesentliche Kernbauelemente betrachtet und daher nicht gesondert einbezogen. Sie sind indirekt in den Abbund- und Montage  
 - Wartungs- und Reparaturprozesse gehören zur Endnutzung  
 - Ingenieurbüros und Architekturbüros können verschiedene Tätigkeiten abdecken: Baubiologen (Allergie am Bau), Holzschutzachter, Fachplaner (Elektro, Tragwerk, Bauphysik, Brandschutz, Schallschutz usw.)  
 - Das Abbundzentrum ist in "Zimmerei" eingegliedert

Abbildung 57: Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“ (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Finalisierung der Wertschöpfungskette erfolgte nach Vorstellung und Einholung von Feedback beim Projekttreffen in Dresden am 24.09.20.

b) Möglichkeiten der Zusammenarbeit zwischen den Betrieben in der Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“

Eine Literatur- und Desktop-Recherche bezüglich der Zusammenarbeit zwischen den Betrieben in der Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“ wurde durchgeführt und wesentliche Erkenntnisse (Word-Dokument sowie PowerPoint-Präsentation) zusammengeführt. Neben klassischen Kooperationsmodellen wie bspw. virtuellen Organisationen, Interessengemeinschaften, Konsortien/Arbeitsgemeinschaften, Franchising, Strategische Allianzen und Joint Ventures wurden darüber hinaus insbesondere im Handwerk anzutreffende Kooperationsformen identifiziert. Dabei kann zwischen „stillen“ und „formellen“ Kooperationen sowohl auf horizontaler als auch vertikaler Ebene unterschieden werden. Insbesondere im Bau- und im Holzbauwesen

gibt es zudem Kooperationsmodelle wie bspw. Einzelleistungs- und Generalunternehmer-, Totalunternehmer- und Generalübernehmermodelle. Von Kooperation abgegrenzt werden klassische Käufer-Verkäufer-Beziehungen. Die Ergebnisse wurden den Projektpartnern aufgezeigt und zur Verfügung gestellt.

c) Identifikation relevanter Unternehmen und deren Kompetenzen auf Basis öffentlicher Daten

Basierend auf der Wertschöpfungskette „Bauen mit Holz“ wurden mit Hilfe der MARKUS-Unternehmensdatenbank<sup>1</sup> deutschlandweit Unternehmen aus den Tätigkeitsfeldern (nach en WZ 2008 Codes und BD Codes) Dachdeckereien, Zimmereien, Architektur- und Ingenieurbüros sowie Sachverständige für Brandschutz identifiziert. Im Folgenden sind die Suchparameter aufgelistet:

- Dachdeckerei und Zimmerei:
  1. Alle Unternehmen mit Tätigkeitsbeschreibung
  2. Anzahl der Mitarbeiter: Letztes verfügbares Jahr, Min=10, Max=249
  3. Umsatz (tsd EUR): letztes verfügbares Jahr, Max=50.000
  4. WZ 2008 (nur Primärcodes): F4391 - Dachdeckerei und Zimmerei
- Architektur- und Ingenieurbüros:
  1. Alle Unternehmen mit Tätigkeitsbeschreibung
  2. Anzahl der Mitarbeiter: Letztes verfügbares Jahr, Min=10, Max=249
  3. Umsatz (tsd EUR): letztes verfügbares Jahr, Max=50.000
  4. WZ 2008 (nur Primärcodes): M711 - Architektur- und Ingenieurbüros
- Brandschutzgutachter:
  1. Alle Unternehmen mit Tätigkeitsbeschreibung
  2. Anzahl der Mitarbeiter: Letztes verfügbares Jahr, Min=10, Max=249
  3. BD: 749000123 - Sachverständige für Brandschutz

Die resultierenden Unternehmen wurde in einer Datenbank gesammelt und basierend auf öffentliche Informationen anhand ihrer Webseiten bezüglich der Relevanz für das Projekt analysiert, um u.a. aus diesem Pool für das AP 7.2 potenzielle Interviewpartner zu identifizieren. Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Recherche zusammen. Die hohe Anzahl an Suchergebnissen stand bei der anschließenden Analyse einigen Herausforderungen gegenüber. Neben teils unzutreffenden Ergebnissen (Unternehmen zu groß, Unternehmen mit Sitz im Ausland, unzutreffende Branche, Insolvenz, keine Unternehmenswebseite genannt) war der Informationsgehalt der Unternehmenswebseiten oft nicht ausreichend, um konkrete Aussagen zu Kompetenzen, wie eingesetzte Technologien, verfügbare Maschinenpark, besondere Leistungen, Kompetenzen und Kooperationen treffen zu können.

*Tabelle 5: Ergebnisse aus der MARKUS-Unternehmensrecherche*

Akteur	Suchergebnisse	Relevant	Eventuell relevant	Nicht relevant
Architektur- & Ingenieurbüros	522	23	20	479
Dachdeckerei & Zimmerei	274	86	-	188
Brandschutzgutachter	59	40	-	19

In der Tabelle wird ersichtlich, dass eine hohe Zahl der Unternehmen als nicht relevant sowie einige der Architektur- und Ingenieurbüros als eventuell relevant eingestuft wurden. Als für das Vorhaben des Projekts

<sup>1</sup> markus.bvdinfo.com

Timberplan+ relevante Unternehmen konnten 23 Architektur- und Ingenieurbüros, 86 Dachdeckereien und Zimmereien und 59 Brandschutzgutachter eingestuft werden.

Eine Erweiterung der TimberPlan+-Datenbank durch die Integration von Unternehmen mit speziellen Kompetenzen (Leimgenehmigungen C1 und C2) wurde durch Identifikation von 47 Unternehmen mit speziellen Kompetenzen (Leimgenehmigungen C1 und C2) im Januar 2021 durchgeführt (durch Zuarbeit eines Projektpartners). Die Zuarbeit eines weiteren Projektpartners vervollständigte die Liste relevanter Unternehmen.

### **AP 7.2: Erfassung bisheriger Kooperations- und Interaktionsmodelle sowie Erarbeitung der Anforderungen an die Kooperation sowie an die Interaktionen zwischen den regionalen KMU auf organisationaler und technischer Ebene**

Um konkrete Aussagen zu bisherigen Kooperations- und Interaktionsmodelle treffen und Anforderungen an die Kooperation sowie Interaktionen zwischen regionalen KMU auf organisationaler und technischer Ebene ziehen zu können, wurde im Arbeitspaket 7.2 eine Interviewstudie mit ausgewählten Unternehmen durchgeführt.

Insgesamt wurden im Zeitraum vom 23.03.2021 bis 12.08.2021 zehn Interviews mit Unternehmensvertretern umgesetzt. Davon konnten drei Unternehmen der Gruppe Brandschützer und sechs Unternehmen der Gruppe Ingenieur- und Architekturbüros zugeordnet werden. Ein weiterer Interviewpartner war Vertreter einer Dachdeckerei. Neben Fragen zum Geschäftsmodell waren Themenschwerpunkte die gegenwärtige Kooperation mit anderen Unternehmen, relevante Kooperationsformen für die Befragten sowie im Holzbau, Voraussetzungen für eine gute Zusammenarbeit, Anforderungen an Kooperationsmodelle, die Nutzung von Softwaretools sowie der Bedarf an intelligenten (parameter-bezogenen) Austauschformaten.

Die dabei ermittelten wesentlichen Anforderungen an die Kooperation sowie Interaktion zwischen KMU lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Frühzeitige Integration aller Stakeholder in den Planungs- und Bauprozess
- Klare Definition des Auftrages und der Zuständigkeiten bzw. Aufgabenbeschreibung
- Koordination und Kommunikationswege vorab definieren
- Schnelle Kommunikationswege, Agiles Projektmanagement, kurze Stand-Up-Meetings, (wöchentliche) Abstimmungen
- „Barrieren des Kommunizierens“ senken z.B. durch Software wie MS Teams
- Wahrung von Grundwerten wie Aufrichtigkeit, Ehrlichkeit, Verlässlichkeit, partnerschaftlichen Respekt
- Ressourcen und Knowhow aller Stakeholder bündeln
- Zentrale Arbeits- bzw. Projektvorbereitung, um Fehlplanungen zu vermeiden
- Kompatible Planungsprogramme bzw. Austauschformate zur Gewährleistung von einheitlichen Datenformaten und Planungsunterlagen
- Prüfung der jeweilig vorhandenen Arbeitsstandards (Digitalisierung, Software, Bemessungsprogramme etc.) in beteiligten Unternehmen, um effiziente Arbeitsprozesse zu gewährleisten

### **AP 7.3: Entwicklung eines geeigneten innovativen Kooperationsmodells mit Fokus auf KMU im ländlichen Raum**

Durch Zusammenführung der Ergebnisse aus AP 7.1 mit den Ergebnissen aus AP 7.2 sowie mit Erkenntnissen aus bisherigen projektinternen Arbeitssitzungen insbesondere bezüglich technischer Aspekte wurden zunächst zwei alternative Kooperationsmodelle abgeleitet.

Dabei wurde die Integration eines digitalen Planungsprozesses als Kernelement eines plattformbasierten Kooperationsmodells berücksichtigt.

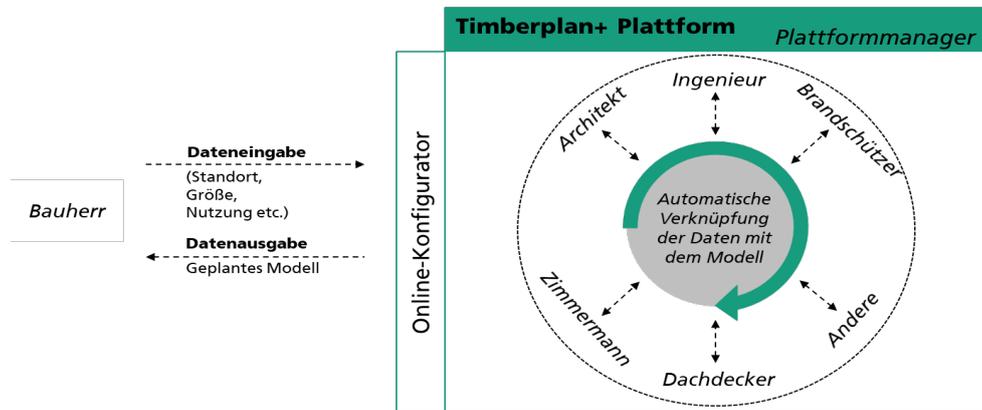


Abbildung 58: Digital basierter Planungsprozess der Timberplan+ Plattform (Darstellung: Fraunhofer IMW)

## Timberplan+ Plattform

Eine digitale Plattform verknüpft zwei oder mehrere unterschiedliche Akteursgruppen (z.B. Kunden, Lieferanten, Nutzer, Dienstleister, Kooperationspartner) für den Austausch von Leistungen oder Informationen. Der Plattformbetreiber stellt eine offene Infrastruktur mit Regeln für den Austausch zur Verfügung.<sup>234</sup> Eine Plattform stellt damit den Intermediär in einem zwei- bzw. mehrseitigen Markt dar. Mit einer digitalen Plattform können Such- und Transaktionskosten minimiert werden. Die Timberplan+ Plattform (Abbildung 1) dient dabei dem Zusammenbringen vom Bauherrn mit den regional tätigen planungs- und baubeteiligten Akteuren. Die Akteure kooperieren dabei miteinander, um möglichst effizient unter Nutzung des digital basierten Planungstools arbeiten zu können. Ein Plattformmanager ist dabei u.a. für die Funktionsfähigkeit und die Aktualisierung bzw. Weiterentwicklung der Plattform zuständig. Die Nutzeroberfläche, hier Online-Konfigurator genannt, beinhaltet in einem späteren Prozess zu definierenden Elementen, wie Ein- und Ausgabemasken von Daten und ein dreidimensionales Modell, welches zur Veranschaulichung des Planungsprozesses und damit auch zur Steigerung der Nutzerattraktivität verwendet werden kann.

Mit Hinblick auf eine digital basierte, integrale Planungsmethodik in Form einer Planungsplattform wurden in Verbindung mit den Vorarbeiten zwei potenziell geeignete innovative Kooperationsmodelle abgeleitet:

- Variante 1: Plattformmanager als Totalunternehmen
- Variante 2: Bauteammodell mit unterstützender Plattform als Planungstool

### Variante 1: Plattformmanager als Totalunternehmen

Bei dem Totalunternehmer-Modell betrifft der gesamte Verantwortungsbereich, anders als beispielsweise beim Generalunternehmer-Modell, sowohl die Planung als auch die Bauausführung das leitende Unternehmen. Im Hinblick auf die Timberplan+ Plattform als übergeordnetes Planungswerkzeug übernimmt das Totalunternehmen außerdem die Funktion des Plattformmanagers. Das heißt, der Plattformmanager (ein Unternehmen ohne eigene Handwerker) übernimmt in diesem Fall vollständig die Koordination der beteiligten Akteure bei Planung und Ausführung der Baumaßnahmen. In diesem Modell kommuniziert der Bauherr mit dem Totalunternehmer, welcher wiederum in direktem Kontakt zu allen weiteren Akteuren steht (siehe Abbildung 59).

<sup>2</sup> Lundborg, M. und Gull, I.: „Digitale Plattformen als Chance für den Mittelstand. Relevanz, Anwendungen und Transfer“. 2019. Verfügbar in: [https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/digitale-plattformen-als-chance.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Publikationen/digitale-plattformen-als-chance.pdf?__blob=publicationFile&v=3).

<sup>3</sup> Parker, G.G., Van Alstyne, M.W. und Choudary, S.P.: „Platform Revolution“, 2016, New York/London, Norton.

<sup>4</sup> Engelhardt, S. V., Wangler, L., und Wischmann, S.: „Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen“. In: Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie.4. Verfügbar in: <https://www.iit-berlin.de/de/publikationen/eigenschaften-und-erfolgsfaktoren-digitaler-plattformen.2017>

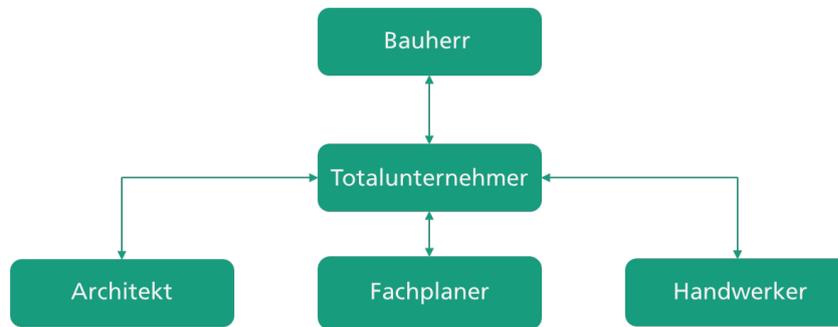


Abbildung 59: Kommunikationswege im Kooperationsmodell Plattformmanager als Totalunternehmer (Darstellung: Fraunhofer IMW)

### Variante 2: Bauteammodell mit unterstützender Plattform als Planungstool

Das Arbeiten in einem Bauteam zielt darauf ab, bereits in einem frühen Planungsstadium alle Akteure in den Bauprozess einzubeziehen und somit alle benötigten Daten verfügbar zu haben. Dies ermöglicht die Identifikation von Synergieeffekten bezüglich der Ausführungsplanung des Bauprojektes und bringt somit Kostenvorteile und Termin- und Planungssicherheit mit sich.

Die Besonderheit im Zusammenhang ist in dem Falle, dass damit alle beteiligten Unternehmen von Beginn an Zugang zur Plattform haben, um frühzeitig an der Planung und Umsetzung des Bauvorhabens mitwirken zu können. Der Plattformmanager hingegen hat keine vertragliche Bindung zum Projekt, sondern lediglich für die Funktionsfähigkeit der Plattform und den dazugehörigen Service zuständig.

Im Bauteammodell kann der Bauherr mit allen Unternehmen kommunizieren (Abbildung 60), was zu kürzeren Kommunikationswegen, aber auch zu komplexen Kommunikationsstrukturen im Vergleich zum Totalunternehmermodell führen kann.

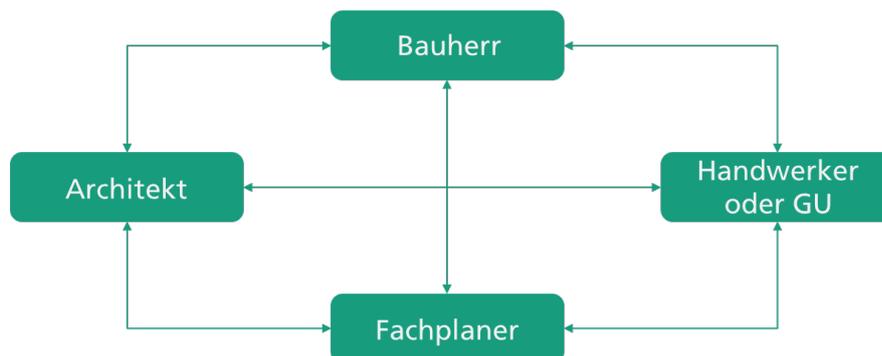


Abbildung 60: Kommunikationswege im Kooperationsmodell Plattform zur Unterstützung von Bauteams (Fraunhofer IMW)

### AP 7.4: Validierung und Reflektion über das Kooperationsmodell anhand des aktuellen Projekts

Eine detaillierte Beschreibung der entwickelten Kooperationsmodelle „Plattformmanager als Totalunternehmen“ und „Plattform zur Unterstützung von Bauteams“ wurde im Februar 2022 fertiggestellt. Dieses Dokument wurde daraufhin an die Projektpartner versendet, um die Ergebnisse zu validieren und noch offene Fragen zu identifizieren. Neben technischen Herausforderungen, die zu diesem Zeitpunkt für eine praktische Umsetzung noch zu lösen wären, wie bspw. eine softwareseitige Zusammenführung des intelligenten Modells, wurden weitere wichtige Fragestellungen ermittelt:

- Wie ist die Akzeptanz der Modelle bei potentiellen planungs- und baubeteiligten Unternehmen?
- Welches der Kooperationsmodelle findet bei Bauherrn mehr Akzeptanz?
- Wie soll die Gestaltung der Plattform und auch des Geschäftsmodells aussehen?
- Findet sich ein Unternehmen, welches als Totalunternehmer diese Plattform entwickeln und umsetzen möchte?
- Wer übernimmt die Entwicklung und Umsetzung im Falle des Bauteam-Modells?

Eine abschließende Bewertung, welches der beiden Kooperationsmodelle für das Vorhaben letztendlich am besten geeignet ist, konnte u.a. aufgrund des technischen Entwicklungsstandes nicht vorgenommen werden.

Das intelligente Model und dessen Umsetzung in eine schnittstellenübergreifende Lösung wurde als wesentlich für die Beantwortung dieser Frage bezeichnet.

#### **AP 7.5: Konzeption, Durchführung und Nacharbeitung einer Veranstaltung zur Netzwerkbildung**

Die ursprünglich in der ersten Jahreshälfte 2022 geplante Durchführung der Netzwerkveranstaltung wurde auf Anfang November 2022 verschoben. Gründe dafür waren, dass nicht alle Projektteilnehmer an einer Veranstaltung im Juni/Juli teilnehmen konnten. Des Weiteren existierten Bedenken innerhalb des Projektkonsortiums, dass nicht genügend externe Unternehmen zu dieser Zeit aufgrund der schwierigen Marktsituation (auch teilweise pandemiebedingt) teilnehmen könnten.

Eine Entspannung der Marktlage in der Holzbaubranche konnte im Jahresverlauf zwar nicht festgestellt werden, dennoch wurde zunächst von einer Durchführung der Veranstaltung im November ausgegangen. Als Veranstaltungsort sollte nach wie vor der Demonstrator bei der MFPA Leipzig dienen. Doch aufgrund kurzfristiger Schwierigkeiten in der Gewährleistung einer der Jahreszeit angemessenen Veranstaltungsumgebung (ausreichend Platz in Innenräumen), da der Demonstrator selbst kein abgeschlossener Raum ist, wurde die Veranstaltung nach projektinterner Absprache als auch Absprache mit dem Projektträger ein weiteres Mal verschoben.

Die Veranstaltung fand schließlich am 24. Mai 2023 am Demonstrator bei der MFPA Leipzig statt. Neben 11 Projektpartnern nahmen 20 externe Gäste (inkl. Referenten) teil. Neben der Projektvorstellung und drei Impulsvorträgen (1. *Innovationen im Holzbau* von Hannsjörg Pohlmeier (Holzbau Cluster RLP), 2. *Ein Wald, (un-)endliche Möglichkeiten? Multifunktionale Waldbewirtschaftung im Forstbezirk Leipzig* von Andreas Padberg (Leiter des Forstbezirks Leipzig), 3. *Digitale Innovationen – Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für unser Holzbauindustrie* von Sarah Neuschl (Fraunhofer IMW)) wurden verschiedene holzbaubezogene Themen während der Diskussionsrunden sowie in den Pausen diskutiert.

#### **Weitere Projektinhalte**

Im Zuge der innerhalb AP 7.4 durchgeführten Betrachtung kristallisierte sich der Fokus auf eine Plattformbasierte Verwertung und Planung der TP+ Konstruktionsweise. Hierzu ergab sich weiterführender Forschungsbedarf.

##### Plattformökonomie und Plattformentwicklung

Eine digitale Plattform im Holzbau soll den Planungs- und Bauprozess der TP+ Holzkonstruktionen optimieren und einige Prozessschritte automatisieren. Die wichtigsten Ziele von Timberplan+ sind dabei eine **verbesserte Effizienz** durch Optimierung der Zusammenarbeit beteiligter Unternehmen bzgl. des Planungsprozesses, eine **höhere Qualität** durch die Reduktion von Fehlern im Planungsprozess sowie eine **erhöhte Transparenz** durch digitale Vernetzung und Nachverfolgbarkeit des aktuellen Planungsstandes, was eine Stärkung des Vertrauens zwischen den verschiedenen Akteuren mit sich bringt. Resultierend kann der Planungsprozess verbessert und die Zusammenarbeit effizient gestaltet werden, was eine höhere Rentabilität der Projekte bzw. eine **Kostenoptimierung** bewirkt.

Eine Analyse von Fachliteratur zur Plattformökonomie im Holzbau sowie eine Desktop-Recherche wurde durchgeführt, um als Basis für eine mögliche Verwertung der Projektergebnisse zu dienen. Betrachtungsschwerpunkte waren dabei u.a. Plattformökonomie allgemein, Möglichkeiten zum Aufbau einer Plattform (Vorgehensmodelle), Key Performance Indicators (KPIs), Identifikation von existierenden Plattformen im Holzbau, Frontend-Betrachtungen. Die Ergebnisse wurde in einer 29-seitigen PowerPoint-Präsentation aufbereitet und dem Projektleiter im Juli 2023 vorgestellt.

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Identifikation relevanter Unternehmen und deren Kompetenzen auf Basis öffentlicher Daten; Durchführung einer Interviewstudie zum Thema Kooperationsmodelle, Entwicklung zweier alternativer digital basierter Kooperationsmodelle, Validierung und Reflektion der entwickelten digital basierten Kooperationsmodelle; Konzipierung und Planung der Netzwerkveranstaltung; Analyse von Fachliteratur zur Plattformökonomie und Plattformentwicklung

## **Teilvorhaben 5: (ABZ; aus dem Projekt vorzeitig ausgeschieden)**

Das Abbundzentrum Leipzig (ABZ, FKZ 2220HV003E) ist im Projekt TimberPlan+ aufgrund eines Inhaberwechsels vorzeitig ausgeschieden. Die Arbeiten am Projekt wurden de facto im März/ April 2021 eingestellt. Eine Umwidmung der Mittel erfolgte nach Rücksprache mit der FNR im Dezember 2021.

Die noch offenen Arbeitspakete wurden durch die HTWK bzw. die Firma STRAB übernommen. Siehe hierzu deren Teilvorhaben / Ergebnisse.

Bis zum Ausstieg aus dem Projekt, wurden durch das ABZ Leipzig folgende Arbeiten verrichtet:

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Das Ziel des Teilvorhabens 5 ist die Analyse, Entwicklung und Implementierung eines schlanken Workflows während der Interaktion von Planern und Ausführenden.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

**AP 3.3:** Unter Berücksichtigung betrieblicher, organisatorischer Randbedingungen wurde ein Konzept für eine durchgängige digitale Informationskette in Bezug auf Fertigungsdaten entwickelt bzw. das bestehende Konzept erweitert um die Komptabilität mit dem Planungstool zu gewährleisten. In Rücksprache mit der HTWK wurden fertigungsseitige Parameter erfasst, welche Einfluss auf den gemeinsamen Workflow haben.

**AP 6.2:** Die Herstellung der Prüfkörper für die Brandversuche wurde vorbereitet. Versuchsrelevante Anforderungen wurden festgehalten.

## **Teilvorhaben 6:**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Das Ziel des Teilvorhabens 6 ist die Entwicklung eines Workflows auf Basis einer durchgängigen Daten- bzw. Informationskette.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

- **AP 3.3:** Unter Berücksichtigung betrieblicher, organisatorischer Randbedingungen wurde ein Konzept für eine durchgängige digitale Informationskette in Bezug auf Fertigungsdaten entwickelt. Dies stellt eine Grundlage für den gemeinsamen Workflow und das zu entwickelnde Planungstool dar.
- **AP 3.6:** Evaluierung der Prozessstrategie aus der parametrisierten Fertigungs-Systematik in tatsächliche Vorfertigungsprozesse („digitale“ in „reale“ Produktion)
  
- **AP 6:** Mithilfe bei der Fertigung von Prüfkörpern für die Brandversuche
  
- **AP8.1:** Produktion von Segmenten für den ersten Großdemonstrator, sowie Mithilfe bei der Produktion von Segmenten für die Großbrandversuche
- **AP 8.2:** Rückspielen der Erkenntnisse aus AP 8.1 in die Gesamtsystematik

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Eines der wesentlichen Ergebnisse des Teilvorhabens 6 ist die erfolgreiche Übermittlung direkt aus Geometriedaten innerhalb der Gesamtsystematik (3D-Modell) an eine Abbund-Maschine. Somit können aus Rohhölzer direkt vollautomatisch Lamellen-Bauteile gefertigt werden. Diese Lamellen wiederum können dann

direkt mit den ebenfalls digital erstellten und aus den 3D-Daten CNC-zugeschnittenen Deckplatten zu Segmenten nach dem Prinzip *ReFlexRoof* zusammengesetzt werden.

Hierfür wurden die BVN-Daten direkt aus der Gesamtsystematik ausgegeben. Diese Daten beruhen wiederum auf den verschiedenen parametrisch gesteuerten Eingabeparametern der verschiedenen Teilgebiete, wie z.B. Statik, Brandschutz und architektonische Details.

Auch wurde festgestellt, dass es trotz der präzisen Null-Toleranz-3D-Geometrien zu Toleranzen während des digitalen Abbunds gekommen ist. Vgl. hierzu Teilvorhaben 3.