

Schlussbericht

Förderung der Zusammenarbeit in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft (LFE)

Thüringer Aufbaubank
Bereich Agrarförderung, Infrastruktur, Umwelt
Abteilung Agrarförderung
Postfach 900244
99105 Erfurt

Zuwendungsempfänger: Kooperation LaStrohBau

Personen-Ident-Nr. der Kooperation: 276160550000721

Projekt-Nr.: 2020 LFE 0010

Vorhaben

Lasttragender Strohballenbau für landwirtschaftliche Nutzbauwerke und Wohngebäude –
Erarbeitung statisch-konstruktiver und bauphysikalischer Bemessungsgrundlagen

Berichtszeitraum

01.09.2021 - 30.06.2025

Partner der Kooperation LaStrohBau

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität (Lead Partner)

Bauhaus-Universität Weimar, Professur Modellierung und Simulation

Z-Architektur GbR

Keller GmbH

Hof Herten GbR

Diakonie Landgut Holzdorf gGmbH

Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und ländlichen Raum (assoziiertes Partner)

Autoren des Berichtes

Stefan Helbig, Christopher Taube, Florian Hoppe

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation, Ausgangslage	3
2	Stand von Wissenschaft und Technik.....	4
3	Aufgabenstellung und Ziele, Lösungsansatz	5
4	Charakterisierung lasttragender Quaderballen: Durchführung, Ergebnisse und Diskussion	6
4.1	Grundlagen, Recherchen	6
4.2	Strohernte und Ballenauswahl	7
4.3	Untersuchungen zu den Stroheigenschaften.....	19
4.4	Charakterisierung des Trag- und Deformationsverhaltens von Quaderballen.....	22
4.5	Modellbildung für das Trag- und Deformationsverhalten	30
4.6	Charakterisierung der Wärmeleitfähigkeit von Quaderballen.....	35
5	Demonstratoren für lasttragende Strohballenbauweise	46
5.1	Demonstrator „Schafstall Hof Herten“	46
5.2	Demonstrator „Strohklassenzimmer“	52
5.3	Demonstrator „Strohturm“	70
6	Öffentlichkeitsarbeit.....	83
7	Zusammenfassung der Projektergebnisse	90
8	Ausblick.....	91
9	Verwertung der Projektergebnisse	93
10	Danksagung	94
11	Abbildungsverzeichnis	95
12	Tabellenverzeichnis	99
	Abkürzungsverzeichnis.....	100
13	Quellenverzeichnis	101
14	Veröffentlichungen.....	102

1 Motivation, Ausgangslage

Es ist erklärtes Ziel unserer Gesellschaft, den CO₂-Ausstoß und den Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie zu reduzieren, siehe Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung [BMLEH 2019]. Außerdem muss der Ressourcenverbrauch reduziert und eine Kreislaufwirtschaft (geschlossene Stoffkreisläufe) für möglichst viele Produkte bzw. die enthaltenen Materialien etabliert werden. Dazu gehören auch Bauprodukte bzw. ganze Bauwerke. Aktuell verbraucht das Bauwesen einen Großteil der in der gesamten Wirtschaft eingesetzten Materialien und ist von einer wert-erhaltenden Kreislaufwirtschaft noch weit entfernt.

Die Landwirtschaft ist ein Teil des natürlichen Stoffkreislaufs, bei dem auf den Feldern Biomasse durch Pflanzen mit Hilfe von Sonnenenergie aus Kohlendioxid und Wasser auf natürlichem Wege synthetisiert wird. Die pflanzliche Biomasse wird zur Ernährung der Menschen, als Tierfutter und - in letzter Zeit zunehmend - auch zur Erzeugung erneuerbarer Energie genutzt. Ein relativ geringer Teil der Biomasse wird – zum Beispiel in Form von Holz, Pflanzenölen oder Biomethanol - auch stofflich genutzt.

Der natürliche (Kohlen-)Stoffkreislauf, angetrieben durch die Photosynthese der Pflanzen, ist immer geschlossen und damit nachhaltig. Er ist – ohne technisch aufwändige Erzeugungsanlagen - durch erneuerbare Energie von der Sonne angetrieben [Braungart, 20214].

Stroh wurde in der Vergangenheit vorrangig stofflich als Einstreu für Tiere genutzt und in Form von Mist wieder auf den Feldern ausgebracht. Auf diese Weise wurde es dem natürlichen Kreislauf wieder zurückgegeben und diente der Bodenverbesserung durch Humusbildung. Der kleinere Teil des Strohaufkommens diente als Raufutter. Heute wird Stroh weiterhin als Einstreu oder als Raufutter genutzt. Der Anteil ist aber relativ gering, da in großen Stallanlagen weitgehend Spaltenböden gebaut wurden.

Alternative Nutzungsformen des Strohs sind die Energieerzeugung (Strohheizkraftwerke, Biogasanlagen) oder die direkte Zerkleinerung auf dem Feld und die Einarbeitung in den Boden. Diese Rückführung des Strohs in den Boden sollte möglichst mit zerfaserten Halmen erfolgen, um den Verrottungsprozess im Boden zu befördern. Die Zugabe von Stickstoffdünger bei der Einbringung von Strohhacksel war weitverbreitet und ist wegen der Nitratbelastung der Böden aktuell umstritten. Dadurch kann es bei Agrarbetrieben ohne Viehhaltung mit Einstreu zu einem Strohüberschuss kommen.

Wenn das Stroh – wie im geplanten Projekt angestrebt - als Baustoff zu Bauzwecken verwendet wird, dann ist das positiv zu bewerten. Das natürlich auf dem Weg der Photosynthese gebundene CO₂ kann über einen längeren Zeitraum in Form pflanzlicher Fasern (Strohhalme) gespeichert und genutzt werden. Das ist eine natürliche Carbon-Capture-and Usage-Technologie (CCU). Sie wird auf natürlichem Weg ohne technischen Aufwand vollzogen. Am Ende des Lebenszyklus von einem Bauwerk kann das (unbehandelte!) Stroh wieder als Einstreu genutzt, in Kompostieranlagen oder auf Felder verbracht oder thermisch verwertet werden. Hierbei müssen keine großen Transportwege anfallen, Felder oder Kompostieranlagen gibt es überall.

Auch eine finale Verwertung von Stroh in Biogasanlagen ist lukrativ und praktikabel. Die Verwendung von Stroh zur Beschickung von Biogasanlagen ist ein Weg, der auch in Deutschland zunehmend beschritten werden kann, siehe hierzu [Daniel-Gromke 2018] und [Gallegos 2018]. Wie viele der ca. 9000 Biogasanlagen in Deutschland in Zukunft auch Stroh vergären werden, wird die weitere Entwicklung des Biogassektors zeigen.

Das Projekt zielt auf eine Reduzierung des Treibhausgas-Ausstoßes und kann als ein Weg zum CO₂-neutralen Bauen – hier vorrangig im Bereich landwirtschaftlicher Gebäude - bezeichnet werden.

Bei der im Projekt zu entwickelnden Bauweise mit hochverdichteten lastabtragenden Großballen handelt es sich um die Entwicklung und Testung eines neuen Produktes bzw. Verfahrens. Im Gegensatz zur bekannten Nutzung von Stroh als Dämmstoff zur Ausfachung von Fachwerk oder Holzständer-Wänden soll durch den Einsatz von vorkonditionierten, d.h. hoch verdichteten Ballen eine Bauweise ohne die Notwendigkeit eines zusätzlichen Tragwerks etabliert werden.

Aufgrund der massiven Wandbauweise mit großen Wanddicken besitzt ein zu Wohn- oder Büro Zwecken genutztes lastabtragendes Strohballenhaus einen sehr geringen Heizenergiebedarf. Der Wärmedurchgangskoeffizient einer Wand aus Quaderstrohbällen liegt deutlich unter dem des Passivhausstandards.

Das Potential, mit Stroh zu bauen ist enorm groß. Laut Aussagen des Thüringer Landesamtes für Landwirtschaft können jährlich „deutschlandweit 7 bis 13 Millionen Tonnen Frischmasse Getreidestroh genutzt werden, ohne auf Landkeisebene den Gehalt der organischen Bodensubstanz auf der Ackerfläche negativ zu beeinflussen.“ [Weiser 2011]. Dieses Stroh wird nicht mehr zwingend für landwirtschaftliche Nutzung gebraucht und wäre frei wahlweise für eine energetische Nutzung oder einen Einsatz zu Bau Zwecken.

Bei einem Verbrauch von ca. 50 Tonnen Stroh für ein Gebäude könnten – bei Nutzung von 7 Mio. Tonnen - in Deutschland jährlich 140000 Strohballenhäuser gebaut werden.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Weltweit wurden bereits eine Anzahl von Gebäuden in lastabtragender Strohballenbauweise errichtet, welche durch ihre modulare Bauweise und extrem ressourcenschonenden Energie- und Materialeinsatz überzeugen.

Für die Errichtung von lastabtragenden Strohballengebäuden ist derzeit in Deutschland grundsätzlich eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) durch die jeweilige oberste Baubehörde notwendig. Der damit einhergehende zeitliche und finanzielle Mehraufwand führt bisher dazu, dass sich Planer und Bauherren für andere, in der Bau- und Genehmigungsplanung kostengünstigere, jedoch weniger energieeffiziente und ressourcenschonende Baumaterialien entscheiden. Sowohl im Hinblick auf die aufwändige Genehmigungspraxis als auch in Bezug auf

die Unterschätzung der Tragfähigkeit von Strohbaustoffen ist die gegenwärtige Situation unbefriedigend und stellt ein Hemmnis für die Verwendung des CO₂-neutralen, ressourcenschonenden Baustoffs Stroh dar.

Untersuchungen im Rahmen eines DBU-Forschungsprojektes des FASBA (Schamer, 2008) zu den Grundlagen der lasttragenden Bauweise und zu bauphysikalischen Parametern haben gezeigt, dass Strohballen und Strohballenbauteile vertikale und horizontale Lasten in entsprechend konzipierten ein- bis eineinhalbgeschossigen Gebäuden aufnehmen und weiterleiten können. Die guten Dämmeigenschaften von Stroh mit geringer bis mittlerer Rohdichte konnten bestätigt werden. Im Abschlussbericht dieses Forschungsprojektes wurde jedoch der weiterhin bestehende erhebliche Forschungsbedarf insbesondere für das lasttragende Bauen und im Bereich des Wärmeschutzes für Strohballen höherer Rohdichten benannt. Eine Zusammenfassung zum Stand der Technik und Forschung zur Zeit des oben genannten Projektes findet man in der Dissertation von Krick (Krick, Diss. 2008).

Die Veröffentlichung „Strohballen als lasttragender Baustoff – Aktueller Stand in Forschung und Baupraxis“ fasst den Stand der Recherchen sowie der bisherigen Untersuchungen der Partner am Projektbeginn zusammen [Tauben 2021-1].

3 Aufgabenstellung und Ziele, Lösungsansatz

Ziel des geplanten Kooperationsvorhabens ist es, statisch-konstruktive und bauphysikalische Grundlagen für die Bemessung und Nachweisführung von Strohballenmauerwerk auf Basis eines einheitlichen Regelwerks zu erarbeiten. Auf diesen Grundlagen soll zukünftig eine allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung abZ basieren. Um dies zu erreichen, ist es unerlässlich, eine Klassifizierung der lastabtragenden Strohballen bezüglich ihrer statisch konstruktiven Eigenschaften vorzunehmen, wie sie für alle anderen Konstruktionswerkstoffe vorliegt.

Den Ausgangspunkt der mechanischen Klassifizierung stellen experimentelle Untersuchungen zu den Festigkeits- und Formänderungseigenschaften kurz- und langzeitbeanspruchter, hochverdichteter Quaderballen dar. Ziel ist die Ableitung von Zusammenhängen bezüglich der Abhängigkeit der mechanischen Balleneigenschaften von physikalischen Eigenschaften wie der Rohdichte, die direkt herstellungstechnologisch bei der Ballenherstellung mit der Ballenpresse oder (unter weiterem Maschineneinsatz) indirekt durch gezielte Nachverdichtung („Konditionierung“) entsprechend der statisch konstruktiven Anforderungen eingestellt werden kann. Die Äquivalenz einer Erhöhung der herstellungsbedingten „natürlichen“ Rohdichte und einer gezielten Konditionierung durch Nachverdichtung muss dafür aus dem Versuchsprogramm herausgearbeitet werden.

4 Charakterisierung lasttragender Quaderballen: Durchführung, Ergebnisse und Diskussion

4.1 Grundlagen, Recherchen

Die experimentelle Datenbasis zum Tragverhalten von Strohballen ist trotz etwa 800 durchgeführter Versuche relativ schwach und fragmentiert. Ein Überblick über durchgeführte experimentelle Untersuchungen ist in [Taube 2024] zusammengefasst. Die überwiegende Mehrheit der Untersuchungen konzentriert sich auf unverputzte Kleinballen aus Weizenstroh mit Rohdichten unter 100 kg/m^3 . Für diese Kleinballen konnten grundlegende Last-Verformungsbeziehungen unter vertikaler Druckbeanspruchung identifiziert werden: Nach initialer Verdichtung der Hohlräume zeigen die Ballen ein nahezu lineares Verhalten, bevor sie bei höheren Lasten entweder versteifen (flach liegende Ballen) oder erweichen (hochkant stehende Ballen). Als wesentliche Einflussfaktoren auf Festigkeit, Steifigkeit und Kriechverhalten wurden die Ballenrohddichte, die Belastungsrichtung und die Bindung identifiziert.

Vertikale Belastungsversuche an Strohballenwänden zeigen, dass diese trotz geringerer Materialfestigkeiten aufgrund ihrer großen Wanddicken ausreichende Tragfähigkeiten für den Lastabtrag in einfachen Gebäuden bereitstellen können, wobei das Versagen typischerweise durch globales Ausbeulen aus der Ebene auftritt [Taube 2021-1]. Zum horizontalen Lastabtrag in Strohballenwänden ist die experimentelle Datenbasis besonders schwach. Die wenigen vorhandenen Untersuchungen zeigen, dass der horizontale Lastabtrag in unverstärkten Wänden hauptsächlich durch Haft- bzw. Gleitreibung in den Lagerfugen erfolgt, wobei Tragfähigkeiten und Steifigkeiten durch entsprechend verdichtete Ballen, große Schubflächen oder Auflasten erreicht werden müssen. Der positive Einfluss einer vertikalen Drucknormalkraft auf das Schubtragverhalten konnte nachgewiesen werden, ebenso wie die aussteifende Wirkung von Putzschichten [Taube 2021-2].

Für Großballen (typischerweise $240 \times 120 \times 70\text{-}90 \text{ cm}$), die sich aufgrund ihrer Dimensionen und erreichbaren Rohdichten ($>140 \text{ kg/m}^3$) auch für den Einsatz in mehrgeschossigen Gebäuden eignen, existieren bislang keine bekannten Modellansätze und nur kaum experimentelle Untersuchungen, aus denen jedoch hervorgeht, dass Großballen ein deutlich steiferes Verhalten aufweisen als Kleinballen mit vergleichbarer Rohddichte. Robuste konstitutive Modelle für das Kurz- und Langzeittrag- und Verformungsverhalten, die für eine sichere Auslegung von lasttragenden Strohballenkonstruktionen unerlässlich sind, existieren bislang nicht.

4.2 Strohernte und Ballenauswahl

Die Untersuchungen wurden Projekt ausschließlich für Winterweizenstroh durchgeführt. Diese Entscheidung basiert darauf, dass diese Feldfrucht in einem großen Umfang in Thüringen (sowie deutschlandweit) angebaut wird und dieses Stroh für Bauanwendungen ausreichend vorhanden ist. Für diese Auswahl und weitere Absprachen in Bezug auf Ernte stand den Projektpartnern beratend Herr Hering als assoziierter Partner vom Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und ländlichen Raum (TLLLR) zur Seite.

Ballenpresse, Ballenmaße

Für die Untersuchungen wurden Groß-Quaderballen ausgewählt. Zur Herstellung dieser wurde beim Partner Keller GmbH (kurz: Keller-Stroh) die Strohballen-BIGPACK 1290 HDP II XC der Firma Krone (siehe Abbildung 1) verwendet.



Abbildung 1 Quaderballenpresse: BIGPACK 1290 HDT II XC, Krone, Quelle: Z-Arch.

Der Pressschacht (Breite: 1,2 m und Höhe: 0,9 m) bestimmt die entsprechenden Abmaße der Ballen in Höhe und Breite. Die Länge der Ballen kann durch den Bediener der Presse variabel in ca. 5 cm Schritten eingestellt werden. Bei der Produktion der Längen sind extreme Unterschiede von bis zu 10 cm möglich. Dies hängt von vielen Faktoren (Dichte Schwad, Fahrgeschwindigkeit, ...) und ist für den Herstellungsprozess der Probekörper und Baustrohballen im Planungs- und Bauprozess als ungünstig zu bewerten.

Für die ersten Versuche (Erntejahr 2021) wurden Ballen der Länge von 1,5 m produziert. Danach wurde festgelegt, dass alle statischen und wärmetechnischen Versuche an Ballen der Länge von 1,2 m durchgeführt werden sollen. Diese Ballenlänge ist einerseits ein derzeit verwendetes Raster-Maß (halber Ballen), was auch zum Bauen der Demonstratoren und in anderen Objekten in lasttragender Bauweise eingesetzt wird.

Bei der Herstellung von Halben Quaderballen mit einer Länge von 1,20 m ist im Vergleich zu Ganzen Ballen mit einer Länge von 2,40 m herstellungsbedingt darauf zu achten, dass die Einstellung mit abnehmender Ballenlänge erhöht werden muss. Dies liegt an dem automatischen Abbindevorgang in der Ballenpresse. Der sogenannte Knoter hat einen definierten Abstand an

der Oberseite der Ballen. Die Halben Strohballen haben demzufolge die gleiche Entspannung bei einer kürzeren Gesamtlänge, was zu einer Verringerung der Ballendicht führt.

Ernteergebnisse

Es wurde im Projekt bevorzugt Stroh verwendet, was mit Mähdreschern geerntet wurde, die nach dem Rüttlerprinzip die Körner vom Stroh trennen. Bei der Trennung von Stroh und Körnern im sogenannten Hordenschüttler wird das Stroh weniger beschädigt (d.h. geknickt und zerteilt). Der Einsatz von Messern in den Erntemaschinen wurde ausdrücklich nicht durchgeführt.

Grundsätzlich wurde bei der Strohauswahl für die Prüfkörper auf eine lange und intakte Halmstruktur geachtet wurden. Dabei wurden von den Projektpartnern Keller-Stroh und Z-Architektur nach der Ernte Sichtprüfungen des Schwades, Begutachtung der Struktur und Messungen zur Länge der Strohhalme durchgeführt, um eine Eignung festzustellen (Abbildungen 2 und 3). Dabei spielte vorrangig das Ergebnis und nicht die zugrundeliegende Erntetechnik eine maßgebende Rolle.

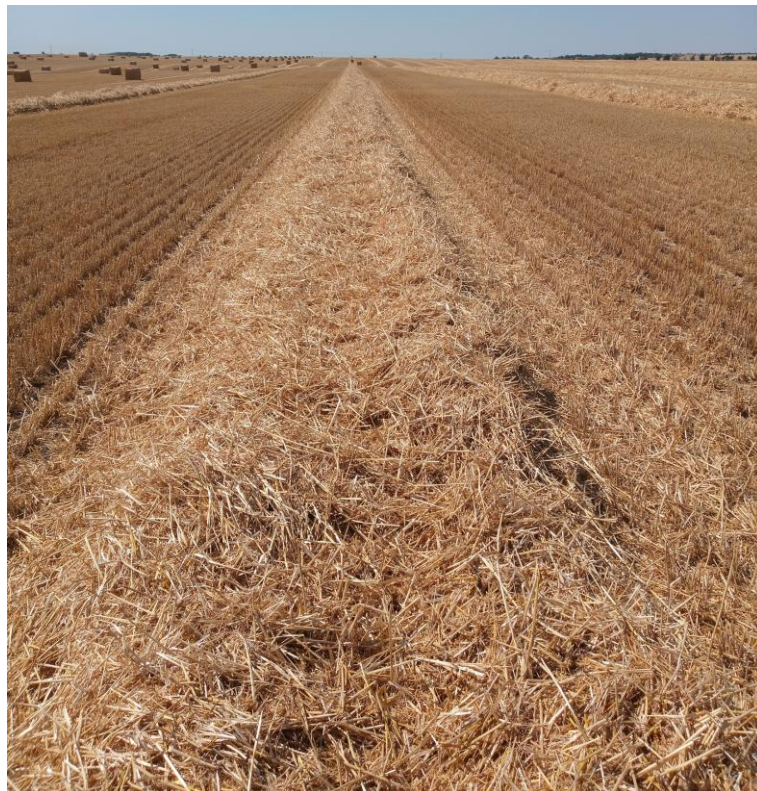


Abbildung 2 Schadsichtung, Ernte 2022 – Quelle: Z-Arch.



Abbildung 3 Prüfung Halmlänge, Ernte 2022 – Quelle: Z-Arch.

Das Stroh wurde gezielt von homogenen Flächen ohne Hügel- und Tallagen gewährt, um gleichmäßige Anbaubedingungen das Stroh eines jeden Prüfkörper zu gewährleisten. Der Beikraut und Fremdstoffanteil wurde im Rahmen der Sichtprüfung des Schades überprüft, und die Randbereiche des Feldes bzgl. eventueller Durchmischung durch benachbarte Feldfrüchte und ungünstigeren Wachstumsbedingungen (Wind/Regen) gezielt für die Herstellung der Quaderballen nicht genutzt. Bei der Sichtkontrolle wurde gezielt nach Verfärbungen, welche auf anhaltende Feuchtigkeitseinwirkungen und Schimmelbildungen hindeuten, kontrolliert. Durch eine gezielte Feldauswahl durch den Projektpartner Keller-Stroh wurden in keinem der Erntejahre 2021 bis 2025 überdurchschnittliche Verfärbungen an den Getreidehalmen festgestellt.

Feuchtemessung

Die Messungen auf dem Feld wurden vor dem Beginn der ersten Probepressungen mittels Handprobe und Feuchtemessgerät (Delmhorst F-2000 bzw. Agreto HFM II) durchgeführt (Abbildung 4). Grundsätzlich sollte zu Beginn der Pressung im Schwad eine Feuchtigkeit von unter 15% angezeigt werden.

Weiterführend wurde Messungen nach dem Lagern und mit Eintreffen auf der Baustelle bzw. im Labor mittels Einstechsonde überprüft. Ballen die offensichtliche zu hohe Feuchtegehalte aufwiesen, wurden nicht verladen.



Abbildung 4 Feuchte-Messgeräte Agreto HFM II für Ernte 2024 (links) und Delmhorst F-2000 für Ernte 2022 (rechts), Quelle: Z-Arch.

Massebestimmung

Die Ermittlung der Ballenmasse konnte aufgrund fehlender Wägetechnik auf dem Feld nur anhand der Angaben der Strohballenpresse auf dem Terminal in der Zugmaschine grob abgelesen werden. Dies wurde zu Beginn der Pressungen im Rahmen der Längeneinstellung der Ballenpresse zusammen mit dem Fahrer eingestellt.

Eine Überprüfung der Ballenmassen wurde nach der Lagerung im Rahmen der Verladung mittels Teleskoplader und Kranwaage durchgeführt (Abbildung 5). Weiterführende Messungen und Dichtebestimmungen wurden im Anschluss in der VTE und MFPA durchgeführt.



Abbildung 5 Ballenmassebestimmung Ernte 2024, Quelle: Z-Arch.

Ernten im Projektzeitraum

Die Herstellung von Probekörpern für die Untersuchungen war zentraler Bestandteil der Forschungsuntersuchungen und eine wichtige Grundlage. Die relevanten Parameter für die Strohqualität und den weiterführenden Pressvorgang wurden dem Projektpartner Keller-Stroh vor der Ernte schriftlich mitgeteilt.

Für eine möglichst tiefgreifende Dokumentation wurde die Ernte- und Pressphase eng zwischen den Projektpartnern abgestimmt. Da die möglichen Produktionstage für die Strohpressung extrem von den Wetterbedingungen in einem sehr kleinen Zeitfenster in den Sommermonaten abhängen, konnten nicht alle Aspekte in der gewünschten Dokumentationstiefe bearbeitet werden.

Zum Projektbeginn wurden vom Projektpartner Quaderstrohballen (Halbe) zur Verfügung gestellt, deren Pressung (2021) vor dem Projektbeginn lag und nicht dokumentiert wurde.

Ernte 2022

Die Strohballenpressung des Erntejahres 2022 wurde grundlegend mit den Projektpartnern besprochen und fachliche Begleitung der Pressung auf dem Feld vorbereitet. Am 11.08.2022 konnte der Projektpartner Keller-Stroh und Florian Hoppe (Z-Architektur) die gewünschten Probekörper und darüber hinaus Quaderballen (ca. 100 Stück) für die Errichtung der Demonstratoren auf einem Feld in der unmittelbaren Nähe der Niederlassung Niedertopfstedt/Thüringen produzieren. Die voran gegangene Ernte und die Pressung der Strohballen konnte bei bestem Sommerwetter (keine Wolken/Niederschlag) durchgeführt werden. Für die Laboruntersuchungen wurden halbe Strohballen (ca. 50 Stück) mit unterschiedlichen Pressdrücken produziert und auf den Strohballen mit Sprühfarbe markiert (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6 Halber Quaderballen mit Markierung, Quelle: Z-Arch.

Es wurden halbe Ballen gemäß der in der Tabelle 1 aufgelisteten Chargen produziert.

Tabelle 1 Markierungen der mit vorgegebenem Pressdruck verdichteten Ballen und zugehörige Rohdichten

Markierung	Pressdruck in %	Rohdichte in kg/m ³
I	100	ca. 200
II	85	ca. 170
III	70	ca. 140

Die Ballen wurden - nach Markierungen sortiert - am Standort Hohennebra in eine trockene Halle zwischengelagert und dort für kleinere Entnahmemengen für die Laboruntersuchungen vorgehalten.

Ernte 2023

Die Ernte und Pressung für den Sommer 2023 wurden mit den Erfahrungen des Vorjahres intensiv vorbereitet. Bis in den September 2023 wurden nach einem sehr feuchten Sommer (viele Niederschläge) alle Ernteerfolge als nicht brauchbar bewertet. So auch die gut belüfteten und besonnten Flächen auf den Anhöhen in Mittelthüringen. Die Feuchtigkeitsschäden (schwarze Verfärbungen), Breikrautanteil und teilweise zu hohe Feuchtigkeitswerte erwiesen sich als nicht brauchbares Ausgangsmaterial für Probekörper und Ballen für Demonstratorbauwerke siehe Abbildung 7 und 8). Eine Pressung im Erntejahr 2023 hat nicht stattgefunden.



Abbildung 7 Verfärbung an Getreidehalmen, Ernte 2023 – Quelle: Z-Arch.



Abbildung 8 Feld bei Vogelsberg (Thür.), Ernte 2023 – Quelle: Z-Arch.

Ernte 2024

Für die Strohballenherstellung im Jahr 2024 konnte wiederholt ein Feld in der unmittelbaren Nähe der Niederlassung des Projektpartners Keller-Stroh in Niedertopfstedt genutzt werden. In diesem Jahr wurden Rekordhitzewerte erzielt, was eine trockene Ernte und Pressung ermöglichte. Der Feuchtigkeitsmangel während der Wachstumsphase beeinträchtigte jedoch den Wachstumsprozess der Getreidepflanze und führte zu sehr spröden und knickanfälligen Halmstrukturen. Dies führte zu einer erheblichen Zerstörung der Halmstruktur durch den Pressvorgang.

Wie in der vorangegangenen Pressung wurden die Strohballen in drei verschiedenen Dichteklassen produziert und markiert (siehe Tabelle 1). Zu den halben Quaderstrohballen (ca. 100 Stück) für die Laboruntersuchungen wurden wiederholt Quaderstrohballen (ca. 100 Stück) für die Demonstratorbauwerke angefertigt.

Um die Daten aus der Strohballenpresse den jeweiligen Probekörpern auf dem Feld zuordnen zu können, wurden jeder Probekörper für die Laboruntersuchungen vermessen (Zollstock und Foto) und mit einer Marke gekennzeichnet (Abbildung 9). Die Dokumentation wurde durch Christopher Taube (BUW) und Florian Hoppe (Z-Arch.) auf direkt auf dem Feld durchgeführt.



Abbildung 9 Dokumentation (Messen, Fotografieren, Markieren), Ernte 2024 – Quelle: Z-Arch

Die Ballen wurden in eine trockene Halle, nach Markierungen sortiert, am Standort Niedertopfstedt zwischengelagert und dort für kleinere Entnahmemengen für die Laboruntersuchungen vorgehalten.

Lagerung und Transport

Die Probekörper und Baustrohballen wurden bis zum Zeitpunkt einer kleinteiligen Entnahme in der Halle zwischengelagert. Die Lagerung nach Markierung/Dichteklassen vereinfachte die Entnahme und Verladung. Die Ballen wurden vor dem Transport auf Feuchtegehalt mittels Messsonde (Delmhorst) und hinsichtlich der Länge mittels Gliedermaßstab überprüft. Bei der Wahl der Probekörper wurde außerdem auf eine möglichst gleichmäßige Quaderform und die intakte und unbeschadete Funktion der Bindegurte geachtet. Die Verladungen und Transporte in die VTE und die MFPA von Niedertopfstedt nach Weimar wurden entsprechend der notwendigen Probekörper mit Anhänger oder Miet-LKW (Avis) durch die MFPA durchgeführt. Bei größeren Bestellmengen hat der Projektpartner Keller-Stroh die Logistik übernommen. Für die Demonstratorbauwerke (Strohklassenzimmer und Strohturm) wurde die gesamte Logistik (inkl. Abladen auf der Baustelle) durch den Projektpartner übernommen. Der dafür notwendige Teleskoplader wurde zusammen mit den Strohballen verladen und zum Einsatzort transportiert (siehe Abbildungen 10 und 11).



Abbildung 10 Transport Baustrohballen und Entladungstechnik, 2024, Quelle: Z-Arch.



Abbildung 11 Stapeln der Probekugeln im Lager, 2024, Quelle: Z-Arch.

Datenerhebung durch Presstechnik

Grundlegend wurde versucht im Untersuchungszeitraum auf die Datenerfassung der Pressmaschinen und deren Herstellers Krone zurückzugreifen. In den Maschinen werden alle praxisrelevanten Eigenschaften eines Strohballes erfasst, dokumentiert und in Zukunft weitergegeben. Dies ist in erster Linie für den Endkunden interessant, um eine lückenlose Kontrolle über die Qualität seines Stroh zu erhalten.

Für die Verwendung von Quaderballen als Bauproduktes ist dies darüber hinaus ein enormer Vorteil, da die genauen Eigenschaftsfeststellung im Herstellungsprozess die weitere Logistik und Gebäudeplanung optimiert und dadurch erhebliche Zeit- und Kostenersparnisse verbunden sind.

Für eine Datenerfassung während der Strohballenherstellung muss die Ballenpresse durch den Eigentümer verifiziert werden. So können die Daten direkt von der Maschine zum Hersteller Krone übermittelt werden.

Das konnte erstmals in der Ernte 2024 erfolgen. Die Auswertung und Weiternutzung dieser Daten ist Bestandteil der TAB-Forschungsgruppe INNOSTROH.

Zusammenfassung Ernten

In den Erntejahren 2022, 24 und 26 wurden Quaderstrohballe mit guten Ergebnissen für die Probekörper und Baustrohballen für die Demonstratorbauwerke produziert. Dabei wurde deutlich, dass die Wachstumsbedingungen einen starken Einfluss auf die Halmstruktur des Getreidestrohs haben. Die kurzen Halme aus dem Jahr 2024 sind dabei vor allem bei der Logistik („Abfall“) und dem Verputzen (Bauprozess) als unvorteilhaft zu bewerten.

Die Markierung der Strohballen mit Dichteklasse und Längenmaß hat sich als notwendige Dokumentationsgrundlage auf dem Feld erwiesen. Um eine eindeutige Zuordnung der übergroßen Bausteine sicherzustellen ist eine gut sichtbare Markierung von allen Seiten eine wichtige Basis für die Planung und Logistik. Das mehrfache Umsetzen und Messen bindet wertvolle Kapazitäten und schadet dem Probekörper und Bauprodukt. Die Ballen werden beim Transport in der Landwirtschaft mit Ballengabeln „aufgespießt“. Dabei besteht die Gefahr, dass Bindegarne verletzt oder beschädigt werden.

Diesbezüglich wurden in dem Forschungsprojekt wertvolle Grundlagen für die Dokumentation erarbeitet. So wurden für die Errichtung des Demonstrators die notwendigen Strohballen in der Lagerhalle beim Projektpartner Keller-Stroh mittels einer großen Schiebelehre exakt vermessen (Abbildung 12). Es wurden nur die Ballen verladen, die für das Bauvorhaben die „richtigen“ Längenmaße aufwiesen.



Abbildung 12 Längenermittlung mit Schiebelehre, 2024, Quelle: Z-Arch.

Die Wägung der Probekörper und Baustrohballen und die damit einhergehenden Dichtebestimmungen wurden stichprobenhaft bei der Verladung im Lager vorgenommen und tiefergreifend im Labor ermittelt. Für die nächsten Erntejahre ist die genaue Massebestimmung auf dem Feld eine wichtige Dokumentationsgrundlage. Hierfür sind geeignete technische Messinstrumente zu finden, die einen praktischen Einsatz auf dem Feld ermöglichen.

Langfristig soll die Dokumentation der Eigenschaften der Strohballen auf dem Feld durch die Datenerhebung der Presstechnik erfolgen. Bis dahin sind vergleichbare begleitende Messungen unerlässlich, um die Genauigkeit der Maschinendaten bewerten zu können.

4.3 Untersuchungen zu den Stroheigenschaften

Stroh als nachwachsender Rohstoff unterliegt als natürliches Produkt erheblichen Schwankungen in seiner Struktur und Beschaffenheit. Diese Variabilität wird maßgeblich durch die Umgebungsbedingungen während des Anbaus beeinflusst, wozu unter anderem Bodeneigenschaften, klimatische Wachstumsbedingungen, Düngungsmaßnahmen sowie die spezifischen Ernte- und Lagerungsbedingungen zählen. Hinzu kommen sortenspezifische Unterschiede der verwendeten Getreidearten (auch bereits unterschiedlicher Weizensorten), die sich ebenfalls auf die Eigenschaften des Stroh auswirken können. Für das lasttragende Bauen mit Strohballen ist daher von Relevanz, inwieweit diese naturbedingten Schwankungen der Stroheigenschaften die mechanischen Kennwerte der gepressten Ballen und damit deren Tragverhalten beeinflussen.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts kann diese komplexe Fragestellung aufgrund des begrenzten zeitlichen und materiellen Umfangs nicht abschließend geklärt werden. Dennoch soll mit einer systematischen Dokumentation der Ballenzusammensetzung und der Stroheigenschaften ein wichtiger Grundstein für zukünftige Untersuchungen gelegt werden. Sofern nachfolgende Versuchsreihen nach demselben methodischen Ansatz begleitet werden, könnte mittelfristig eine ausreichend große Datenbasis entstehen, die statistische Auswertungen und die Ableitung eventueller Kausalzusammenhänge ermöglicht.

Zu diesem Zweck werden aus den geprüften Ballenchargen repräsentative Strohproben entnommen und hinsichtlich mehrerer Parameter charakterisiert. Die Analyse umfasst die Zusammensetzung des Materials nach Anteilen von Bruch, Beikraut und intakten Halmen sowie die Bestimmung der Halmlängenverteilung. Diese Daten bilden die Basis für eine spätere vergleichende Auswertung im Kontext der ermittelten mechanischen Kennwerte.

Abbildung 13 veranschaulicht die Massenanteile von intakten Strohhalmen unterschiedlicher Halmstruktur sowie von Halmbruch und Beikraut für die untersuchten Ballenchargen aus den Wachstumsperioden 2020/21 und 2021/22. Ergänzend sind die aus Wetterstationsdaten im Umkreis von 100 km um die Erntefelder mithilfe der Methode der inversen Distanzwichtung interpolierten Temperatur- und Niederschlagsverläufe über die jeweiligen Wachstumsperioden dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Anbaujahren. In der Wachstumsperiode 2020/21, aus der die Strohballen für die Charakterisierung der mechanischen Kurzzeiteigenschaften stammen, herrschten merklich günstigere Wachstumsbedingungen als in der Periode 2021/22, aus der die Strohballen zur Charakterisierung der mechanischen Langzeiteigenschaften entnommen wurden. Insbesondere Frühling und Sommer 2022 zeichneten sich durch deutlich geringere Niederschlagsmengen im Vergleich zum Sommer 2021 aus, was sich eindeutig in der Halmstruktur widerspiegelt. Aufgrund der Trockenheit wiesen die Strohhalme eine erhöhte Sprödigkeit auf, was (insbesondere beim Pressen) zu einem signifikant höheren Anteil an Halmbruch führte. Der kombinierte Massenanteil von Halmbruch und Beikraut erreichte mit über 50 % der Gesamtmasse nahezu das Doppelte des Vorjahreswertes. Zudem zeigte sich eine deutliche Verschiebung in der Halmlängenverteilung: Der Anteil intakter Halme im mittleren Längenbereich von etwa 10 bis 30 cm war merklich reduziert. Diese strukturellen Unterschiede manifestierten sich auch in den praktischen Handhabungseigenschaften der Ballen. Die Ballen aus der Ernte 2022 erschienen

deutlich bröseliger in ihrer Konsistenz. Die Halme ließen sich mit geringem Kraftaufwand aus der Ballenoberfläche herausziehen, was auf eine verminderte mechanische Verzahnung aufgrund der deutlich kürzeren Halmlängen zurückzuführen ist.

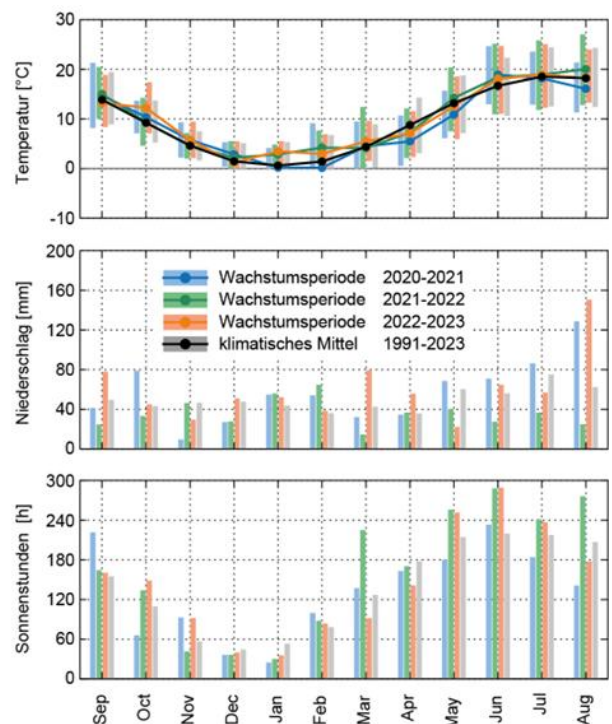
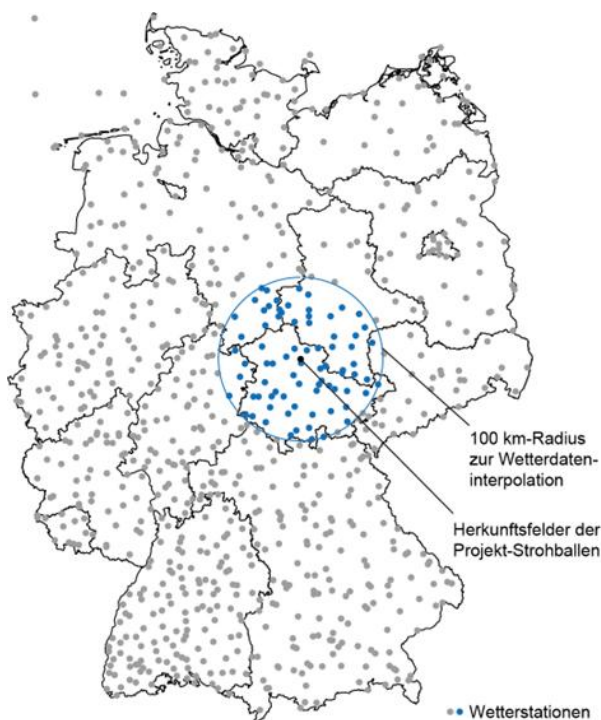
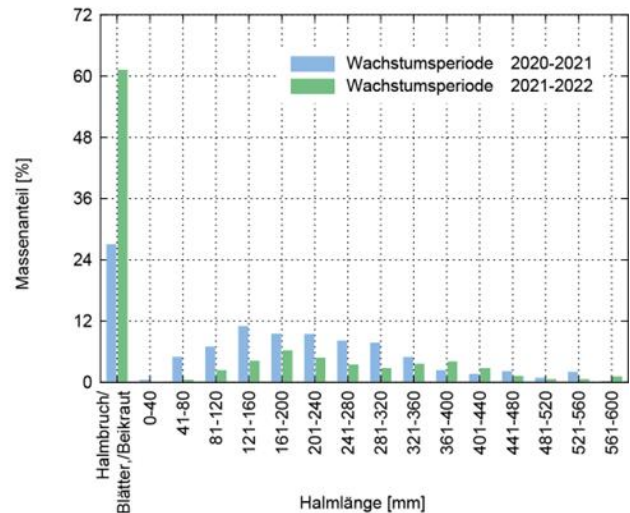


Abbildung 13 Visueller Eindruck (oben links), Halmlängenverteilung (oben rechts) und Klimatische Bedingungen während der Wachstumsperioden der untersuchten Ballenchargen

Im Jahr 2023 konnten überhaupt keine Ballen für Versuchszwecke bereitgestellt werden. Die Erntezeit im August war derart von Niederschlägen bei gleichzeitig weniger Sonnenstunden geprägt, dass keine Strohballen mit geeigneter Feuchtigkeit und somit geeigneter Qualität gepresst werden konnten. Dies unterstreicht, dass die Witterungsbedingungen nicht nur die

Qualität der Strohballen beeinflussen, sondern auch deren generelle Verfügbarkeit im jeweiligen Erntejahr maßgeblich determinieren. Für die Etablierung des lasttragenden Strohballenbaus stellt diese witterungsbedingte Versorgungsunsicherheit eine zusätzliche Herausforderung dar, die in zukünftigen Planungen berücksichtigt werden muss.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind bereits teilweise veröffentlicht [Tauben 2024] und sollen so auch als Beispiel für zukünftige Untersuchungen der Autoren und auch für andere Forschende dienen.

4.4 Charakterisierung des Trag- und Deformationsverhaltens von Quaderballen

Kurzzeitdruckversuche

Für die experimentellen Untersuchungen wurden Großballen in drei verschiedenen Rohdichteklassen (Zielrohddichten: 140/170/200 kg/m³) geprüft, wobei die Rohddichten durch Variation des Pressdrucks beim Ballenprozess eingestellt wurden. Die Ballen wurden als Halbballengeometrie mit quadratischer Grundfläche (120 cm × 120 cm) und einer Höhe von 90 cm konzipiert, um eine gleichmäßige Lasteinleitung zu ermöglichen. Aufgrund produktionsbedingter Unsicherheiten wurden die Ballen mit einer durchschnittlichen Länge von etwa 150 cm hergestellt, wobei eine präzise Längenbestimmung aufgrund der longitudinalen Auswölbung erschwert war. Vor der Prüfung wurden Masse und Feuchtegehalt der Ballen bestimmt und die Trockenrohddichte berechnet, die als Vergleichsparameter für das Last-Verformungsverhalten festgelegt wurde.

Der im Forschungsprojekt entwickelte und in Abbildung 14 dargestellte Versuchsaufbau ermöglicht die Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens unter kontrollierten Randbedingungen. Die Strohballen werden dafür mittels eines servohydraulischen Zylinders vertikal belastet. In Längsrichtung der Ballen (entsprechend der Einbaurichtung im Mauerwerksverband) konnten diese entweder frei verformbar oder mit Querdehnungsbehinderung geprüft werden. Das Belastungsregime orientierte sich (aufgrund mangelnder technischer Regelwerke) an der Prüfvorschrift zur Bestimmung des E-Moduls von Beton nach [DIN EN 12390-13]. Die Ballen wurden stufenweise mit bis zu 60 kN/m² belastet, was weit über den Spannungsniveaus liegt, die aus den geplanten Nutzungen resultieren.

Die messtechnische Erfassung des Verformungsverhaltens erfolgte durch eine Kombination aus elektromechanischer und optischer Messtechnik. Neben der Erfassung von Kräften und Verschiebungen am Hydraulikzylinder wurden die Verformungen der freien Ost- und Westseiten der Ballen mittels optischer Verfahren ausgewertet. Hierfür kamen Kamerasysteme zum Einsatz, die in einem definierten Abstand zur Ballenoberfläche positioniert waren und synchron alle zwei Sekunden ausgelöst wurden. Die Auswertung der Verschiebungsfelder aus den Bilddaten erfolgte mittels Optical-Flow-Algorithmen, deren Parameter im Vorgang der Versuche mithilfe von Referenzmessungen kalibriert wurden. Aus den gewonnenen Verschiebungsdaten auf der Ballenoberfläche können anschließend Dehnungszustände abgeleitet werden.

Die Auswertung der Kurzzeitversuche zeigt deutlich, dass die vertikale Ballensteifigkeit mit zunehmender Rohddichte ansteigt (bzw. die Verformungen unter gleicher Last abnehmen). Die Visualisierung der Dehnungszustände über die Ballenoberfläche (Abbildung 15) zeigt, dass die größten Dehnungen dabei an den Ballenrändern (aufgrund lokaler Dichterelaxation nach dem Auswurf aus der Presse) und in Bereichen lokalen Knickens einzelner Strohschichten auftreten.

Seitlich nicht deformationsbehinderte Ballen weisen ein ausgeprägtes Querdehnungsverhalten auf. Dies entspricht deutlich höheren Querdehnzahlen als bei Kleinballen aus der Literatur. Dehnungsbehinderte Ballen zeigen aufgrund der sich ausbildenden Horizontalspannungen und der damit verbundenen Reduzierung des lokalen Ausknickens der Strohlagen ein steiferes

Verhalten. Der Einfluss der seitlichen Deformationsbehinderung nimmt jedoch mit steigendem Spannungsniveau ab. Dies deutet darauf hin, dass bei ausreichender Aktivierung durch Horizontaldehnung die Ballenbindungen eine ähnlich stabilisierende Wirkung wie externe Verformungsbeschränkungen entfalten.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Kleinballenversuchen aus der Literatur [Molari 2017] zeigt, dass Großballen bei vergleichbarer Rohdichte deutlich kleinere Dehnungen und damit ein signifikant steiferes Verhalten aufweisen (Abbildung 16). Im Vergleich mit Versuchsergebnissen an ganzen Großballen (240 cm Länge, 70 cm Höhe) aus der Literatur [MFPA 2017] zeigen sich trotz unterschiedlicher Ballengeometrien und Versuchsrandbedingungen vergleichbare Dehnungsniveaus, was auf geringe Maßstabseffekte zwischen Halb- und Ganzballen hindeutet.

Im Anschluss an die zyklischen Kurzzeitversuche wurden alle Prüfballen einer permanenten Druckspannung von 20 kN/m² für 30 Minuten ausgesetzt, um das Kurzzeit-Kriechverhalten zu untersuchen. Die Auswertung der Kriechverformungen bestätigt zunächst die bereits aus den zyklischen Versuchen bekannte Tendenz, dass die Kriechdehnungen mit zunehmender Ballenrohichte abnehmen. Allerdings ist dieser Zusammenhang bei der Betrachtung der Kriechzahlen – definiert als Verhältnis von Kriechverformung zu elastischer Sofortverformung – weniger eindeutig ausgeprägt. Die erhöhte Steifigkeit und damit reduzierten elastischen Verformungen dichter Ballen führen dazu, dass deren Kriechzahlen teilweise sogar die Werte weniger dichter Ballen übersteigen können. Ein klarer Einfluss der horizontalen Verformungsbehinderung auf die Kriechneigung lässt sich aus den vorliegenden Versuchsdaten nicht ableiten, was möglicherweise auf die zu geringe Anzahl an Prüfkörpern zurückzuführen ist.

Besonders aufschlussreich ist jedoch die Beobachtung, dass eine Vorbelastung der Ballen mit Spannungen, die über der nachfolgenden Kriechlast liegen, zu einer deutlichen Reduktion der Kriechneigung führt. Dies wird am Vergleich von Versuchen deutlich, die nahezu identische Trockenrohichten aufweisen, jedoch unterschiedlichen Maximalspannungen während der Kurzzeitversuche ausgesetzt waren. Die Kriechverformungen der zuvor kurzzeitig höher beanspruchten Ballen sind deutlich geringer als diejenigen der zuvor nur moderat beanspruchten Ballen. Dieses Phänomen lässt sich durch eine mechanische Verdichtung der Ballenstruktur infolge der Kurzzeitbelastung erklären, bei der zeitabhängige Umlagerungsprozesse auf mikrostruktureller Ebene bereits während der Vorbelastungsphase stattfinden und somit nicht mehr zum nachfolgenden Kriechverhalten beitragen. Diese Vorverdichtung durch mechanische Belastung zeigt eine äquivalente Wirkung zur Erhöhung der Rohdichte durch höheren Pressdruck während der Ballenherstellung. Beide Mechanismen – erhöhte Ausgangsrohichte durch intensiveres Pressen auf dem Feld sowie nachträgliche Verdichtung durch Vorbelastung im Labor – führen zu einer Stabilisierung der Mikrostruktur und damit zu einer Reduktion des zeitabhängigen Verformungsverhaltens. Dies führt für die Baupraxis zu zwei wichtigen Erkenntnissen:

- Sofortige und zeitabhängige Setzungen können sowohl durch eine höhere Ballenrohichte als auch durch eine mechanische Vorbelastung reduziert werden. Die anfänglich im Projekt vermutete Notwendigkeit, Strohballen generell vorzubelasten, um die späteren Deformationen zu begrenzen, ist nur dann gegeben, wenn die Ballen nicht bereits während der Herstellung ausreichend verdichtet werden können.

- Kann die zum Abklingen zeitabhängiger Setzungen notwendige Zeit nicht abgewartet werden, so können diese durch eingebrachte Wanddeformationen (z. B. in Form einer wie auch immer umgesetzten Vorspannung) vorweggenommen werden.

Die durchgeführten Untersuchungen liefern wesentliche Erkenntnisse für die Anwendung von Strohballen im lasttragenden Bauen. Es konnte gezeigt werden, dass Strohballen ein ausgeprägtes Verformungspotential unter Druckbeanspruchung bereitstellen, ohne zu versagen. Die Bemessung sollte daher auf Verformungsgrenzen unter kurz- und langfristigen Lasten basieren, anstatt auf Tragfähigkeiten, da Verformungen im Bereich der Tragfähigkeit für die Baupraxis nicht relevant sind. Analog zur Bemessung im Mauerwerksbau könnte die Definition von Rohdichteklassen für Strohballen mit zugeordneten zulässigen Maximalspannungen sinnvoll sein. Aus den Versuchsergebnissen lässt sich ableiten, dass zur Erhöhung der Wandsteifigkeit auch unter niedrigen Vertikallastniveaus besonderes Augenmerk auf eine dichte Schließung der Stoßfugen im Mauerwerksverband gelegt werden sollte, um eine ausreichende Stabilisierung der Ballenschichten gegen Knicken durch Querdruk zu ermöglichen.

Für zukünftige Arbeiten sind weitere experimentelle Untersuchungen an größeren Versuchsserien notwendig, um den Einfluss von Rohdichte und horizontalen Verformungsbeschränkungen auf das kurz- und langfristige Tragverhalten quantitativ besser zu erfassen. Zudem ist zu prüfen, ob die bisherige Herangehensweise zielführend ist, die Ballenfeuchte durch Betrachtung nur der Trockenrohddichte aus den Untersuchungen zu eliminieren, was durch Untersuchungen an hygroskopisch konditionierten Ballen erfolgen kann. Die aus den Versuchen abgeleiteten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen können als Grundlage für Ansätze zur Materialmodellierung dienen und numerische Untersuchungen des Trag- und Verformungsverhaltens von Ballen und daraus zusammengesetzten Wänden ermöglichen.

Eine ausführliche Dokumentation und Auswertung der Kurzzeitversuche ist in [Taube 2024] veröffentlicht.

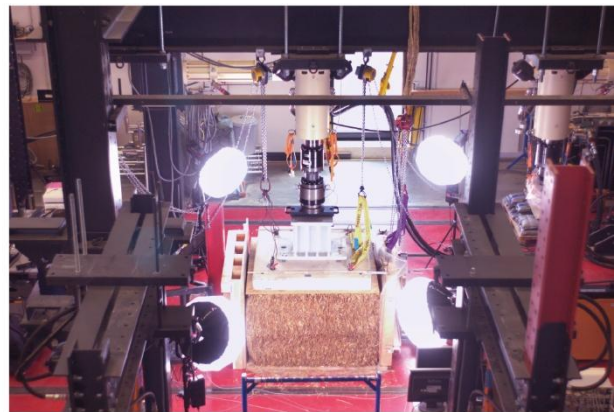
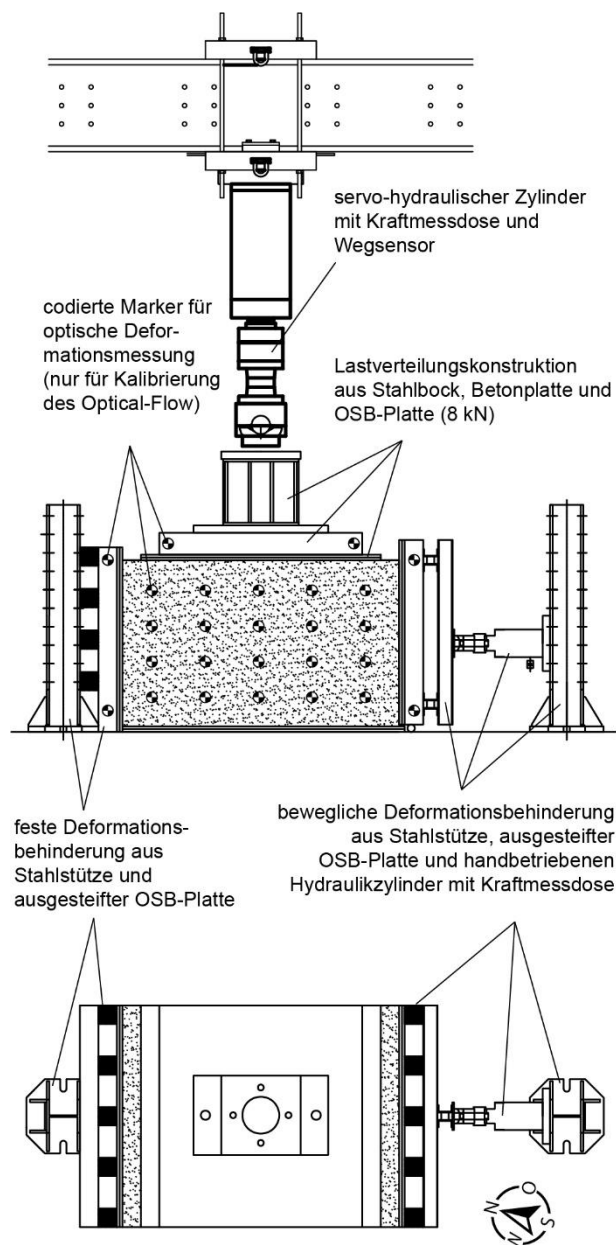


Abbildung 14 Schematischer Versuchsaufbau für die Kurzzeitversuche (links), Versuchsaufbau im Versuchslabor (oben rechts), Ballenoberfläche mit Mess-Markern zur Kalibrierung der optischen Messung (Mitte rechts) und eingesetztes Kamerasystem (unten rechts) (Taubе 2024)

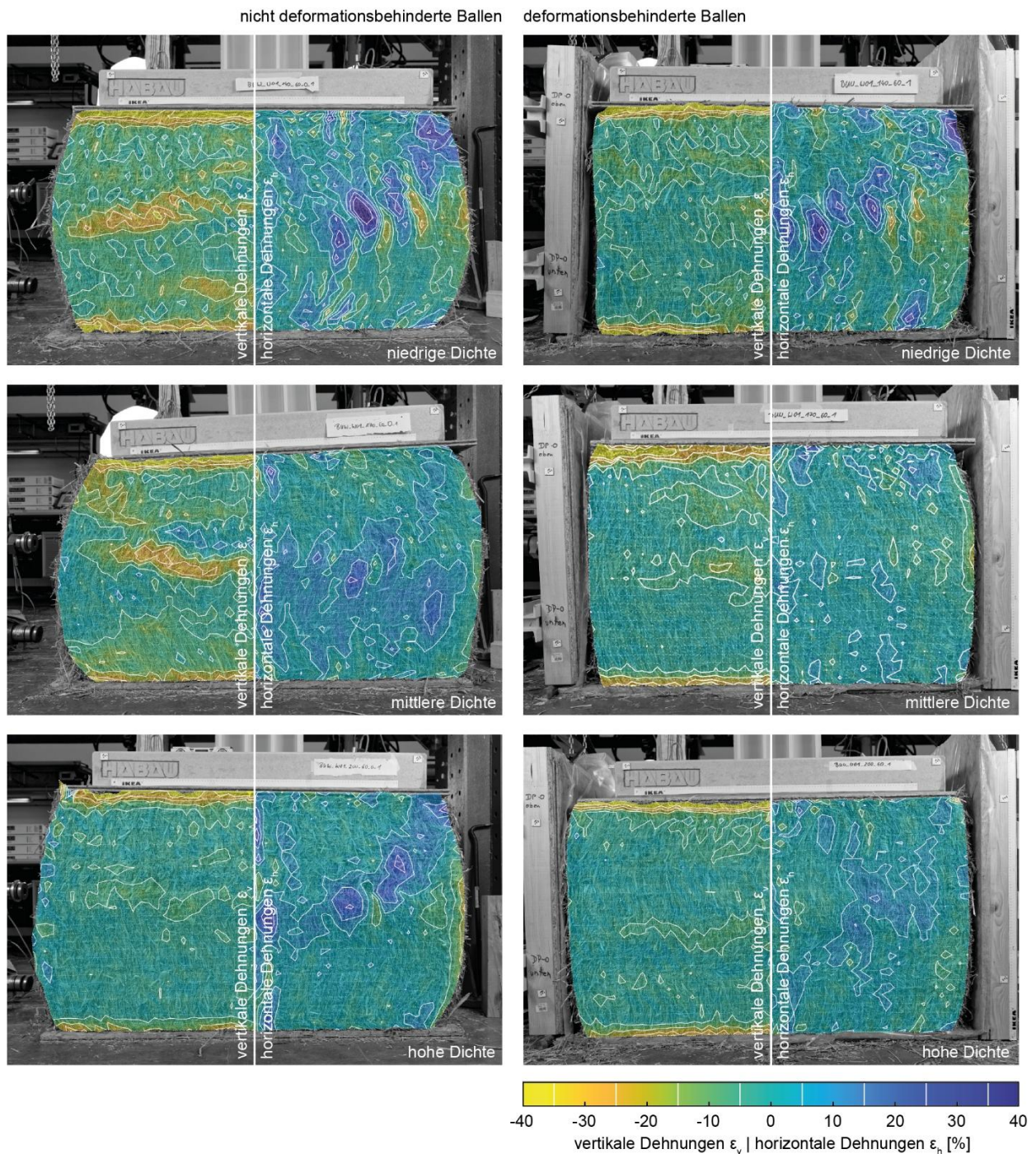


Abbildung 15 Visualisierung der vertikalen und horizontalen Dehnungszustände in den Strohballen unterschiedlicher Dichte unter einer Vertikalspannung von 40 kN/m²: Seitlich nicht deformationsbehinderte Ballen (links) und seitlich deformationsbehinderte Ballen (rechts) (Taubе 2024).

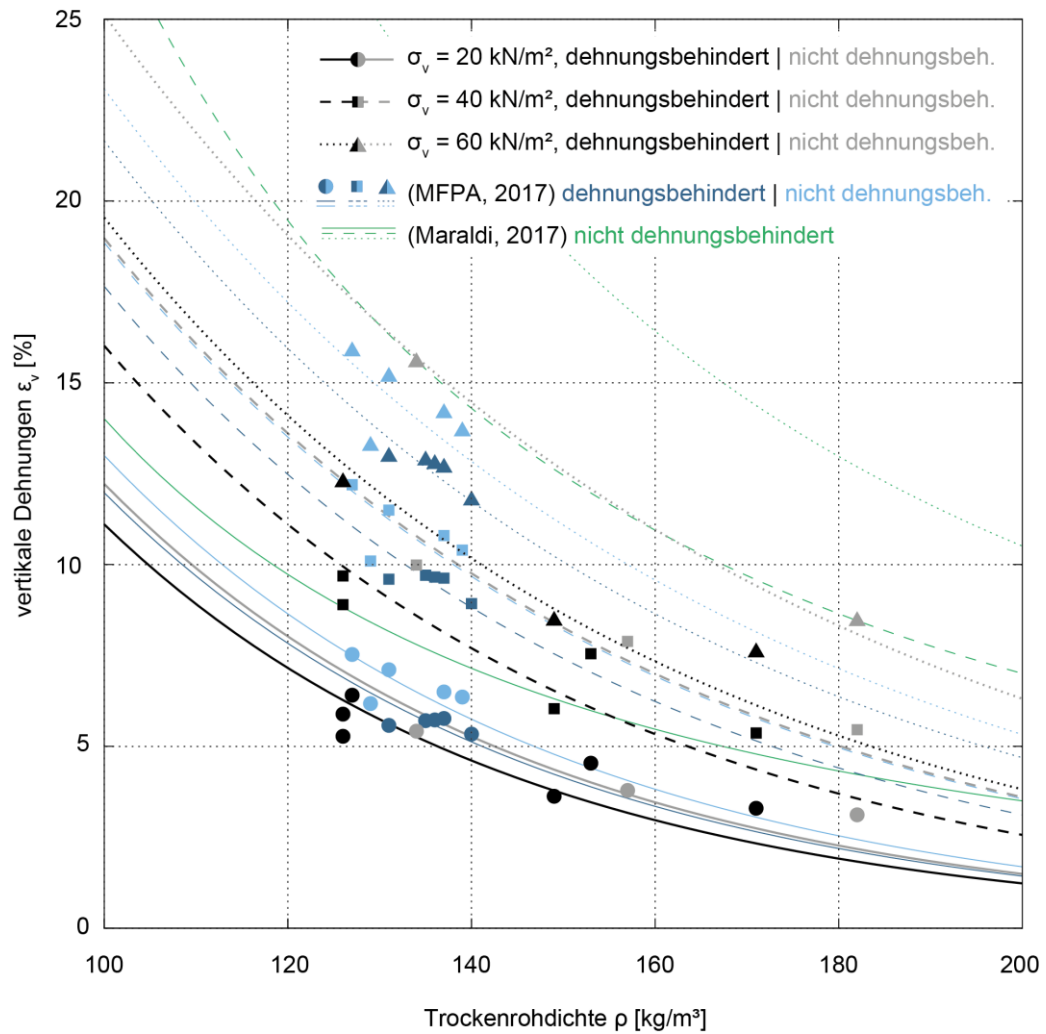


Abbildung 16 Vertikale Ballendehnungen unter verschiedenen Auflasten in Abhängigkeit der Ballenrohddichte: Vergleich zwischen den im Projekt durchgeführten Versuchen und Versuchsergebnissen aus der Literatur [Taubе 2024].

Versuche zum Kriechverhalten

Ergänzend zu den Untersuchungen des Kurzzeittragverhaltens wurden Langzeitversuche durchgeführt, um das zeitabhängige Verformungsverhalten von Strohballen unter Dauerlast zu charakterisieren. Die zeitabhängigen Setzungen von Strohballenwänden stellen eine wesentliche Herausforderung bei der Planung lasttragender Strohballengebäude dar, da sie das Gesamtverformungsverhalten des Tragwerks maßgeblich beeinflussen und bei unzureichender Berücksichtigung zu Schäden an angrenzenden Bauteilen führen können.

Für die Langzeitversuche wurden Strohballen aus der Wachstumsperiode 2021/22 verwendet, die unter deutlich ungünstigeren Wachstumsbedingungen produziert wurden. Der trockene Sommer 2022 führte zu spröden und brüchigen Strohhalmen mit einem signifikant erhöhten Anteil an Halmbruch und Beikraut von über 50 % der Gesamtmasse sowie einer Verschiebung der Halmlängenverteilung in Richtung kürzerer Halme.

Ursprünglich war auch für die Langzeitversuche eine Untersuchung von Ballen aus drei verschiedenen Rohdichteklassen mit Zielrohddichten von 140, 170 und 200 kg/m³ vorgesehen. Aufgrund der trockenen Erntebedingungen war es den Pressen jedoch nicht möglich, das spröde und kurzfasrige Stroh in extrem hohe Rohdichtebereiche zu verdichten. Die meisten Prüfballen lagen daher in einem relativ engen, moderatem Rohdichtebereich nahe beieinander, was sich als limitierender Faktor für die Beurteilung der Rohdichteabhängigkeit des Kriechverhaltens erwies.

Die Ballen wurden erneut in den für die Kurzzeitversuche beschriebenen Versuchsstand eingebaut, wobei die Ballen diesmal ausschließlich mit seitlicher Deformationsbehinderung geprüft wurden. Diese Randbedingung entspricht der realistischen Einbausituation im Mauerwerksverband. Die Versuchsdauer wurde auf jeweils circa sechs Wochen festgelegt – basierend auf Erfahrungswerten aus realisierten Bauprojekten, nach denen die zeitabhängigen Setzungen nach dieser Zeitspanne weitgehend abklingen. Der Einsatz des servohydraulischen Prüfzylinders über mehrere Wochen war aus wirtschaftlichen Gründen nicht praktikabel. Als energiesparende Alternative wurde ein Ballastsystem aus vier Betonplatten mit einer Gesamtmasse von zwei Tonnen konzipiert (siehe Abbildung 17). Dies entspricht einer konstanten vertikalen Druckspannung von circa 12,5 kN/m², was in etwa der Last in der Erdgeschosswand eines zweigeschossigen Wohnhauses entspricht. Das Ballastsystem gewährleistet eine konstante Last über den gesamten Versuchszeitraum ohne aktive Regelung oder Energiezufuhr.

Die messtechnische Erfassung erfolgte durch eine Kombination aus optischer Messung (siehe Kurzzeitversuche) und induktiven Wegaufnehmern an der obersten Lastplatte als Referenz. Ein wesentlicher Vorteil der optischen Messung besteht darin, dass bereits die sofortigen Verformungen beim schrittweisen Aufsetzen der Betonplatten erfasst werden können, was eine klare Trennung zwischen sofortigen und zeitabhängigen Verformungsanteilen ermöglicht. Bereits kleine Winkeländerungen der Kameraausrichtung durch Längsdehnungen des Stativs infolge täglicher und saisonaler Temperaturschwankungen führen jedoch zu Messfehlern von mehreren Millimetern. Da die Temperaturen und Strahlungsverhältnisse in der Versuchshalle nur schwer konstant zu halten sind, wurden ein Temperaturkompensationskonzept mithilfe von festen Messmarken umgesetzt, die durch die Kameras neben den Ballendeformationen mit erfasst werden. Die aus thermischen Effekten resultierenden scheinbaren Verformungen dieser Marken

wurden von den gemessenen Ballenverformungen subtrahiert, wodurch eine temperaturkompensierte Messung mit hoher Genauigkeit realisiert werden konnte.

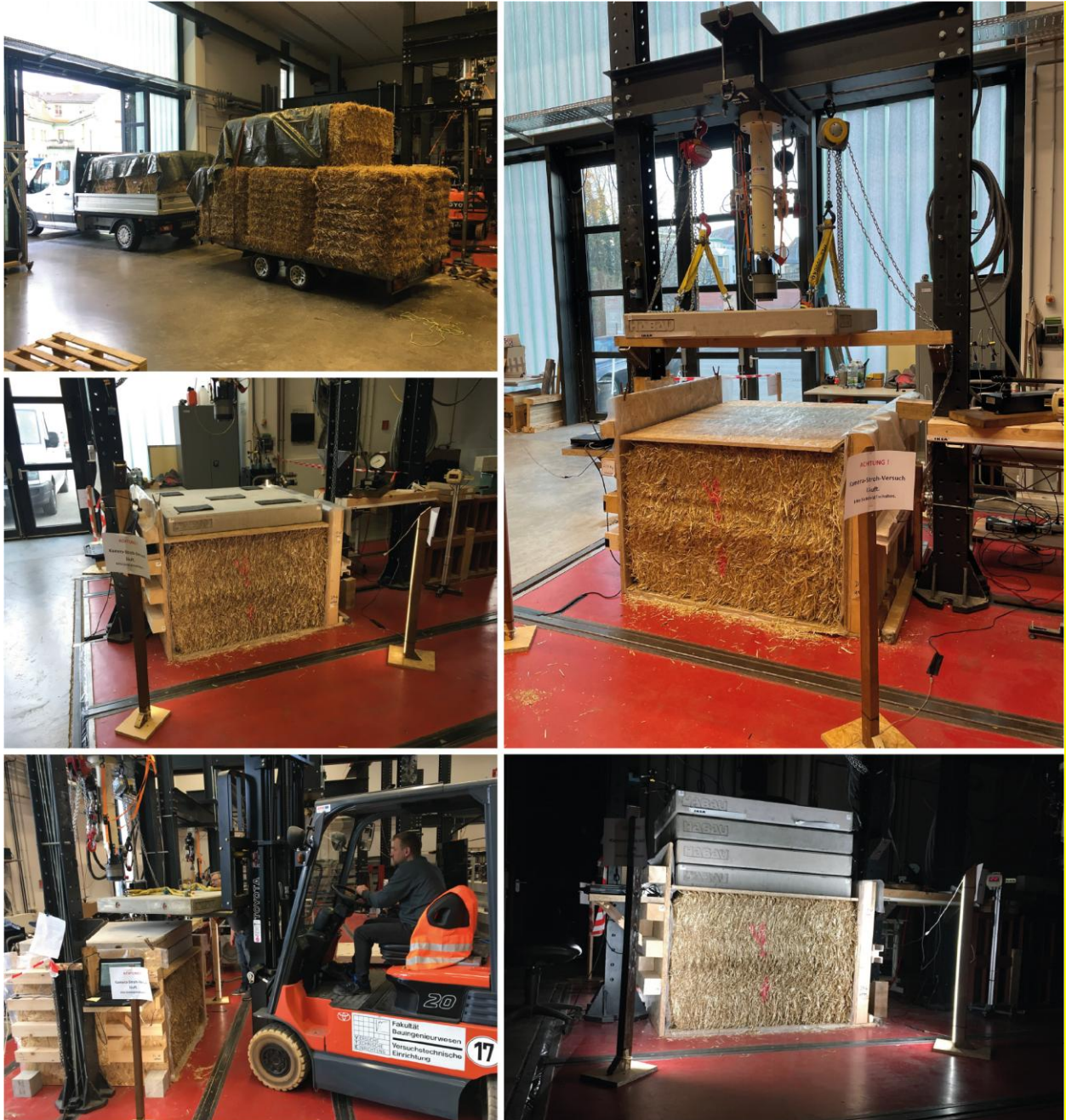


Abbildung 17 Ablauf der Langzeit-Kriechversuche: Ballenanlieferung (oben links), Ballen im Versuchsstand vor (oben rechts) und nach (Mitte links) dem Auflegen der ersten Ballastplatte, Aufladen weiterer Ballastplatten mithilfe des Gabelstaplers (unten links) und Ballen unter voller Dauerlast während des Kriechversuchs (unten rechts).

Die Auswertung zeigt eindeutig ein zeitabhängiges Verformungsverhalten unter konstanter Dauerlast. Die zeitabhängigen Verformungen sind jedoch wider Erwarten gegenüber den sofortigen Verformungen vergleichsweise gering. Im Mittel nehmen die Verformungen über die sechswöchige Kriechperiode lediglich um 10 bis 15 Prozent gegenüber den sofortigen Verformungen infolge der Lastaufbringung zu. Dabei konnte keine eindeutige Rohdichteabhängigkeit der Kriechverformungen festgestellt werden. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die tatsächlich erreichten Ballenrohddichten in einem zu engen Bereich lagen, um statistisch signifikante Unterschiede zu identifizieren. Die Analyse der Kriechkurven zeigt, dass das Kriechen nach sechs Wochen noch nicht vollständig abgeschlossen war. Die Kriechrate hatte jedoch bereits deutlich abgenommen, was auf ein asymptotisches Annähern an einen Endzustand hindeutet.

Im Anschluss an die Kriechphase wurden an allen Prüfbällen Kurzzeitversuche nach dem zuvor beschriebenen Belastungsschema durchgeführt. Trotz des deutlich erhöhten Anteils an Halmbruch und Beikraut sowie der kürzeren Halmlängen konnte keine signifikante Verschlechterung der Kurzzeiteigenschaften im Vergleich zu den Ballen aus der Wachstumsperiode 2020/21 festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass das mechanische Verhalten innerhalb gewisser Grenzen relativ robust gegenüber Variationen in der Halmstruktur und damit der Wachstums- und Erntebedingungen ist, solange die Rohdichte durch entsprechend hohen Pressdruck gewährleistet wird.

4.5 Modellbildung für das Trag- und Deformationsverhalten

Kurzzeittragverhalten von Strohballen

Die Entwicklung eines belastbaren Materialmodells für Strohballen stellt besondere Herausforderungen dar, da aufgrund der großen Unsicherheiten während Wachstum, Ernte, Ballenpressung und Lagerung nur schwer ausreichend viele Prüfkörper mit identischen Eigenschaften gewonnen werden können. Zudem limitieren Größe und Masse der Prüfkörper den praktikablen Umfang experimenteller Versuchsreihen. Konventionelle Modellkalibrierungsansätze, die eine umfassende Abdeckung des Parameterraums erfordern, sind daher nicht praktikabel.

Der in Abbildung 18 dargestellte Modellierungsansatz basiert daher auf einer mathematischen Transformation, die experimentelle Daten verschiedener Prüfkörper in einen einheitlichen Parameterraum überführt, der unabhängig von individuellen Balleneigenschaften ist. Dies ermöglicht eine Modellkalibrierung selbst bei kleinen Versuchsserien. Die zentrale Annahme: Die Ballenrohddichte kann aufgrund der ausgeprägten Verformungskapazität nicht unabhängig vom Dehnungszustand betrachtet werden – wenn ein Ballen zusammengedrückt wird, ändert sich seine Dichte, und diese Dichteänderung ist der Schlüssel zum Verständnis seines Verhaltens.

Zunächst werden die Spannungs-Dehnungs-Linien in den Spannungs-Rohdichte-Raum transformiert, wobei berücksichtigt wird, dass mit zunehmender Ballenverformung die Rohdichte steigt. Die initiale Trockenrohddichte wird unter Berücksichtigung des Feuchtegehalts bestimmt,

wodurch die Feuchte als expliziter Modellparameter eliminiert wird. Die transformierten Kurven zeigen, wie die Rohdichte mit zunehmender Spannung ansteigt, bleiben aber zunächst prüfkörperspezifisch, da die Kurve jedes Ballens die Rohdichteachse bei seiner spezifischen Anfangsrohddichte kreuzt. Anschließend werden die Spannungs-Rohdichtebeziehungen durch Ableitung nach der Rohdichte weiter transformiert. Die dadurch gewonnenen Anstiege sind der Schlüssel zur Modellbildung: Während die ursprünglichen Kurven prüfkörperspezifisch waren, hängen die Steigungen nur noch von der aktuellen Rohdichte ab, nicht mehr vom individuellen Ballen.

Diese Steigungen werden durch eine einfache lineare Beziehung angenähert, die das mittlere Materialverhalten repräsentieren. Durch mathematische Integration wird diese Beziehung wieder in Spannungs-Rohdichte-Kurven überführt, wobei die Integrationskonstante so gewählt wird, dass jede Kurve bei der jeweiligen Anfangsrohddichte durch null geht. Die Vorhersage bei Nulllast ist damit immer exakt; Unsicherheiten treten erst bei zunehmender Belastung auf. Schließlich erfolgt die Rücktransformation in den Spannungs-Dehnungs-Raum, wodurch ein quadratisches Materialmodell entsteht.

Die Anwendung auf die untersuchten, deformationsbehinderten Strohballen zeigt vielversprechende Ergebnisse (Abbildung 18). Das Modell approximiert die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen im Mittel gut, wobei die breiten Prädiktionsintervalle die natürliche Variabilität des biologischen Materials widerspiegeln. Interessanterweise fällt der quadratische Koeffizient ein bei individueller Modellkalibrierung an den Einzelversuchen systematisch höher aus als bei kombinierter Kalibrierung auf alle Versuche, was darauf hindeutet, dass die Rohdichte allein möglicherweise nicht ausreicht, um das Materialverhalten vollständig zu charakterisieren.

Für seitlich nicht deformationsbehinderte Ballen versagt das Modell jedoch grundlegend: Die Vorhersage zeigt Versteifung, während die Experimente Entfestigung aufweisen. Die Ursache liegt in den ausgeprägten Querdehnungen, die zu einer effektiven Dichteabnahme führen und damit die fundamentale Modellannahme verletzen. Für ungespannte Ballen müssen multiaxiale Effekte – einschließlich vertikaler und horizontaler Dehnungen sowie der Einfluss der Bindegarne – explizit berücksichtigt werden.

Zusammenfassend ermöglicht der vorgestellte Ansatz durch geschickte mathematische Transformation eine Modellkalibrierung mit wenigen, nicht identischen Prüfkörpern. Für die in der Baupraxis relevanten, im Wandverband horizontal dehnungsbehinderten Ballen liefert das Modell brauchbare Vorhersagen als Grundlage für erste Bemessungsansätze. Für eine umfassende Charakterisierung unter verschiedenen Randbedingungen sind jedoch größere Versuchsserien und die Berücksichtigung multiaxialer Effekte erforderlich.

Die Ergebnisse der mechanischen Modellbildung werden im Rahmen des IABSE Symposium 2026 in Kopenhagen dem Fachpublikum vorgestellt [Taubke 2026].

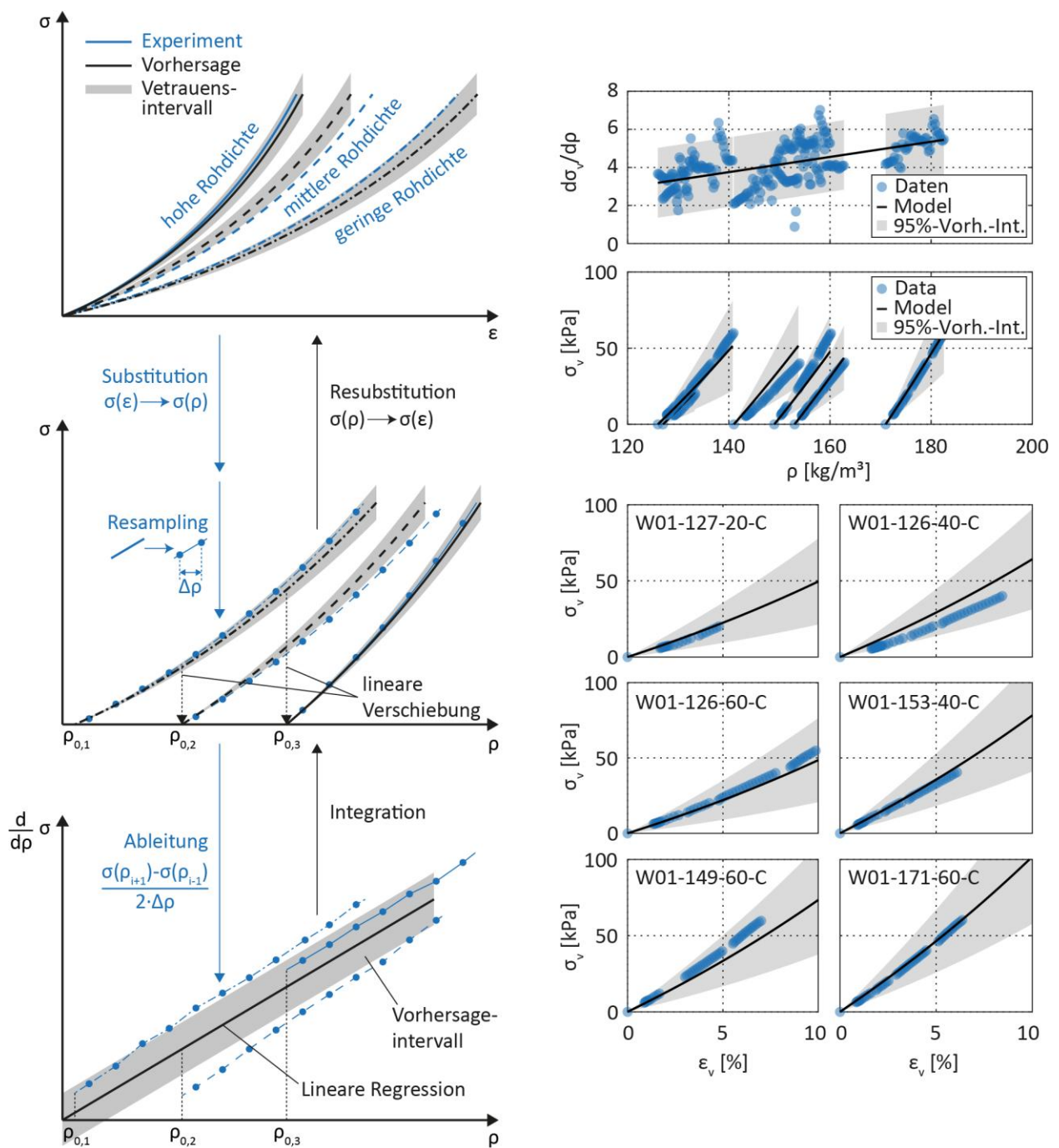


Abbildung 18 Modellbildung des Kurzzeit-Tragverhaltens: Vorgehensweise der Modellbildung (links) und Modellvorhersage der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der seitlich deformationsbehinderten Strohballen (rechts) [Taubé 2026].

Langzeittragverhalten von Strohballen

Während für das Kurzzeittragverhalten eine rohdichteabhängige Modellierung entwickelt werden konnte, erwies sich dies für das Kriechverhalten als nicht möglich. Die geprüften Ballen lagen aufgrund der ungünstigen Erntebedingungen in einem relativ engen Rohdichtebereich, wodurch keine statistisch abgesicherte Rohdichteabhängigkeit identifiziert werden konnte (Siehe Abbildung 19 (links)). Daher erfolgte die Modellbildung pragmatisch auf Basis des Mittelwerts der gemessenen Kriechkurven.

Als mathematischer Ansatz wurde das Kriechmodell nach Eurocode 2 gewählt, das ursprünglich zur Beschreibung des Kriechverhaltens von Beton entwickelt wurde. Dieses Modell beschreibt die zeitliche Entwicklung der Kriechdehnung durch eine hyperbolische Funktion mit wenigen Parametern: eine Endkriechzahl und ein Zeitparameter. Die Wahl dieses etablierten Ansatzes bietet den Vorteil, dass die Modellstruktur in der Ingenieurpraxis vertraut ist, auch wenn sich die physikalischen Mechanismen bei Strohballen (Umlagerung der Halmstruktur) von denen bei Beton (viskoses Fließen) unterscheiden.

Das in Abbildung 19 (rechts) dargestellte kalibrierte Modell kann die mittlere Kriechentwicklung über den sechswöchigen Beobachtungszeitraum gut abbilden, wobei die Abweichungen zu einzelnen Kriechkurven teils erheblich sind. Ein bemerkenswertes Ergebnis ist die verhältnismäßig geringe Endkriechzahl von etwa 0,2 – die sofortigen elastischen Verformungen nehmen über die Zeit also "nur" um etwa 20 Prozent zu. Zum Vergleich: Beton weist zwar deutlich geringere sofortige Deformationen auf, diese nehmen unter Dauerlast jedoch nicht selten um das Zwei- bis Dreifache zu (Kriechzahlen von 2 bis 3). Trotz dieser günstigen Kriechzahl zeigt die Modellvorhersage einen wichtigen Aspekt: Nach sechs Wochen – dem Beobachtungszeitraum der Experimente – sind erst etwa 55 Prozent der finalen zeitabhängigen Verformungen erreicht. Dies bedeutet, dass auch nach dieser initialen Setzungsphase noch erhebliche weitere Verformungen zu erwarten sind, wenn auch mit deutlich reduzierter Geschwindigkeit.

Für die Baupraxis hat dies wichtige Implikationen: Es ist zu vermuten, dass in Strohballenwänden über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes allmähliche Kraftumlagerungsprozesse zwischen den kriechenden Strohballen und den deutlich steiferen Putzschichten stattfinden. Mit fortschreitendem Kriechen würde ein zunehmender Anteil der Lasten von den Putzschalen übernommen.

Diese Erkenntnisse unterstreichen den weiteren Forschungsbedarf: Neben der Untersuchung der Rohdichteabhängigkeit an größeren Versuchsserien sind Langzeitversuche mit Beobachtungszeiträumen von mehreren Monaten bis zu einem Jahr erforderlich. Zudem sollten zukünftige Untersuchungen das Zusammenwirken von Strohballen und Putzschalen betrachten, um die vermuteten Kraftumlagerungsprozesse experimentell zu verifizieren und deren Auswirkungen auf das Langzeittragverhalten zu quantifizieren.

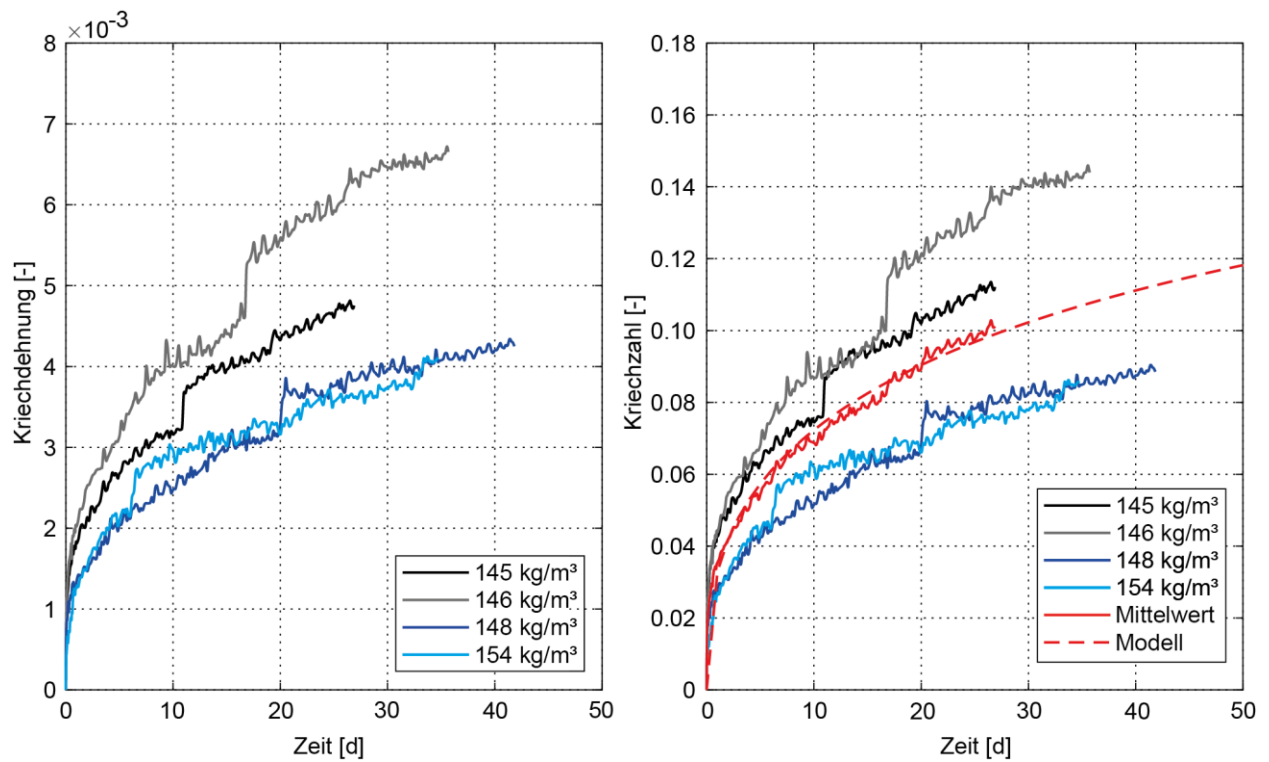


Abbildung 19 Kriechdehnungen (links) und Kriechzahlen (rechts) für eine Auswahl der unter Kriechbeanspruchung getesteten Strohballen mit Mittelwerten und Modellapproximation.

4.6 Charakterisierung der Wärmeleitfähigkeit von Quaderballen

Einordnung der Aufgabenstellung

Bei der Verwendung von Quaderballen in lasttragender Bauweise werden sehr große Außenwanddicken (1,2 m) aus Stroh erreicht. Damit ist eine gute Voraussetzung gegeben, energieeffiziente Bauteile mit extrem großen Wärmedurchlasswiderstand R herzustellen. So sind Werte von $R = 15 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ und auch größer erreichbar. Die Wärmeverluste über solche Außenwände aus Quaderballen in lasttragender Bauweise sind folglich in der Praxis tendenziell extrem klein.

Die Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten dieser Strohballen-Wände setzt die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des gepressten Strohs voraus. Der gepresste Strohballen ist nicht homogen und nicht isotrop. Das heißt, seine Materialeigenschaften und damit auch die Wärmeleitfähigkeit ist einerseits nicht an allen Stellen in Ballen gleich und andererseits auch nicht unabhängig von der Richtung des Wärmeflusses durch den Ballen.

Das Ziel im Vorhaben war es deshalb, für die vorliegenden Strohballen unter Berücksichtigung von deren Einbaulage im Gebäude, die mittlere Wärmeleitfähigkeit durch den Strohballen realistisch zu messen. Als Einbaulage wird in dem vorliegenden Projekt immer „flach liegend“ angenommen. Diese Aussage bezieht sich sowohl auf die statischen und wärmetechnischen Untersuchungen als auch auf die errichteten Demonstratoren.

In der MFPA sind für die Messung der Wärmeleitfähigkeit an großen Probekörpern zwei Prüfverfahren vorhanden: Die Messung im Plattengerät und die Messung im Wandprüfständen (Abbildung 20). Während das Plattengerät für Probekörper mit maximalen Abmaßen von $90 \times 90 \text{ cm}$ und Dicken bis ca. 20 cm geeignet ist, haben die Probekörper bei der Wandmessung Abmaße von $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ und können eine Dicke bis 50 cm haben.



Abbildung 20 Prüfstände zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an großen Materialproben: Plattengerät (links) und Wandprüfstand mit typischem Probekörper (rechts)

Herausforderungen bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit

Die vorliegenden Quaderballen aus Weizenstroh haben – verglichen mit den sonst üblichen Probekörpern – sehr große räumlich Abmessungen. Die zur Messung zu Verfügung stehenden Quaderballen (Halbe Ballen) haben die Abmessungen (Höhe 90 cm; Breite 1,2m; Länge 1,2 m). Damit übersteigen die Abmaße deutlich die in den zur Verfügung stehenden Prüfständen (Plattengerät und Wandmessung) verwendbaren Abmaße der Probekörper.

Die gepressten Quaderballen sind außerdem in ihrer Form relativ unregelmäßig – Stroh ist ein Natur- und kein Industrieprodukt. Die Ballen weisen in Anlieferungszustand an verschiedenen Stellen auch deutlich unterschiedlich Dicken auf. Außerdem sind die äußeren Oberflächen der gepressten Quaderballen sehr uneben und keinesfalls für eine Messung ausreichend planparallel zueinander. Die innere Struktur der Ballen und die Halmausrichtungen im Ballen sind beeinflusst durch die Herstellung in der Ballenpresse: Ein Kolben bewegt sich - periodisch wiederholend – durch den Pressschacht und legt dadurch die Strohhalme verdichtet lagenweise im Schacht ab. Sind genügend Halmlagen abgelegt, dann wird der im Schacht verdichtete Ballen mit Bindschnüren abgebunden.

Bedingt durch den Herstellungsprozess sind die Strohhalme im Wesentlichen parallel zu den Oberflächen der einzelnen abgelegten Halmlagen und damit nicht in Ballenlängsrichtung - orientiert. Eine vorzugsweise Ausrichtung senkrecht oder parallel zur Wärmeflussrichtung durch einen flach liegenden Ballen kann

Es bestand die Aufgabe, aus den halben Ballen Probekörper für die Messungen herzustellen. Dabei war das Ziel, einerseits die Wärmeflussrichtung bei der Messung im Prüfstand so einzustellen, dass sie identisch ist mit der Wärmeflussrichtung in der realen Einbaulage im Bauwerk. Andererseits war es das Ziel, die Ballen in der vorliegenden Rohdichte zu bewerten. Das heißt, dass die vorhandene Pressung (Vorspannung) des Ballens durch die Bindung nicht verändert werden darf.

Eine Herstellung von in der Größe für die Messgeräte (Wandprüfstand, Plattengerät) passenden Probekörper darf außerdem keinesfalls die Lage und Ausrichtung der Strohhalme vom Originalballen verändern. Auch die Kraft der Pressung (Druck durch Bindung) sollte nicht verändert werden.

Herstellung der Probekörper

Am Anfang des Projektes wurden Versuche unternommen, die Ballen mit einer händisch geführten Kettensäge durchzuteilen und ebenfalls mit dieser Technik an den Rändern zu begradigen (siehe Abbildung 21). Es zeigte sich, dass die hochverdichtet gepressten Quaderballen mit einer Kettensäge geschnitten werden können. Allerdings zeigte sich auch, dass es schwer war, die Säge händisch mit der erforderlichen Genauigkeit zu führen. Zudem mussten dabei die Erfordernisse des Arbeitsschutzes berücksichtigt werden, was sich bei einer händischen Führung der Kettensäge als schwierig erwies.



Abbildung 21 Schneiden eines Quaderballens mit einer Kettensäge, Fixierung des Ballens in einem Holzkastens

Nachdem die Machbarkeit der Ballenschnitte durch eine Kettensäge nachgewiesen war, konnte die Lösung der oben beschriebenen Anforderungen zur Herstellung der Probekörper durch die Anschaffung einer elektrisch betriebenen Kapp-Kettensäge für das Projekt herbeigeführt werden. Mit dieser Kettensäge können große Quaderballen bis zur Länge von 1,5 m in flach liegender Lage durchteilt werden. Der Schnitt erfolgt dabei parallel zur Lage der Bindegarne, durchtrennt diese also nicht. Außerdem ist es mit dieser Säge möglich, parallel zur Bindung auch die äußeren Oberflächen der Ballen zu begradigen und damit zwei ebene, planparallele Oberflächen für genaue Messungen der Wärmeleitfähigkeit herzustellen.

Abbildung 22 zeigt die Kapp-Kettensäge (Fa. LOGOSOL) im Einsatz. Im Bild wurde ein Quaderballen mit halber Länge (1,20 m) parallel zu den Bindschnüren durch einen ebenen Schnitt in der Dicke halbiert. Der Ballen im Bild ist für eine Wandmessung bestimmt.

Das Sägeblatt bewegt sich – geführt auf beiden Seiten – während des Sägeschnittes von oben nach unten. Durch die doppelseitige Führung des Sägeblattes ist es mit dieser Säge möglich, die Schnitte in der erforderlichen Exaktheit durchzuführen. Mit der Säge wurden aus einem Ballen halber Länge jeweils ein Ballen für eine Wandmessung und zwei Ballen für eine Messung im Plattengerät hergestellt (Abbildung 22 rechts). Die Ballenabschnitte für die Messung im Plattengerät mussten nach dem Schnitt noch auf die Länge von 90 cm abgebunden werden. Das

erfolgte mit großer Vorsicht, um die Dichte des Ballens nicht zu verändern. Die anschließende Sicherung des Probekörpers mit einem Spanngurt zeigt Abbildung 23.

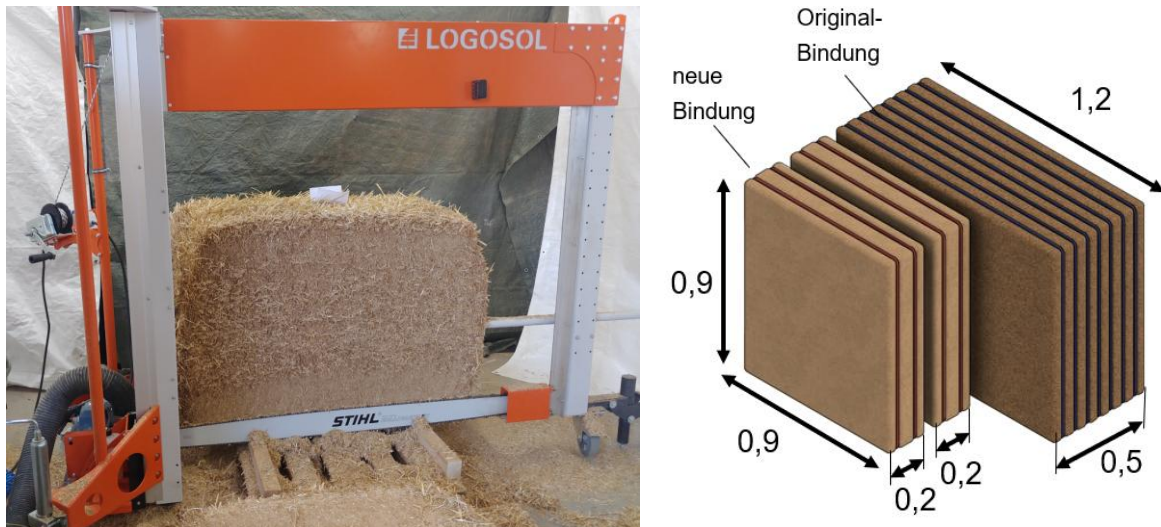


Abbildung 22 links: Kapp-Kettensäge zum Teilen eines Quaderstrohballens in Probekörper, rechts: Herstellung von drei Probekörpern für Wandmessung und Plattengerät



Abbildung 23 Sichern eines abgebundenen Ballens mit Spanngurten als Vorbereitung für die Messung im Plattengerät

Wandmessungen der Wärmeleitfähigkeit

Die ersten Messungen im Wandprüfstand wurden durchgeführt an einem Probekörper, dessen Oberfläche mit einem Armierungsmörtel ausgeglichen wurde, um ebene Oberflächen und auch eine feste Unterlage für die Befestigung der Sensoren zu erhalten. Dazu wurde der Probekörper in einen Holzrahmen eingebaut.

In Abbildung 24 sind im linken Bild die auf der Warmseite des Probekörpers installierten Temperatursensoren zu sehen. Im Mittenbereich des Probekörpers wird nachfolgend eine Wärmestrommessplatte installiert, bevor der Probekörper mit Prüfmaske in die Doppelklimakammer eingebaut wird. Die Messung lässt sich am derart mit Putzschichten versehenen Stroh-Probekörper in gleicher Weise durchführen, wie üblicherweise Mauerwerk zum Beispiel aus Leichthochlochziegeln geprüft wird. Ein Nachteil des Verputzes ist neben der relativ aufwendigen Herstellung, dass der Probekörper sich nicht mehr in relativ kurzen Zeiten hygrysch konditionieren lässt (mittels Durchströmung).



Abbildung 24 Messungen an einem verputzten Probekörper im Holzrahmen: Probekörper im Holzrahmen in der Prüfmaske eingebaut mit Temperatursensorbelegung (links), Probekörper nach den Ausbau aus dem Holzrahmen (rechts).

Die weiteren Messungen im Wandprüfstand wurden unter Verwendung des Holzrahmens durchgeführt, ohne jedoch aber die Oberfläche mit Putz abzugleichen. Hierbei wurden die Sensoren einschließlich der Wärmestrommessplatte direkt auf der Strohballenoberfläche befestigt. Um ein dichtes Anliegen der Wärmestrommessplatte an der Strohoberfläche zu gewährleisten, wurde sie auf eine starre Kunststoffplatte aufgeklebt und mit zwei dünnen Spannbändern aus Kunststoff an der Ballenoberfläche fixiert (Abbildung 25). Um eine Luftdurchströmung des Probekörpers während der Messung zu verhindern, wurde die gesamte Ballenoberfläche einschließlich der ausgestopften Fugen mit selbstklebendem Kreppband luftdicht abgeklebt.



Abbildung 25 Wandmessung am nicht verputzten Probekörper: Rechts Einbau mit Holzrahmen in die Prüfmass, links oben: Befestigung der Wärmestrommessplatte mit gespannten Kunststoffbändern, links unten: Luftdichtes Abkleben der Oberflächen mit selbstklebendem Kreppband.

Messung im Plattengerät

Die Messung im Plattengerät erfolgte an 15 bis 20 cm dicken Probekörpern. Abbildung 26 zeigt die Vorrichtung zur Trocknung der Probe in der Trockenkammer mittels Luftdurchströmung

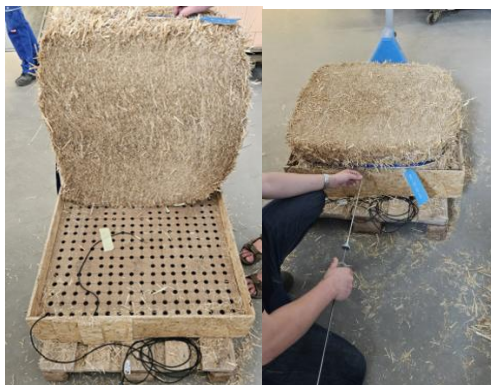


Abbildung 26 Vorrichtung für die Trocknung der Probekörper für Messung im Plattengerät

Es wurde während der Trocknung ein Absenkung der rel. Luftfeuchte auf Werte unter 10% r.H. nachgewiesen. Abbildung 27 zeigt die vorbereitende Dickenmessung der Probe.



Abbildung 27 Dickenbestimmung der Strohballenprobe zwischen zwei Holzwerkstoffplatten (links), Demonstration der Ebenheit der Schnittoberfläche mit Stahllineal (rechts)

Abbildung 27 zeigt den Einbau des Stroh-Probekörpers in das Plattengerät. Die Probe ist seitlich mit Stretch-Folie umwickelt.

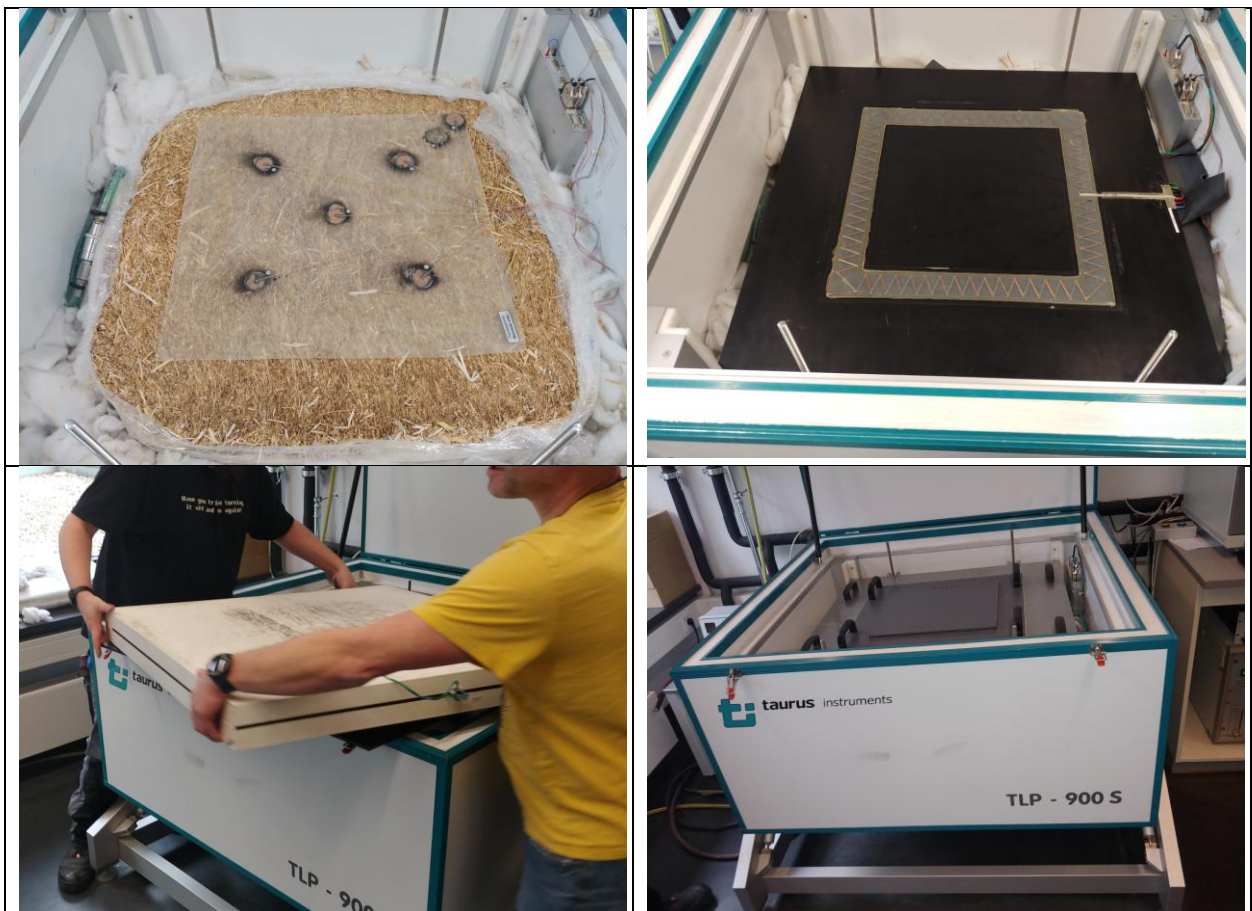


Abbildung 28 Einbau in das Plattengerät: oben links: Probekörper mit Thermoelementen auf unterer Kühlplatte liegend, oben rechts: Heizplatte mit Schutz-Randheizung, unten links: Einbau Gegenheizung für Einplattenverfahren, unten rechts: fertiger Einbau mit oberer Kühlplatte und Beschwerungsplatte

Hygrische Konditionierung und Trocknung der Probekörper

Es wurde im Projekt ein spezieller Raum aufgebaut, in dem Probekörper aus halben Quaderballen hygrisch konditioniert werden können. Der Raum besteht aus einer Einhausung mit Folienmaterial. Im Inneren des Raums wurde eine geregelte Luftbefeuchtung aufgebaut. Eine Temperaturkonditionierung (Kühlung) ist in diesem Raum allerdings nicht möglich.

In den Raum wurden die hygrisch zu konditionierenden Probekörper eingestellt. Der Prozess des Feuchteausgleiches zwischen der Raumluft und dem Probekörper wurde dadurch intensiviert und beschleunigt, dass die feuchte-konditionierte Raumluft (zum Beispiel 80% r.H.) mit Hilfe eines Ventilators durch den Probekörper durchgesaugt wurde.

Der Strohballen liegt dafür in einem Kasten, der einen luftdurchlässigen, doppelten Boden hat, über welchen Luft durch den Ballen nach unten abgesaugt wird. Das ist möglich, da auch ein dicht gepresster Strohballen immer noch luftdurchlässig ist. Der Strohballen-Probekörper wird dafür seitlich mit Stretch-Folie umwickelt, damit die konditionierte Luft auch den gesamten Ballenquerschnitt durchströmt. Diese Abdichtungsschicht ist – ebenfalls mit Stretchfolie – an den Kasten zur Absaugung angedichtet. Um den hygrischen Konditionierungsvorgang nachzuvollziehen, wurde die Luftfeuchte während der Durchströmung im Balleninneren gemessen.



Abbildung 29 Konditionierung der Feuchte von Probekörper mit hygrisch konditionierter Raumluft, Kasten mit luftdurchlässigem Boden und angeflanschem Ventilator

In analoger Weise wurden die Probekörper auch getrocknet für eine Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand. Hierzu wurden der Probekörper mit Kasten und Absaugvorrichtung in eine Trockenkammer eingestellt. Die Trocknung erfolgte für die Strohballen bei 60°C.

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit - Messergebnisse

Tabelle 2 zeigt die Messwerte, die mittels Wandmessung an halben Ballen der Ernte 2021 nacheinander im trockenen und feuchten Zustand gemessen wurden.

Tabelle 2 Wandmessungen an halbierten Quaderballen im trockenen und feuchten Zustand

Bezeichnung	Dichte in kg/m ³	Feuchte in M-%*	Wärmeleit- fähigkeit in W/(m K)	Umrechnungs- faktor für Feuchte- gehalt f_m [-]
B4.1 unverputzt, getrocknet bei 60°C	180 trockene Rohdichte	0	0,0697	-
B4.1 unverputzt, konditioniert (80%r.H. bei ca. 27°C)	207 **	15	0,0902	1,29 ***
B4.2 verputzt, getrocknet bei 60°C	186 ** trockene Rohdichte	0	0,0644	-
B4.2 (verputzt, nicht konditioniert, Feuchte wie angeliefert, ca. 65% r.H.)	205	10	0,0780	1,21 ***

* gemessen mit Einstichsonde Delmhorst F2000

** umgerechnet mit Feuchtemesswert

*** intensive Feuchteumlagerungsprozesse während Messung im feuchten Zustand beobachtet

Während der Wandmessung wurden in den feuchten Ballen massive Feuchteumverteilungsvorgänge in Verbindung mit der Einstellung des thermischen Gleichgewichtszustands (stationärer Zustand) festgestellt. Abbildung 29 zeigt die in dem Ballen installierten Sensoren.



Abbildung 30 Feuchtemessung im Inneren eines zu prüfenden Probekörpers: links: Ahlborn-Datenlogger mit angesteckten Sensoren, rechts: Probekörper 4.1 mit installierten Sensoren.

Die Feuchtesensoren messen dabei jeweils 5 cm unter der Oberfläche der Kalt- und der Warmseite und in der Ballenmitte. Die Aufzeichnung der Feuchten an drei Messstellen im Inneren des Ballens ist in Abbildung 31 dargestellt.

Die linke Graphik zeigt die Temperaturen und die rechte die relativen Luftfeuchten, die sich im Ballen während der Wandmessung einstellen. In der linken Graphik ist zu sehen, dass sich etwa 5 Tage nach dem Messbeginn ein stationärer Zustand einstellt (keine Veränderungen der Temperaturen mehr).

In der rechten Graphik zeigen die Kurvenverläufe des mittleren Sensors (blau) und Sensors unter der Kaltseite (grau) dass nach 5 Tagen bis zum Ende der Messung die Feuchte im Ballen noch kontinuierlich zunimmt. Die rechte Graphik zeigt damit die Feuchteumverteilung von der Warmseite zur Kaltseite während der Messung.

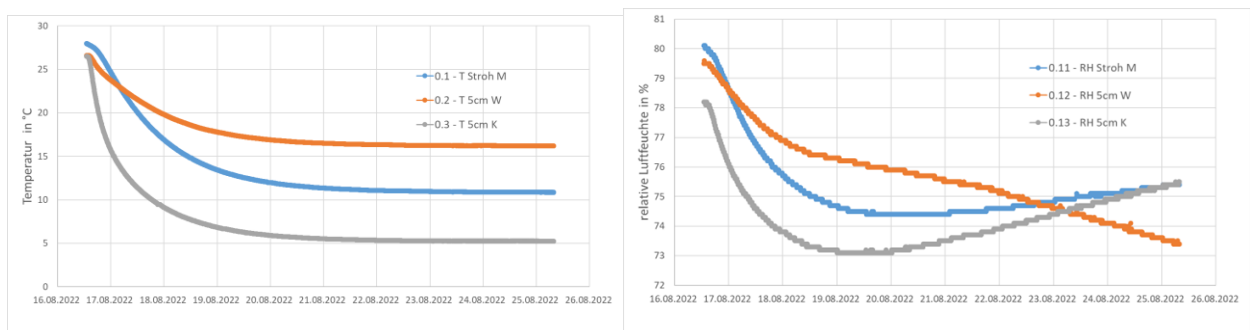


Abbildung 31 Temperatur- und Feuchtemessung im unverputzten Ballen während der Wandmessung (Anfangsfeuchte auf 80% r.H. konditioniert)

Die aufgezeigte Feuchteumverteilung hat immer auch einen Einfluss auf die Energieströme über die Oberflächen des Probekörpers. Deshalb sind auch die in Tabelle 2 dargestellten ermittelten Feuchteumrechnungsfaktoren mit besonderer Vorsicht zu interpretieren. Die weiteren Messungen wurden im Projekt ausschließlich an trockenen Probekörpern durchgeführt.

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der Messungen der Wärmeleitfähigkeit für die Ballenernte 2022.

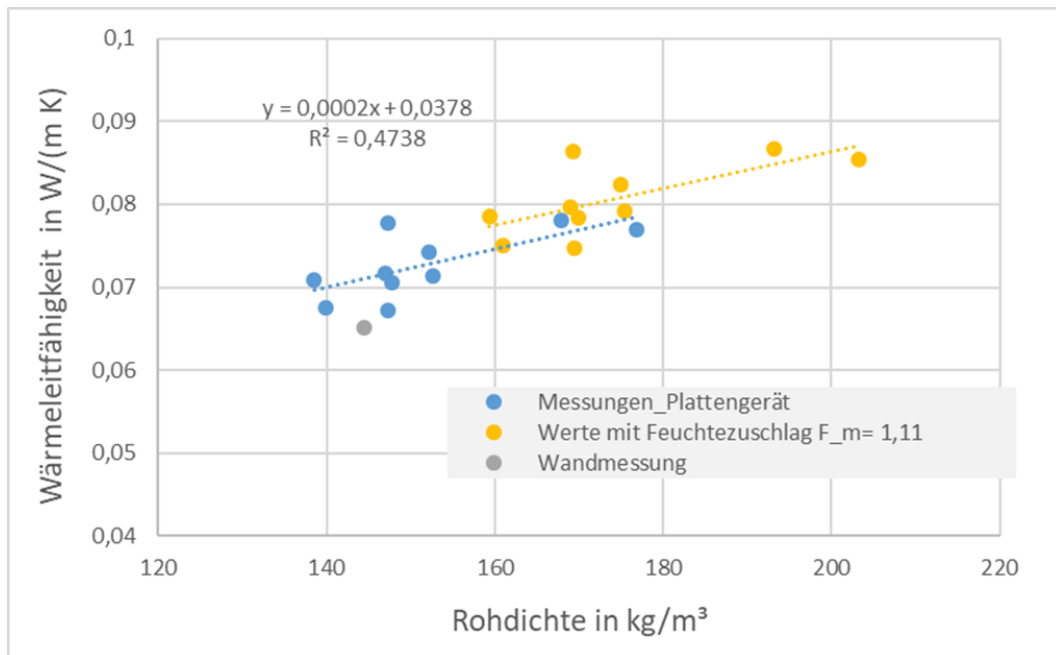


Abbildung 32 Messwerte der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte für die Ernte 2022

Die im trockenen Zustand ermittelten Messwerte wurden mit dem Feuchteumrechnungsfaktor $F_m = 1,1$ nach DIN 4108-4 umgerechnet.

5 Demonstratoren für lasttragende Strohballenbauweise

Während der Projektlaufzeit wurden durch die Kooperation drei Demonstrator-Bauwerke in lasttragender Strohballenbauweise realisiert:

1. landwirtschaftliches Nutzgebäude („Schafstall“),
2. temporäres Schulgebäude („Strohklassenzimmer“)
3. zweigeschossiges Forschungsgebäude („Strohturm“)

Die Verwendung und Eignung des unregelmäßigen Bauproduktes Quaderstrohbälle für die lasttragende Bauweise musste für die Bauvorhaben im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) und einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG) nachgewiesen werden. Der Antrag auf ZiE/vBG wurde bei der Obersten Bauaufsichtsbehörde des Freistaates Thüringen eingereicht, während beim der zuständigen Unteren Bauaufsichtsbehörde die öffentlich-rechtlichen Belange im Rahmen eines Bauantragsverfahren beantragt wurden.

Die Demonstrator-Bauwerke wurden forschungsbegleitend geplant und errichtet. Die Ergebnisse sind ein Resultat eines praxisorientierten Planungs- und Bauablaufes und berücksichtigen die nutzungsspezifischen Anforderungen.

Zu Beginn waren zwei Gebäude für die Nutzung als Demonstratoren in diesem Forschungsprojekt geplant. Im Jahr 2024 konnte der Forschungspartner Diakonie Landgut Holzdorf gGmbH dazugewonnen werden, um die Untersuchungen zur lasttragenden Strohballenbauweise mit einem temporären Schulgebäude am Standort Holzdorf zu bereichern.

5.1 Demonstrator „Schafstall Hof Herten“

Der beim Projektpartner Hof Herten im Sommer 2023 errichtete Schafstall soll ganzjährig den im Freien gehaltenen Schafen und einigen Ziegen einen Witterungsschutz vor Kälte, Sonnenstrahlung, Wind und Regen bieten. Den Unterstand können die Tiere bei Bedarf selbst aufsuchen. Der landwirtschaftlich genutzte Hof liegt im Landkreis Saalfeld-Rudolstadt in der Nähe von Teichel in Alleinlage auf den Westausläufern des Viebergs mit über 508 m über NN in einer exponierten Wetterlage. Abbildung 33 zeigt die geographische Lage und den Ort des Demonstrators im Hof Herten (roter Pfeil).

Das Gebäude ist auf einer frei bewitterten Fläche ohne nahe gelegene schützende Nachbargebäude oder Bewaldungen errichtet. Es ist somit einer starken Belastung durch Bewitterung (Wind, Regen) ausgesetzt und ermöglicht im Rahmen des Forschungsprojektes die Auswirkungen von extremen Witterungsbelastungen auf das Gebäude in einem Langzeittest zu beobachten.



Abbildung 33 Lage vom Hof Herten in offener Landschaft bei der Ortschaft Haufeld (linkes Bild) und Standort des Demonstrators Schafstall Hof Herten, roter Pfeil (rechtes Bild). Quelle: Google Maps

Das Gebäude ist nach der Vorderseite offen gebaut. Die Vorderseite ist nach Osten ausgerichtet. Durch diese offene Seite ist der Unterstand mit einem Radlader befahrbar. Das ist notwendig, um den Stall maschinell auszumisten zu können.

Die Konzeption und Planung des Gebäudes wurde durch den Projektpartner Z-Architektur in enger Absprache mit Familie Herten durchgeführt. Abbildung 34 zeigt ein Foto aus der Bauzeit und den Grundriss vom Schafstall.

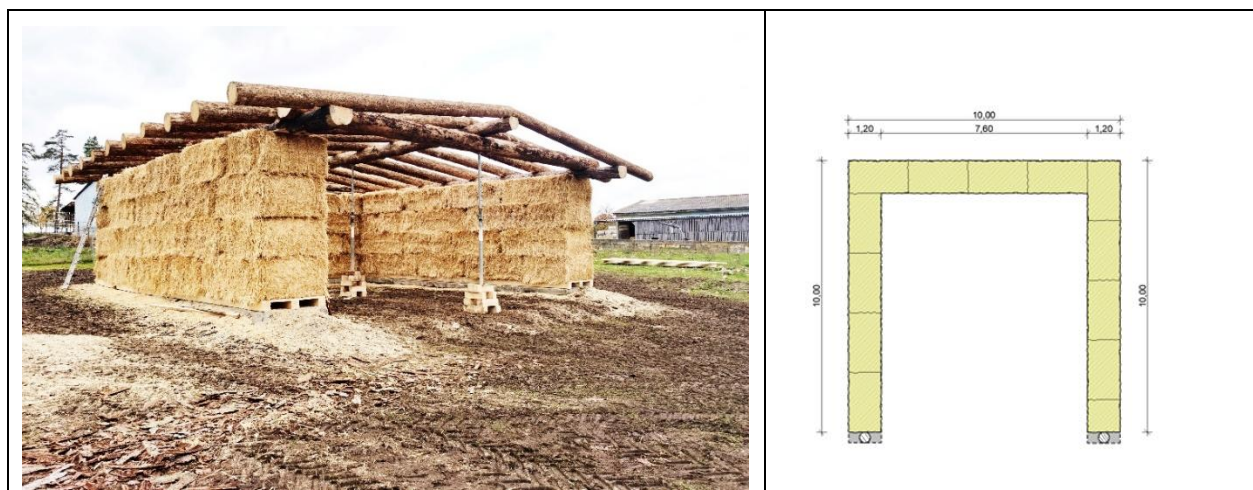


Abbildung 34 Schafstall im Hof Herten, Grundrissplanung (rechts) und Rohbauzustand (links)

Baukonstruktion

- Gründung:
- vorhandene, gebrauchte Straßenplatten auf Sand bzw. Schotterbett
 - Wandfuß aus Holz, unterlüftete Konstruktion
- Außenwände:
- Großballen aus Weizen-Langstroh (unverputzt),
 - Ballen wurden selbst durch den Landwirt selbst gepresst
- Dachkonstruktion
- Rundhölzer aus Nadelholz-Stämmen (Totholz), die auf dem Grundstück durch den Landwirt selbst geschlagen wurden
 - Dachaufbau mit Holzschalung und Gründach (geplant)

Planung

Auf dem Grundstück des landwirtschaftlichen Projektpartners Hof Hertens sollte eine landwirtschaftlich genutzte Hallenkonstruktion als Unterstand errichtet werden. Die Grundfläche durfte nach §63 (1), 1c ThürBO nicht überschritten werden. Ein Bauantragsverfahren wurde zu diesem Demonstrator-Bauwerk nicht durchgeführt.

Grundsätzlich benötigt der Landwirtschaftsbetrieb Hof Hertens für die Tierhaltung Unterstellmöglichkeiten für die Freilandhaltung. Für die Nutzung als Schafstall wurde auf einer Grundfläche von 100m² ein landwirtschaftliches Nutzgebäude errichtet bei dem die Tiere einen freien Zugang erhalten. Eine Befahrbarkeit durch Landtechnik sollte durch eine möglichst breite und hohe Tor- bzw. Fassadenöffnung ermöglicht werden. Das Gebäude ist als Kalthalle geplant und besitzt keine Dämmung im Fußboden- und Dachbereich.

Über die Nutzung des eigenen Demeter-Weizenstrohs für die Quaderballen hinaus, bestand die Aufgabenstellung darin, möglichst viele vorhandene Baumaterialien vom eigenen Hof für das Bauwerk zu verwenden. So konnte für die Gründung ein benachbartes Kieswerk die Schotterauflage für alte Betonfahrbahnplatten aus DDR-Zeiten bereitstellen. Eine Tiefengründung/Bodenaustausch musste bzgl. des direkt anliegenden Felsgrundes nicht vorgenommen werden.

Die Wandfußausbildung konnte mit einer Holzkonstruktion über die gesamte Wandbreite von 1,20 m aus den eigenen Baumbeständen als Zuschnitt ausgeführt werden. Die darauf im Verband gestapelten Quaderballen wurden aus langem Weizenstroh auf den eigenen Anbauflächen produziert. Die Ballen besitzen die Abmessungen von 1,20 Breite und 0,70 m Höhe und wurden für dieses Bauvorhaben mit einer Länge von 2,20 m gepresst. Die für den Verband notwendigen Halben Ballen (Länge 1,10 m) wurden bereits auf dem Feld vorgefertigt.

Die Dachkonstruktion wurde mit Rundhölzern aus den eigenen Holzeinschlägen geplant. Im Zusammenhang mit der massiven Rundholzkonstruktion und der nachfolgenden Gründacheindeckung besitzt die Außenwand aus Quaderballen ausreichende Auflast, um die auftretenden Horizontallasten sicher in den Untergrund abzutragen.

Durch die schwere Eindeckung besitzt das Dach für die angreifenden Windkräfte in dieser sehr exponierten Höhen- und Wetterlage genügend Auflast, und bietet den Tieren in den heißen Sommermonaten einen behaglichen Unterstand.

Ausführung

Das Gebäude wurde durch Ansgar Herten, seine Mitarbeiter und Florian Hoppe im November 2023 errichtet. Als Vorbereitung wurde die Gründung nach vorliegendem Fundamentplan bauseits ausgeführt.

In den kommenden fünf Tagen wurde die gesamte Dachkonstruktion aus Rundhölzern auf der Gründung vorgefertigt. Die Strohballenkonstruktion und die anschließende Installation des vorbereiteten Dachstuhls wurden in zwei Tagen mittels Landmaschinentechnik gesetzt.

Für eine gleichmäßige Setzung wurden die geplanten Innenstützen entlang des Unterzuges mit flexiblen Bauzeitstützen versehen und im Rahmen der Rohbauphase entsprechend nachgestellt. Nach einer Setzungszeit von einem Monat wurden zwei Stützen auf der Ostseite auf flexiblen Stützenfüßen eingebaut.

Durch die MFPA wurde der Aufbau des Gebäudes mit einer stationären Kamera gefilmt. Das daraus entstandene Video dokumentiert die Errichtung des Gebäudes. Es ist im youtube-Kanal der MFPA eingestellt. Es kann unter dem Link in Tabelle 3 betrachtet werden.

Tabelle 3 Web-Links zu Video und Internetbeiträgen über Schafstall im Hof Herten

Landwirtschaftliches Nutzgebäude aus lasttragenden Strohballen https://www.youtube.com/watch?v=4IJ1LyKuX-o	
---	---

Erfahrung bei der Nutzung

Die Strohballen waren im ersten Winter nicht geschützt, weder durch einen Verputz noch durch eine Verbretterung. Während der Nutzung beobachtete Familie Herten, dass die Ziegen – die in der Schafherde zum Verbiss/Bekämpfung dorniger Sträucher auf der Weide aufgenommen sind – auch die Strohballenwände des Unterstandes „anknapperten“, wodurch längerfristig die Gefahr der Zerstörung bestand. Deshalb wurde der Schafunterstand im zweiten Jahr der Nutzung nachträglich mit vertikal angebrachten Schwartenbrettern im unteren Bereich der Außenwand verschalt und damit gegen einen Verbiss geschützt. Zusätzlich stellt sich durch diese hinterlüftete Verschalung auch ein verbesserter Schutz gegen Schlagregen zumindest im unteren Bereich des Gebäudes ein.

Im oberen Bereich bleibt das Gebäude weiterhin ungeschützt, womit einige Flächen des Gebäudes weiterhin einer freien Bewitterung ausgesetzt sind.

Die Erfahrungen des Landwirtes mit der Nutzung des Gebäudes sind positiv. Der Unterstand wird durch die Tiere angenommen und bei Bedarf, d.h. bei belastender Witterung durch diese genutzt.

Abbildung 35 zeigt den Schafstall Hof Herten im dritten Winter seiner Nutzung.



Abbildung 35 Schafstall Hof Herten im dritten Winter der Nutzung, Ansichten aus Richtung der Wetterseite West (oben links) und Ost (oben rechts), Detailansichten der Beplankung Westseite (unten links) und der inneren Verbretterung (unten rechts).

Feuchtemonitoring am Demonstrator

Das Feuchtemonitoring wurde über den bisherigen Nutzungszeitraum mit einem Strohfeuchtemessgerät (Einstichsonde Fa. Agreto) in monatlichen Messabständen durch den Projektpartner Hof Herten durchgeführt. Dabei wurden Messwerte jeweils oberflächennah und in der Tiefe des Ballens ermittelt.

Es zeigte sich, dass eine temporäre oberflächliche Befeuchtung von bewitterten Stroh-Schichten immer wieder abtrocknete und bisher nicht zu langfristig erhöhten Feuchtwerten in tieferen Schichten der Ballen führten. Im Inneren der Ballen wurden stets Werte zwischen 9 und 12 M-% gemessen. Oberflächennah wurden maximale Werte zwischen 14 und 16 M-% ermittelt.

Nach der ersten Winterperiode zeigten die Strohballen dabei folgende interessante Auffälligkeit: Kurzes Stroh war – vor allem in den unteren, damals noch nicht verbretterten Wand-Bereichen - aus der Ballenoberfläche herausgewittert und nach unten gefallen. Das oberflächennahe lange Stroh hing in der Folge des Verlustes von Kurzstroh an der Fassade nach unten, die Strohhalme ordneten sich dabei herabhängend nebeneinander, ähnlich wie bei einem Strohdach oder einem Heuschober an.

Es wird angenommen, dass sich durch die sich so einstellende Oberflächenstruktur ein gewisser Eigenschutz der bewitterten Strohoberfläche vor Durchnässung einstellt, indem ähnlich wie bei einem Stroh- bzw. Reetdach oder auch bei zum Trocknen oder zur Lagerung aufgeschichteten Heuhaufen (Heureiter, Heuschober), das Regenwasser nur an den einzelnen äußeren Halmen hängenbleibt und zügig abgeführt wird (abtropft bzw. durch Verdunstung abtrocknet). Dadurch wird dahinter liegendes Heu oder Stroh geschützt und bleibt langfristig hinreichend trocken.

Informationen zur traditionellen Getreide- und Heulagerung bzw. -trocknung in Heureitern, Heuschobern, Diemen findet sich im Wikipedia-Artikel [<https://de.wikipedia.org/wiki/Dieme>].

5.2 Demonstrator „Strohklassenzimmer“

Das „Strohklassenzimmer“ ist eingeschossiges, temporäres Gebäude des Projektpartners Diakonie Landgut Holzdorf gGmbH mit zwei Klassenräumen für die Ausbildung von Pflegefachkräften. Es wurde als Alternative zu einer angedachten temporären Containerlösung errichtet. Abbildung 36 zeigt die Lage des Strohklassenzimmers im Landgut Holzdorf.



Abbildung 36 Landgut Holzdorf mit Strohklassenzimmer (roter Pfeil). Quelle: Google Maps.

Der dringende temporäre Platzbedarf war wegen einer anstehenden grundlegenden Renovierung eines der Hauptgebäude der Hofbebauung des Landgutes Holzdorf entstanden, was durch die Evangelische Pflegeschule Weimar-Holzdorf zur Ausbildung von Pflegefachkräften genutzt wird.

Da für das benötigte Ersatzgebäude eine auf fünf Jahre befristete Nutzungsdauer (Renovierungsdauer des Hauptgebäudes) geplant ist, konnte eine besonders einfache und in einigen Details auch durchaus etwas „experimentelle“ Baukonstruktion geplant, genehmigt und realisiert werden.

Die Objektplanung wurde durch den Projektpartner Z-Architektur erarbeitet. Die Fachplanerleistung zur Standsicherheit wurde vom Statikbüro Goldbach übernommen und zusammen mit dem Projektpartner BUW durch das Bauantragsverfahren und die notwendige ZfE/vBG begleitet.

Die verdichtete und ungebundene Schottergründung wurde durch den Sachverständigen Prof. Dr. Robert Wudtke betreut. Als Schulbau mit dem Sonderbaustatus wurde die Brandschutzplanung von Sylvia Kaleta betreut.

Baukonstruktion

Gründung:	Wandfuß aus Holzpaletten auf Schotterbett mit eingeschobenen Längshölzern für Aussteifung/Verspannung, unterlüftet, Bauvliesauflage unter erster Strohballenschicht
Fußboden:	Kleinballen- Strohschicht auf Holzpalettenlage mit Bauvlies, unterlüftet OSB-Platten - schwimmend verlegt, verleimt, Fugen luftdicht mit Klebebändern abgeklebt Dielung mit Rauspund
Außenwände:	Quader-Großballen, 1,20 m stark, innen und außen mit Lehm verputzt, Westgiebel zusätzlich mit Holz verschalt
Ringanker:	Holzpaletten mit eingeschobenen Längshölzern für Aussteifung/Verspannung,
Dach	Brettschichtbinder, vorgefertigt Unterspannbahn (diffusionsoffen) Dacheindeckung mit Trapezblech
Decke	Kleinballen zwischen Brettschichtbinder eingestapelt Luftdichtheitsschicht Dampfsperre Isover, Fugen verklebt) Deckenschalung aus Rauspund
Fenster	alte Kastenfenster (zur Wiederverwendung aufgearbeitet)
Türen	alte historische Türen (zur Wiederverwendung aufgearbeitet)
Innenwände	aussteifende Innenwand aus Großballen Innenwand im Eingangsbereich für Elektroinstallation aus Mauerwerk mit wiederverwendeten Ziegelsteinen

Abbildung 37 zeigt die geplante Gebäudekonstruktion.

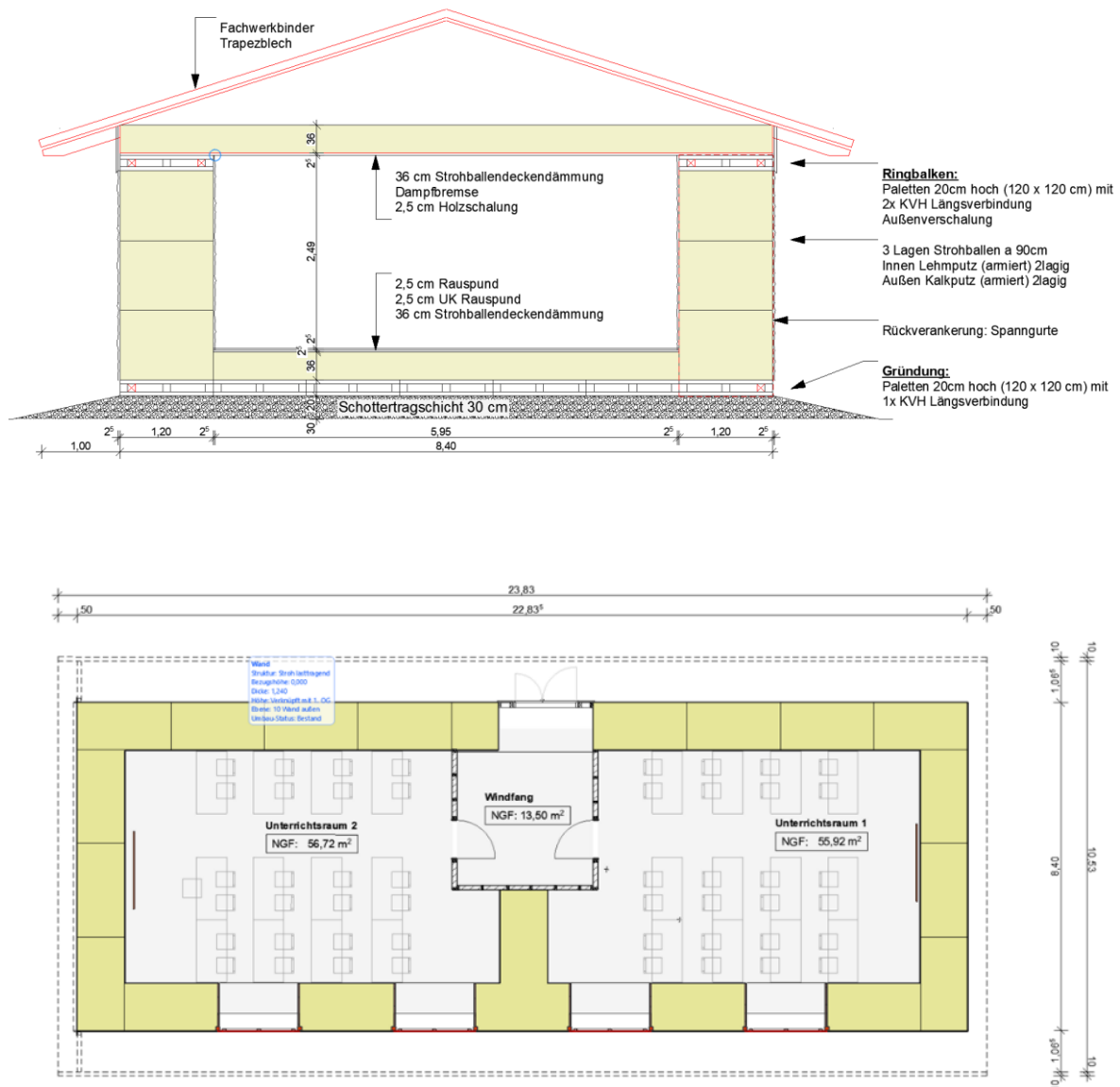


Abbildung 37 Strohklassenzimmer in Holzdorf: Grundriss und Querschnitt (Quelle: Z-Architektur)

Die Außenwände des Gebäudes bestehen aus ganzen und halben Quaderballen, die im Verband übereinander gestapelt wurden. Das Bauwerk wurde auf einem Schotterbett gegründet. Der Wandfuß besteht aus einer Lage von Paletten. Ebenso ruht auch der aus Stroh-Kleinballen bestehende Fußboden auf Paletten – das Gebäude ist also im Bereich der Außenwände und des Fußbodens komplett unterlüftet. Im Randbereich der Paletten ist diese Lüftungsebene mit einem Gitter umlaufend abgedeckt, was als ein Schutz gegen den Zutritt größerer Insekten und Nager dient.

Der Ringanker des Gebäudes ist ebenfalls mittels Europaletten ausgeführt. Wandfuß und Ringanker sind miteinander mit Gewindestangen verspannt, wofür in beide Paletten-Lagen Kanthölzer eingeschoben wurden. Das Dach wurde mit einer Brettbinderkonstruktion und einer Eindeckung aus Trapezblechtafeln hergestellt. Diese wurden über einer Unterspannbahn verlegt.

Die Decke ist ebenfalls hochdämmend mit Stroh-Kleinballen hergestellt, die zwischen den Brettschichtbindern eingeschoben wurden. Von unten ist an der Decke eine luftdichtende Dampfbremsfolie (ISOVER) und eine Vertäfelung aus Rauspund-Brettern angebracht.

Die Außenwände des Gebäudes sind innen und außen mit Lehm verputzt. Der Feuchteschutz wurde konstruktiv beim Demonstrator durch große Dachüberstände und eine Holzverschalung des Westgiebels erreicht.

Es wurden in dem Gebäude gebrauchte, wieder aufgearbeitete Fenster und Türen verwendet.

Die Luftdichtheitsebene besteht aus den folgenden Bauteilschichten: Lehm-Innenputzschicht, OSB-Schicht im Fußboden, luftdichtende Folie unter der Rauspund-Vertäfelung an der Decke; alle Anschlüsse der luftdichtenden Ebenen (Lehmputz/OSB sowie Putz-Folien).

Abbildung 38 zeigt die Planung der Luftdichtheitsebene im Strohklassenzimmer in Form einer umlaufenden schwarzen Linie auf der Innenseite der wärmetauschenden Hüllfläche (Außenbauteile).

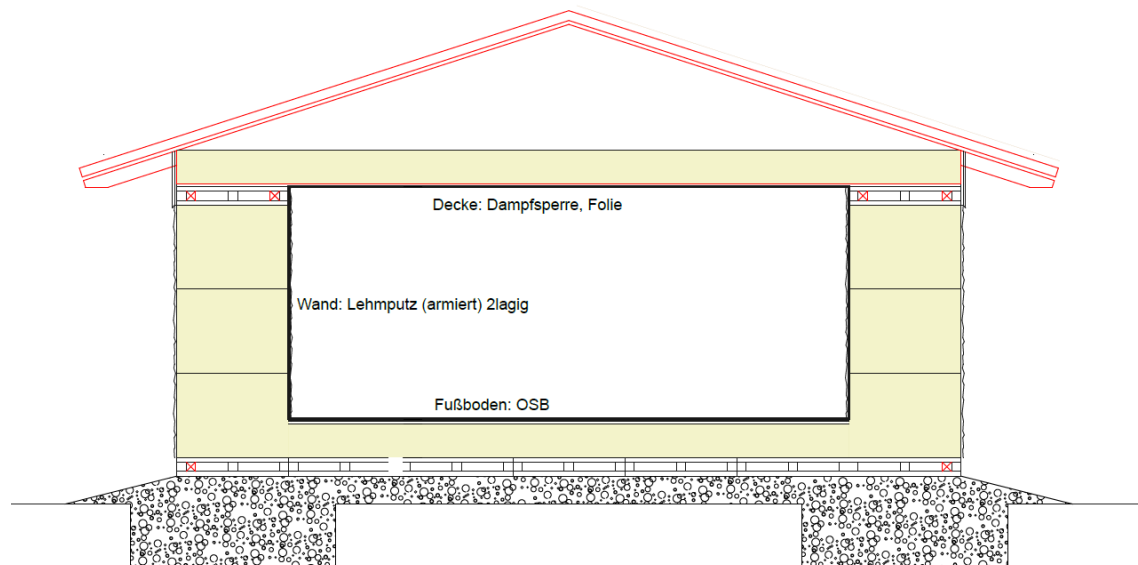


Abbildung 38 Luftdichtheitskonzept für Strohklassenzimmer

Abbildung 39 zeigt Details für luftdichte Anschlüsse der Bauteile untereinander. Aus Kostengründen und zur Erprobung der Praktikabilität der Materialien für die neuartige Bauweise wurden die luftdichten Anschlüsse durch die Mitglieder der Kooperation selbst ausgeführt. Eine Beratung zu geeigneten Materialien dazu (geeignete einputzbare Klebebänder) wurden

freundlicherweise durch die Firma SIGA durchgeführt, durch welche auch die Materialien bereitgestellt wurden.

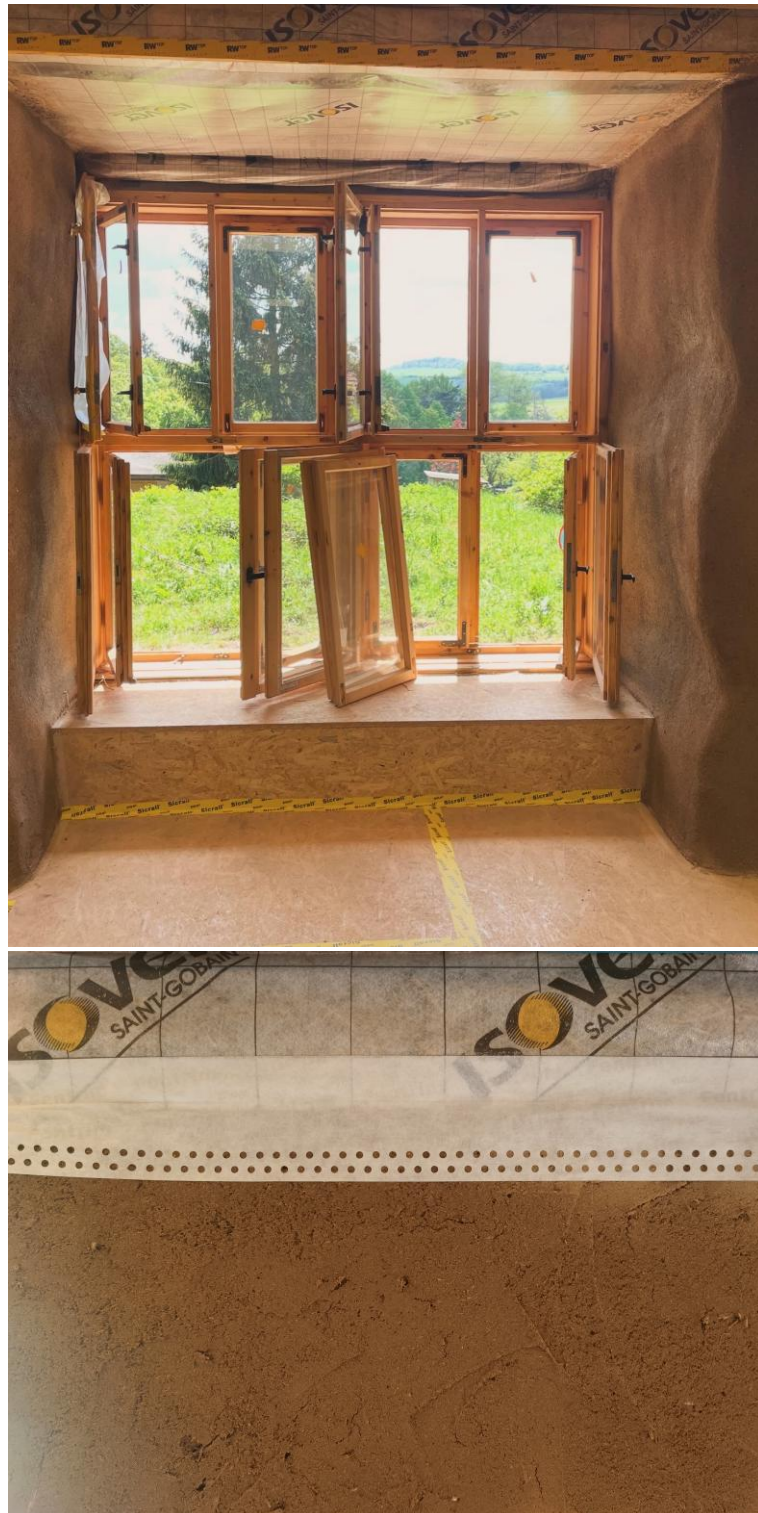


Abbildung 39 Luftdichte Anschlüsse von Bauteilen: gelbe Klebebänder zur Abdichtung der Fugen der OSB-Platte (oben), Anschluss Isover-Folie/Lehmputz mit gelochten, überputzbarem Klebeband Siga-Fentrim

Bauausführung

Das Gebäude wurde in Zusammenarbeit durch Fachfirmen und Mitglieder der Kooperation errichtet. Die Arbeiten wurden durch den Projektpartner Z-Architektur betreut und koordiniert.

Der Partner Keller-Stroh lieferte die Quaderballen und versetzte die Ballen mit einem Radlader.

Der Partner Diakonie Landgut Holzdorf erledigte u.a. die aufwändigen Vorputzarbeiten mit Lehmputz. Es stellte sich heraus, dass insbesondere die arbeitsintensiven Lehm-Vorputzarbeiten (Ausgleichsschichten herstellen) sehr gut in Eigenleistung durch nicht gelernte Arbeitskräfte erbracht werden können. Dabei wurde Lehmmörtel verwendet, der in der Einrichtung bereits in einem Wertstoffhof vorhanden war.

Weiterhin wurden durch den Partner Diakonie Landgut Holzdorf die Euro-Paletten für den Wandfuß, den Fußboden und die Ringankerschicht selbst produziert. Ebenso wurden die Türen und Fenster im Demonstrator als wiederverwendete Bauteile aus alten Gebäuden eingebaut. Die Aufarbeitung dieser Bauteile (Entlackung, Oberflächenbehandlung) wurde durch eine Werkstatt der Diakonie vorgenommen.

Für folgende Gewerke wurden Fachfirmen beschäftigt: Zimmerarbeiten, Putzarbeiten, Dachdecker, Gerüstbau, Elektroinstallation und Blitzschutz.

Die Errichtung des Gebäudes wurde durch die MFPA mit einer stationären Kamera gefilmt.

Dokumentation/Öffentlichkeitsarbeit

Tabelle 4 listet Web-Links zu Videos und Internetbeiträgen zum Demonstrator auf. Eine ausführliche Videodokumentation der Errichtung des Gebäudes ist im Video Link L1 zu sehen. Im Videoschnitt unter L2 ist der Bau des Demonstrators mit Bildern aus weiteren Perspektiven sowie von innen vervollständigt. Link L3 zeigt den im Zusammenhang mit dem Innovationsforum am Objekt Strohklassenzimmer Holzdorf gedrehten Teaser-Film über die Kooperation LaStrohBau am Beispiel des Strohklassenzimmers. Die Links L4 und L5 liefern weitere Informationen zum Projekt Strohklassenzimmer auf den Internetseiten der Partner Diakonie und MFPA anlässlich der öffentlichen Eröffnung des Schulgebäudes.

Tabelle 4 Web-Links zu Videos und Internetbeiträgen über das Strohklassenzimmer

L 1	LaStrohBau: Tragende Schulräume aus Stroh https://www.youtube.com/watch?v=SXTpZ2340s8&t=136s https://www.youtube.com/watch?v=SXTpZ2340s8&t=233s	
L2	Schulungsräume_aus_40_Tonnen Stroh_in_Holzdorf https://www.youtube.com/watch?v=gkjCFMvAktM&t=28s	
L3	Innovatives u. nachhaltiges Bauen mit regionalen Materialien https://www.youtube.com/watch?v=gwbfmfdW6x5k	
L4	MFPA-Mitteilung (04.06.2024): Schulungsräume aus 40 Tonnen Stroh in Holzdorf https://mfpa.de/nachrichtenbeitrag/schulungsraeume-aus-40-tonnen-stroh-in-holzdorf.html	
L5	Diakonestiftung Weimar Bad Lobenstein Mitteilung (17.05.2024): Strohballenhaus im Landgut Holzdorf eröffnet https://www.diakonie-wl.de/oeffentlichkeitsarbeit/aktuelles/detail/strohballenhaus-im-landgut-holzdorf-eroeffnet/	

Feuchtemonitoring

Die entscheidende Voraussetzung für eine dauerhafte Schadensfreiheit von Strohballenkonstruktionen ist es, zu hohe Feuchtegehalte im Stroh dauerhaft zu vermeiden. Für das Strohklassenzimmer wird deshalb ein umfangreiches Feuchtemonitoring in den lasttragenden Außenwänden durchgeführt. Es umfasst 3 Varianten der Feuchtebestimmung:

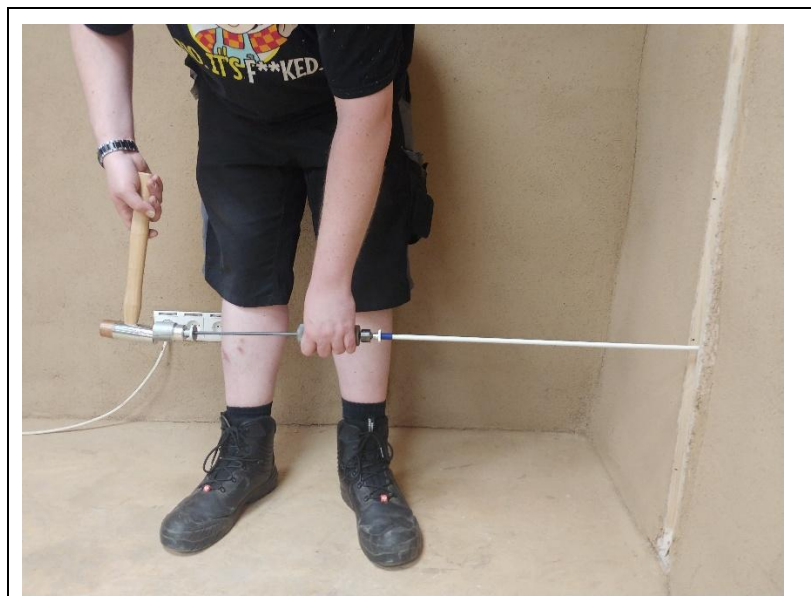
- a) kontinuierliches Monitoring mit Temperatur- und Luftfeuchtesensoren,
- b) diskontinuierliche Strohfeuchtebestimmung mit Einstichsonde an festen Messpunkten,
- c) Feuchteüberwachung mit TDR-Messtechnik am Mauerwerksfußpunkt.

Die größte Feuchtebelastung der Strohwandkonstruktion ist in Verbindung mit Schlagregen auf der Westseite zu erwarten.

Feuchtemonitoring mit Luftfeuchtesensoren

Ein kontinuierliches Monitoring der Strohfeuchte wird im Bereich der wetterbelasteten Westseite in zwei Wandquerschnitten durchgeführt. Dafür sind Temperatur-/Luftfeuchte-Sensoren jeweils in drei verschiedenen Tiefen in die Außenwände eingebracht, durch die die (Poren-)Luftfeuchte als Ausgleichsfeuchte zum Stroh an der entsprechenden Messstelle ermittelt wird.¹

Abbildung 40 zeigt das Einbringen von einem dünnen Kunststoffröhrchen in die Strohballen.



¹ Es ist auch im Holzbau üblich, den Wert der relativen (Poren-)Luftfeuchte als Kriterium zu verwenden, um das Schadensrisiko durch Feuchte abzuschätzen (siehe [WTA 6-5, 2014] und [WTA 6-8, 2016]).

Abbildung 40 Installation eines Luftfeuchte-/Temperatursensors: Einschlagen eines Kunststoffröhrchens mit einem Metalldorn in den Strohballen

Abbildung 41 zeigt das dazu verwendeten Werkzeug (Metalldorn) und den zum Monitoring verwendeten digitalen Kombisensor (Temperatur/Luftfeuchte).

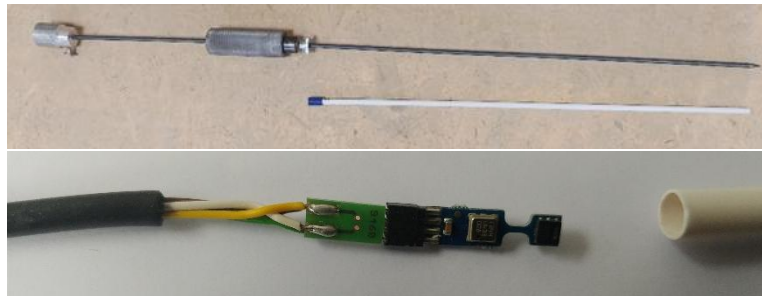


Abbildung 41 Kunststoffröhrchen und Stahlstab-Einschlaghilfe (oben), Kombisensor (Fa. Ahlborn) (unten)

Bezogen auf die raumseitige Wandoberfläche sind die Sensoren bis in 5 cm, 60 cm und 110 cm Tiefe in die Wand eingeführt. Der äußere Sensor misst folglich im Stroh ca. 10 cm unter der äußeren Putzschicht.

Abbildung 42 zeigt die Messergebnisse ab Beginn der Inbetriebnahme der Messung im Mai 2024 bis zum Januar 2026.

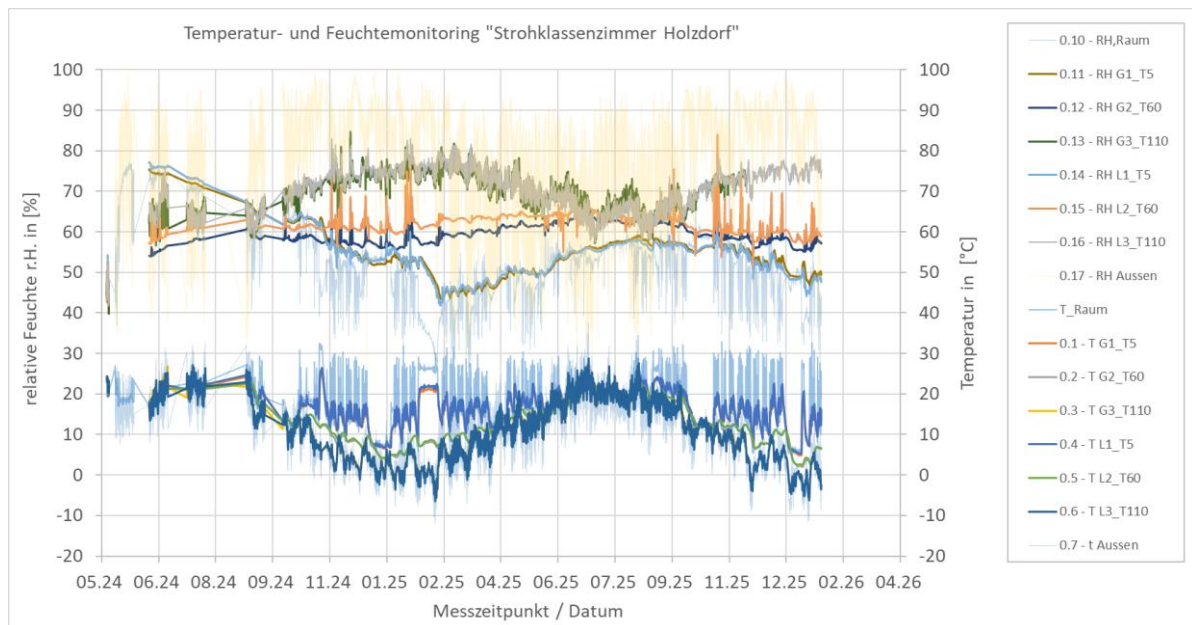


Abbildung 42 Feuchte- und Temperaturverläufe in zwei witterungsbelasteten Wandquerschnitten im Strohklassenzimmer Holzdorf

Es zeigt sich, dass die anfänglich hohe Feuchte unter dem Innenputz zuverlässig abgetrocknet ist (braue und hellblaue Kurve). In der Mitte der Wand ist die relative Luftfeuchte nur sehr geringen Schwankungen unterworfen. Sie hat sich bei einem Wert von ca. 60%r.H. eingeepegelt (orange und dunkelblaue Kurve). Eine Erklärung für die kurzfristigen Spitzenwerte der Luftfeuchten (orange Kurve) ist eine durch Wind angetriebene Durchströmung der Kunststoffröhrchen für die Sensoranschlüsse im Bereich der installierten Sensoren.

Es wurde festgestellt, dass an der witterungsbelasteten Außenwand 10 cm unter dem Außenputz im Stroh eine relative Porenluftfeuchte von 80% im Mittel langfristig nicht überschritten wird, was als „hinreichend trocken“ eingeschätzt wird. Die äußeren Sensoren (graue und grüne Kurve) zeigen maximale Werte jeweils in der Heizperiode in der Zeit zwischen Dezember und März.

Materialfeuchtemessung in Strowänden

Die Materialfeuchte des Strohs in M-% wird diskontinuierlich in den Außenwänden an insgesamt 30 Messstellen gemessen. Die Messungen werden mit einer Strohfeuchte-Einstichsonde (Fa. Delmhorst) durchgeführt. 14 Messpunkte werden von der Innenseite der Räume und 16 Messpunkte werden von der Außenseite des Gebäudes gemessen. Abbildung 43 zeigt die Lage der Messstellen. Der Holzverschalte Giebel des Gebäudes befindet sich auf der Oberseite der schematischen Grundrisse (gelbe Linie). An allen anderen Stellen befindet sich der Lehmputz.

Diese Messung wird einmal im Monat durchgeführt. Dabei wird jeweils die oberflächliche Feuchte (ca. 5cm Tiefe), die Feuchte in halber Einstichtiefe (20 cm) und in voller Einstichtiefe (40 cm = Sondenlänge) gemessen.

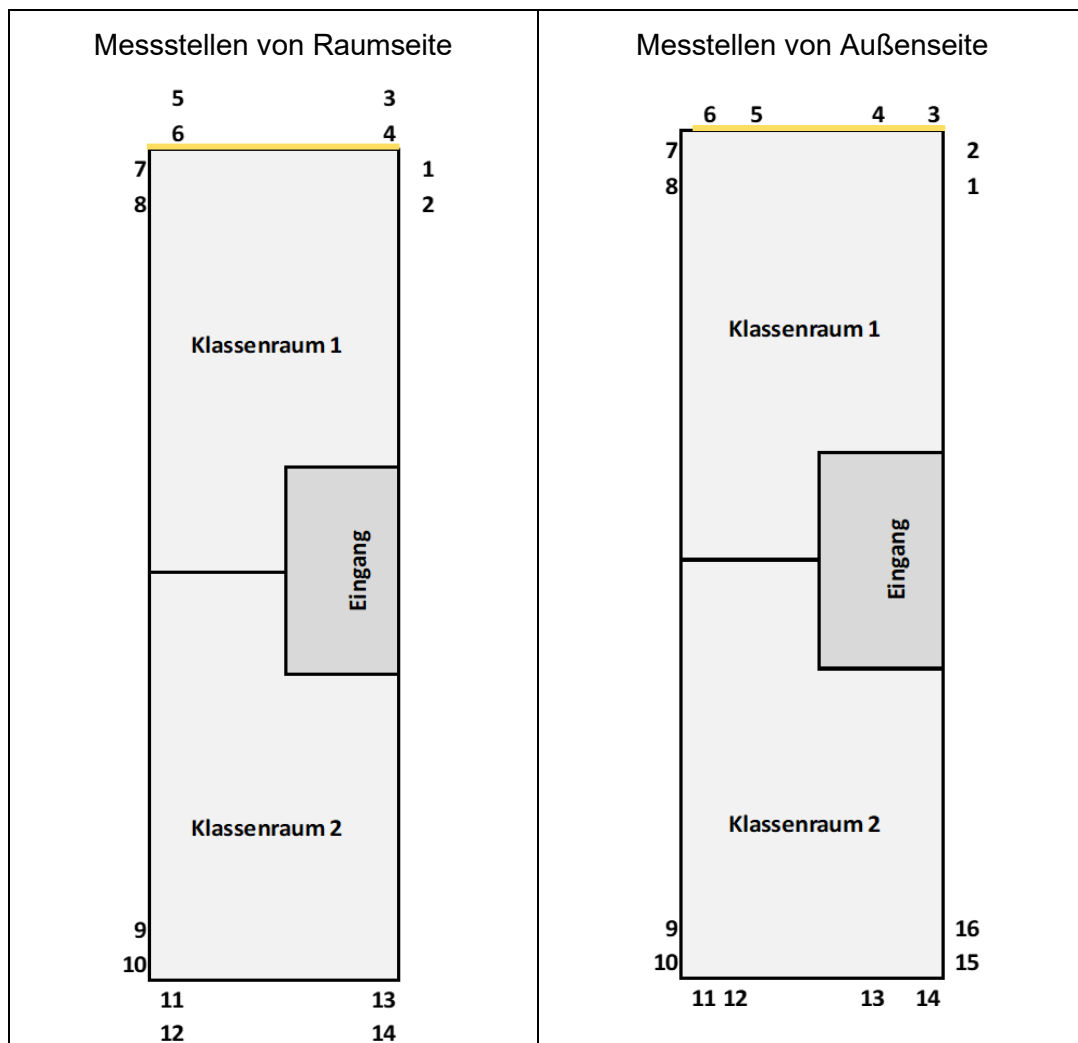


Abbildung 43 Anordnung der Messstellen für diskontinuierliche Strohfeuchtemessung mit Einstichsonde (Delmhorst) von außen (rechts) und von innen (links)

Abbildung 44 zeigt den Verlauf der Strohfeuchte für Messungen mit der Einstichsonde von außen. Dargestellt ist der Verlauf der Feuchte in 5 cm Messtiefe (oben) sowie in den tieferen Schichten (20 cm und 40 cm) an den Messstellen 3, 4, 5, 6 in der holzverschalteten Westfassade sowie den Eckbereichen 1 und 2 sowie 7 und 8. Letztere Messstellen sind in Bereichen mit Lehmputz angeordnet. Es ist zu sehen, dass in den äußeren besonders wetterbelasteten Schichten des Bauteils aus Stroh eine Feuchte von 15 M-% nur selten überschritten wird. Das Gleiche gilt für tiefergelegene Schichten (20 cm bzw. 40 cm) im Bereich dieser Messstellen (Abbildungen 44 Mitte und unten).

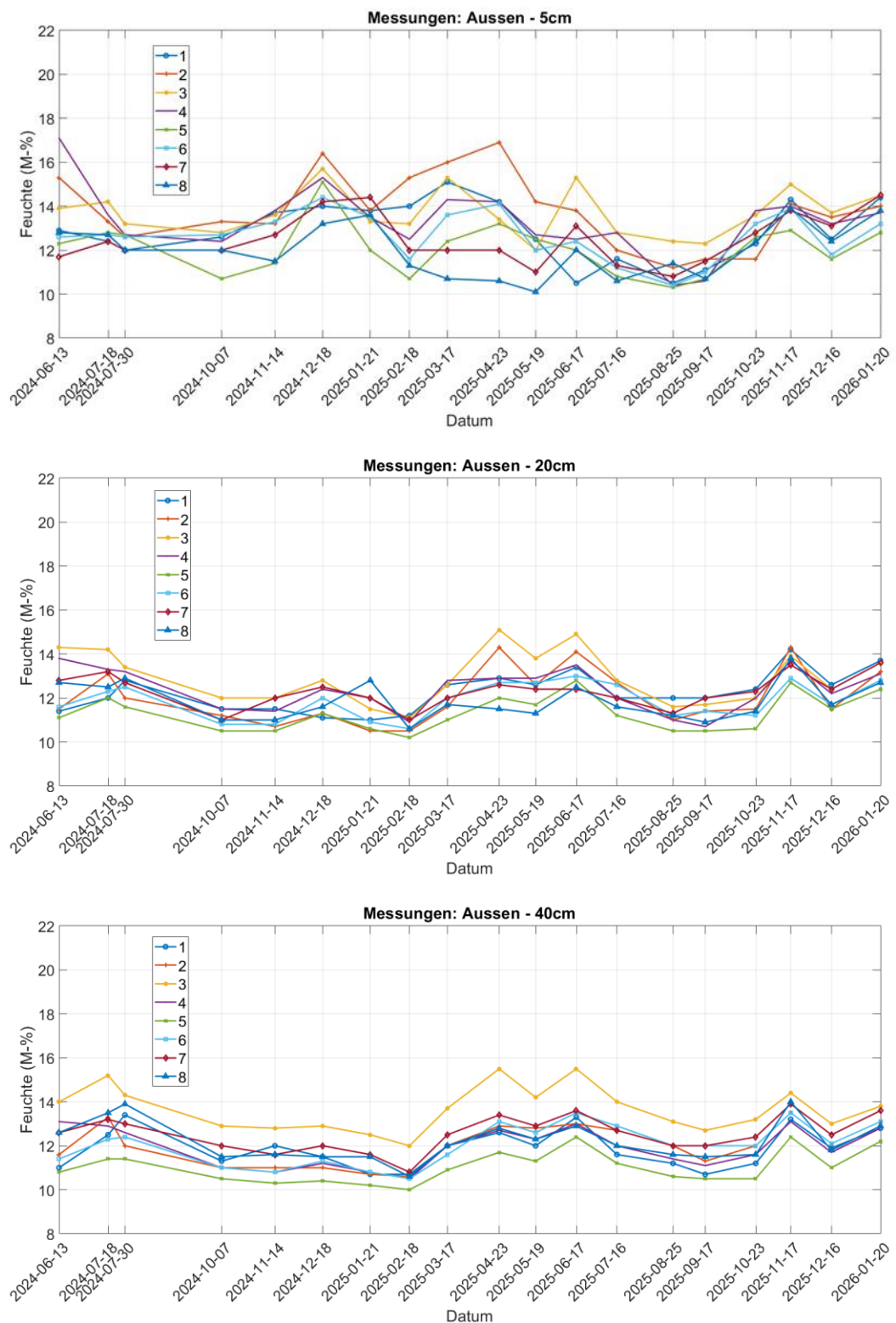


Abbildung 44 Strohfeuchte in verschiedenen Tiefen an den witterungsbelasteten Messstellen der holzverschalten Westseite sowie den anschließenden Eckbereichen mit Lehmputz, Quelle: MFPA

Abbildung 45 zeigt die Strohfeuchte-Messwerte unter raumseitigen Putzoberfläche in 5 cm, 20 cm und 40 cm Tiefe.

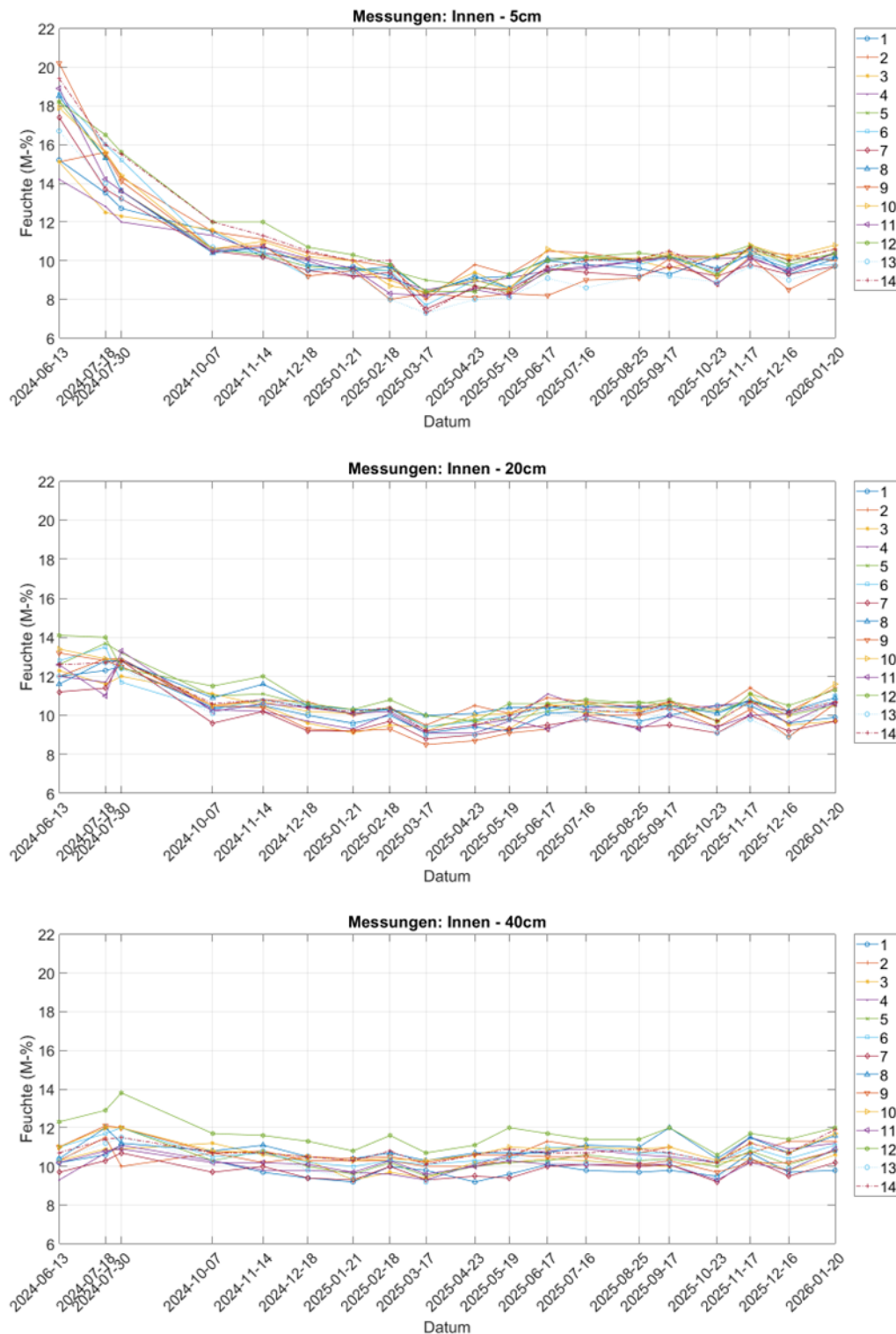


Abbildung 45 Messung der Strohfeuchte von der Raumseite aus in verschiedenen Tiefen

Die Feuchtwerte in Abbildung 45 verdeutlichen anschaulich das kontinuierliche Austrocknen der erhöhten Anfangs-Feuchtwerte unter der Innenputzschicht im Laufe der Zeit (obere Graphik und

mittlere Graphik im ersten halben Jahr der Messung). Die beiden unteren Graphiken dokumentieren einen langfristig geringen Feuchtegehalt des Stroh im inneren Wandquerschnitt der Quaderballen von kleiner 12 M-% im gesamten Gebäude.

Feuchtemonitoring mit TDR

Im Strohklassenzimmer wurden zwischen dem Vlies auf der unteren Palettenlage und der ersten Strohballenschicht drei TDR²-Sensoren verlegt. Dabei handelt es sich um jeweils 9 m Flachbandkabel, die vom Eingang aus in beide Richtungen zu den Giebelseiten hin verlegt wurden. Weiterhin wurde umlaufend ein rundes Spezial-Koaxialkabel (Satsensor) mit einer Gesamtlänge von 56 m verlegt. Mit den Sensoren soll der Mauerwerksfußpunkt hinsichtlich ungeplanter Befeuchtungen überwacht werden. Abbildung 46 zeigt die installierten Messleitungen mit Blickrichtung von der Eingangstüre aus.



Abbildung 46 TDR-Sensoren, Blick vom Eingang nach links (linkes Bild) und Blick vom Eingang nach rechts (rechtes Bild)

² TDR steht für Time Domain Reflectometry (deutsch: Zeitbereichsreflektometrie). Es ist eine Technik, bei der ein elektrischer Impuls in ein Kabel gesendet wird, um Auffälligkeiten in der Umgebung des Kabels wie erhöhte Feuchtegehalte zu lokalisieren. Dabei werden die reflektierten Signale analysiert. Es kann damit der Ort von Stellen mit deutlich erhöhter Feuchte lokalisiert werden. Diese Technik wurde von der MFPA in der Vergangenheit unter anderem für Bodenfeuchtemessungen und Leckageortungen entwickelt und eingesetzt siehe [Bonitz 2016] und [Müller 2019]. Eine genaue quantitative Feuchtemessung ist dabei mit der verwendeten Technik nicht möglich.

Abbildung 47 zeigt die verlegten Sensoren an der Ecke des Gebäudes (Eingangsseite/ Westgiebel).



Abbildung 47 Sensorinstallation im Bereich der Gebäudeecke: TDR-2-Sensor auf Innenseite durchlaufend, Satsensor außen umlaufend um Gebäudeecke (15 cm nach innen versetzt)

Der Satsensor ist umlaufend über den gesamten Gebäudeumfang auf der Außenseite der Paletten (15 cm vom Rand entfernt) angebracht. Er kann von beiden Seiten gemessen werden, da beide Enden zum Messgerät geführt wurden.

Die Sensoren TDR-1 und TDR-2 sind -ausgehend von der Gebäudeeingangstüre nach links bzw. nach rechts auf der Innenseite der Palettenlage aufgebracht.

In Abbildung 48 ist das Versetzen der ersten Strohballenlage auf die Fliesbahn mit installierten TDR-Sensoren zu sehen.



Abbildung 48 Verlegen der ersten Strohballenlage auf die installierten TDR-Sensoren

Abbildung 49 zeigt die beispielhaft eine vergleichende TDR-Sensormessung mit den beiden installierten Flachbandkabel-Sensoren. Der rote Graph ist das Signal ca. 3 Monate nach dem Versatz der Strohballen (Februar 2024) und der blaue Graph eine aktuelle Messung (Januar 2026). Ein Vergleich der reflektierten Sensorsignale zeigt, dass aktuell keine kritischen Feuchtezustände vorliegen – die Messsignale sind nahezu identisch. Es sind insbesondere keine sprunghafte Veränderungen (Flanken) im reflektierten Signal zu sehen, was auf eine lokale Auffeuchtung in der Sensorumgebung an der entsprechenden Stelle hinweisen würde. Ebenso wurde aus dem Vergleich der TDR-Signale für das Satsensorkabel abgeleitet, dass es keine wesentlichen Veränderungen durch Feuchteinflüsse im Untersuchungszeitraum auf der Außenseite des Wandfußes gegeben hat.

Dass das aktuelle gemessene Reflexions-Messsignal (blau) eine etwas geringere Laufzeit hat, deutet darauf hin, dass die Strohballen auf der Unterseite der ersten Lage (bzw. die Paletten und das Vlies) im Laufe der zwei Jahre tendenziell etwas trockener geworden sind, als sie es drei Monate nach der Sensorverlegung beziehungsweise der Erstellung der Strohballen-Außenwand waren.

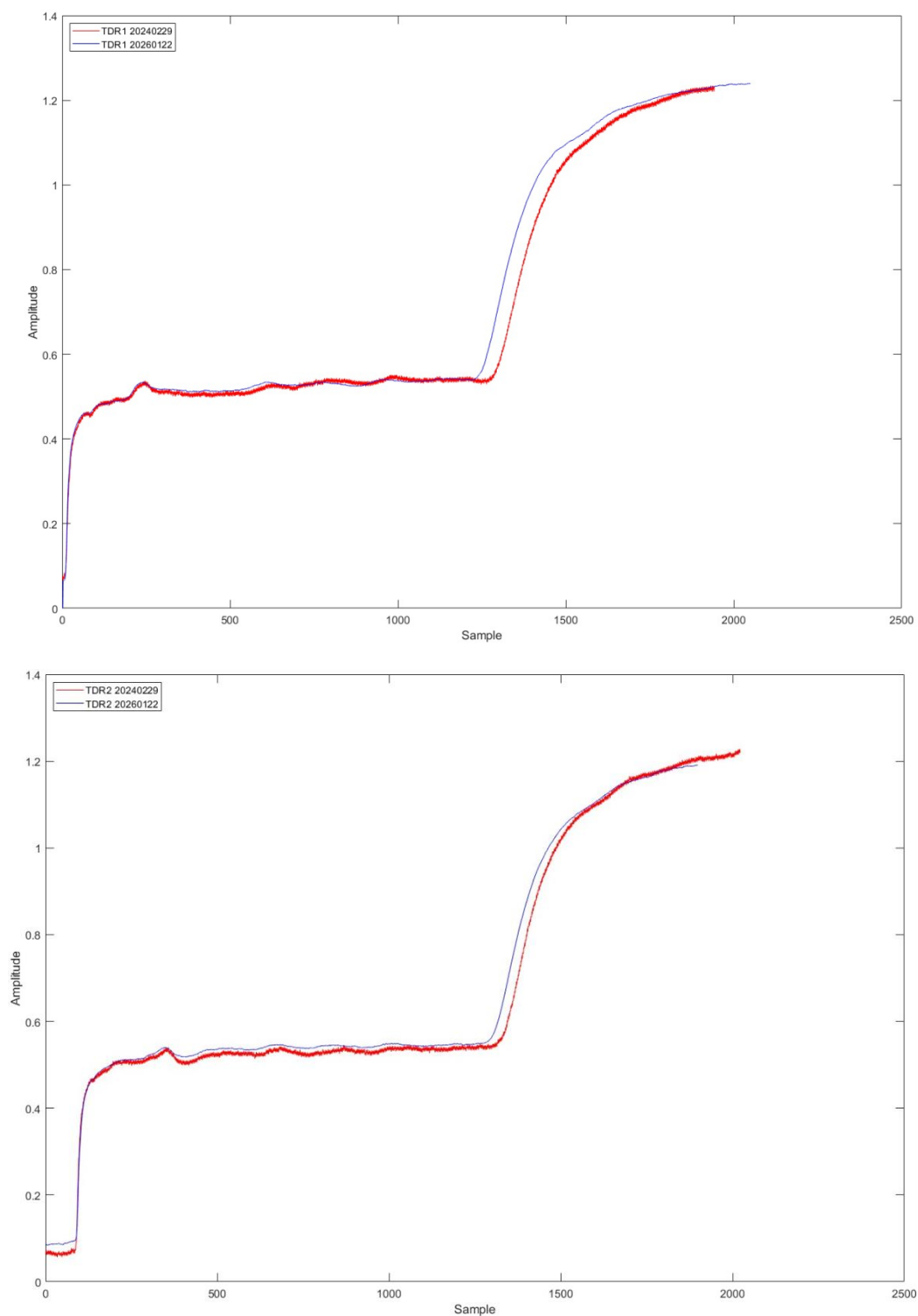


Abbildung 49 Messungen mit TDR-Flachbandsensoren zur Feuchteüberwachung des Mauerwerksfußpunktes: Reflexionssignal TDR-1-Sensor (oben) und TDR-2-Sensor (unten)

Erfahrungen bei der Nutzung

Das Strohklassenzimmer wird ab Mai 2024 durch die Evangelische Pflegeschule Weimar-Holzendorf zur Ausbildung von Pflegefachkräften genutzt. Das Gebäude wurde durch die Nutzer gut angenommen.

Es gibt verschiedene positive Rückmeldungen der Nutzer zur Nutzung des temporären Gebäudes. So gibt es nach Aussage der Geschäftsleiterin des Partners Diakonie Landgut Holzendorf immer wieder Anfragen der Mitarbeiter, was denn mit dem Gebäude nach Ablauf der temporären Nutzungsdauer passieren wird. Dabei wird Interesse bekundet, es dann selbst (beruflich oder privat) weiter nutzen zu können – ein untrügliches Zeichen dafür, dass das besondere Gebäude angenommen wurde und so wie es ist „geliebt“ und gern genutzt wird.

Auch von Seiten des Denkmalschutzes anfänglich geäußerte Bedenken scheinen sich verflüchtigt zu haben, offenbar wird der urige, rustikale Stil des Gebäudes im Ensemble des Landgutes als passend empfunden. Die wiederverwendeten, liebevoll restaurierten historischen Fenster und Türen im Strohklassenzimmer werden bei dieser Einschätzung eventuell einen Beitrag geleistet haben.

Es zeigte sich, dass die durch den Innenputz eingetragene Baufeuchte im ersten Nutzung zuverlässig austrocknete.

Der schwimmend auf einer Stroh-Kleinballenschicht verlegte Fußboden (in den Nut-Feder-Fugen verklebte OSB-Platten-Lage, ohne Lagerhölzer (!) mit aufgeschraubter Dielung) hat als Bauteil auch große Belastungen gut überstanden und sich dadurch bewährt. (geschätzte Belastung durch 100 Personen während der Einweihungsfeier!). Ein kleiner Mangel zeigte sich jedoch an einigen Stellen im Anschluss dieser Bauteilschicht an den Lehmputz. Aufgrund von Bewegungen des Fußbodens beim Begehen werden an einigen Stellen durch das Luftdichtheits-Klebeband Spannungen in den Putz übertragen. Das führte an diesen Stellen dazu, dass die Lehm-Putzschicht über dem Klebeband teilweise abbröckelte.

Abhilfe dabei kann geschaffen werden, indem zukünftig das überputzte Klebeband im Anschluss Putz-OSB-Platte mit einer ausreichend großen Schlaufe verlegt wird. Auf diese Weise können (unvermeidbare) Bewegungen des Fußbodens beim Begehen oder auch andere Bauteilbewegungen keine Spannungen über das Klebeband in die Putzschicht übertragen. Der Anschluss bleibt somit dauerhaft luftdicht und zudem frei von Abplatzungen des Putzes.

5.3 Demonstrator „Strohturm“

Der Strohturm ist ein zweigeschossiges Gebäude, das im Rahmen der Projekts LaStrohBau als ein Demonstrator ausschließlich für Forschungszwecke errichtet wurde. Als Standort des Demonstrators wurde ein durch die MFPA genutztes Außengelände am südlichen Stadtrand von Weimar gewählt. Abbildung 50 zeigt den Standort des Strohturms (Roter Pfeil).



Abbildung 50 Außengelände der MFPA, Niedergrunstedter Weg 12, links: Lage des Strohturms - roter Pfeil, rechts Außengelände am süd-westlichen Weimarer Stadtrand (grüner Pfeil)
Quelle: Google Maps.

Das Gebäude ist ohne eine schützende Nachbarbebauung auf einer kleinen Anhöhe gelegen. Es ist aus der Wetterrichtung West nahezu frei bewittert. Der Standort des Gebäudes wurde im Rahmen des Forschungsansatzes herausfordernd ausgewählt: Das Gebäude ist als ein zweigeschossiges Gebäude mit einem relativ kleinen Grundriss durch Windlasten auf den Fassaden stark belastet. Außerdem ist das Gebäude auch durch die fehlenden Dachüberstände an der Nord-West-Fassade und an der Süd-West-Fassade durch Schlagregen relativ stark durch Feuchte belastet.

Die Baukonstruktion wurde durch die Kooperationspartner in enger Abstimmung geplant. Der Planungsprozess wurde durch Z-Architektur koordiniert. An der Fachplanung waren beteiligt für die Baugrunduntersuchung die Fa. BIGUS und für die Tragwerksplanung das Büro Goldbach.

Baukonstruktion

- unterlüftete Holzbalkenlage mit Dreischichtplatte, aufgeständert auf Beton-Streifenfundamenten
- Fußboden als Schicht aus Kleinballen, FUBO schwimmend als OSB-Platte verlegt, Dielung mit Rauhspundbrettern
- Wände im EG aus Stroh-Quaderballen
- Außenputz: Kalk-Leichtputz
- Innenputz: Lehmputz
- Ringbalken als Holzkonstruktion mit Dreischichtplatte
- Wände im OG aus Stroh-Quaderballen
- Deckenelement: Dreischichtplatte und Holzgefachkonstruktion, ausgefacht mit Kleinballen
- Jede Seite innen mit 2 x Querverstrebungen aus mit Spannschlössern gespannten Gewindestangen, Verankerung dieser im Betonfundament und oberster Geschossdecke
- Dach: unterlüftetes Flachdach mit Attika (Entwässerung: Fallrohr und Wasserspeier), Abdichtung mit Kiesdach

Abbildung 51 zeigt den geplanten Forschungsdemonstrator „Strohturm“.

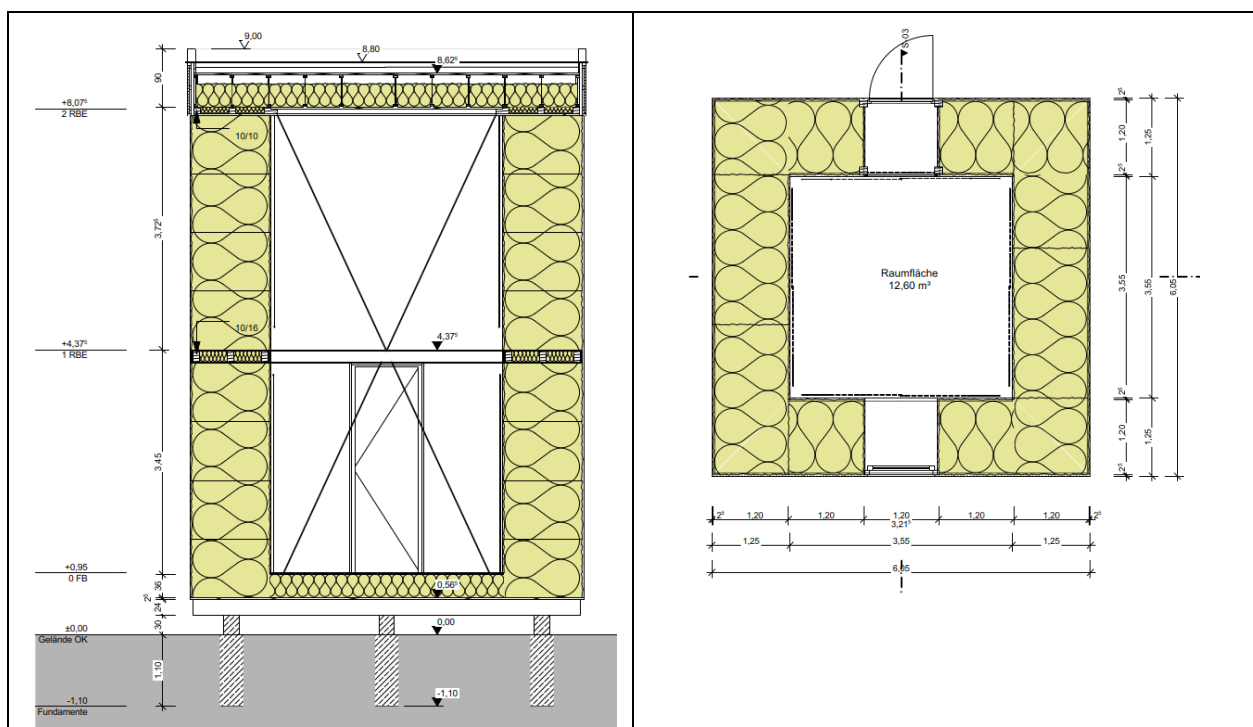


Abbildung 51 Planungszeichnungen Forschungsdemonstrator Strohturm: Längsschnitt (links) und Grundriss (rechts), Quelle: Z-Architektur

Bauausführung, Bauablauf

Das Gebäude wurde in Zusammenarbeit durch Fachfirmen und zum Teil auch durch Mitglieder der Kooperation errichtet. Die Arbeiten wurden durch den Projektpartner Z-Architektur betreut und koordiniert. Abbildung 52 zeigt den Forschungsdemonstrator „zweigeschossiger Strohturm“ im Bauzustand mit Gerüst sowie im fertiggestellten Zustand mit Außenputz und Farbanstrich.

Zuerst wurde das Fundament des Gebäudes als Beton-Streifenfundament erstellt. Danach wurde das komplette Baugerüst über die zwei zu errichteten Geschosse gestellt.

Der Partner Keller-Stroh lieferte die Quaderballen an. Die Holzbaufirma versetzte die vorgefertigten Holzbauteile (Grundplatte, Ringanker, oberste Geschossdecke und Flachdachkonstruktion) sowie die lasttragenden Ballen der Wände mit einem Baukran. Danach wurden die Dachdeckerarbeiten ausgeführt. Es wurde auf der Abdichtung eine beschwerende Kiesschüttung auf das Flachdach aufgebracht.

Das Gebäude stand unverputzt von der Errichtung der Strohballenkonstruktion im Dezember 2024 bis zum Beginn der Außenputzarbeiten im März 2025. In dieser Zeit konnte sich die Gebäudekonstruktion - ungehindert durch versteifende Putzschichten – setzen. Während dieser Zeit wurde das Gebäude vor direkter Bewitterung durch große Bauplanen geschützt.

Für die folgenden Gewerke wurden bei der Errichtung des Demonstrators Fachfirmen beschäftigt: Betonarbeiten, Zimmerarbeiten, Innen- und Außenputzarbeiten, Dachdeckerarbeiten, Gerüstbauarbeiten, Elektroinstallation, Blitzschutzinstallation und Metallarbeiten für Verspannung mit Gewindestangen sowie die Außentreppe aus Metall mit Podest. Abbildung 52 zeigt das Demonstratorgebäude im Bau und im fertiggestellten Zustand.

Die Luftdichtheitsabklebungen wurden durch den Projektpartner z-Architektur durchgeführt. Die Installation der Sensoren sowie der Messwerterfassungen einschließlich Wetterstation wurden durch die MFPA und die Bauhaus-Universität durchgeführt.

Die Errichtung des Gebäudes wurde durch die MFPA und die Bauhaus-Universität gefilmt. Aus dem Material soll ein Video geschnitten und durch die Projektpartner öffentlichkeitswirksam verlinkt werden.

Während der Errichtungsphase und der anschließenden Setzungsphase wurden die Setzungen des Gebäudes mithilfe von Messmarken durch Tachymeter-Messungen durch die Bauhaus-Universität dokumentiert.



Abbildung 52 Forschungsdemonstrator „zweigeschossiger Strohturm“ im Bau (links) und im fertiggestellten Zustand (rechts), Quelle: Z-Architektur

Dokumentation von Setzungen des Forschungsdemonstrators

Die Setzungen des Gebäudes während der Errichtung und in der nachfolgenden Zeit wurden durch den Partner Bauhaus-Uni dokumentiert. Die messtechnische Erfassung der Setzungen erfolgte mittels Tachymetrie und unter Verwendung von Messmarken, die am Demonstratorbauwerk und an der Nachbarbebauung vorab angebracht wurden. Insgesamt wurden sechs Messmarken an der Fassade zweier Nachbargebäude kraftschlüssig angebracht. Diese Messmarken dienen als fixe Referenz für die Setzungsmessungen, da angenommen werden kann, dass sich deren Position nicht ändert (keine Setzungen der Gebäude, kein Temperatureinfluss). Die Position dieser Referenzpunkte *R* ist in Abbildung 53 gemeinsam mit den frei gewählten Tachymeterstandpunkten *ST* dargestellt.

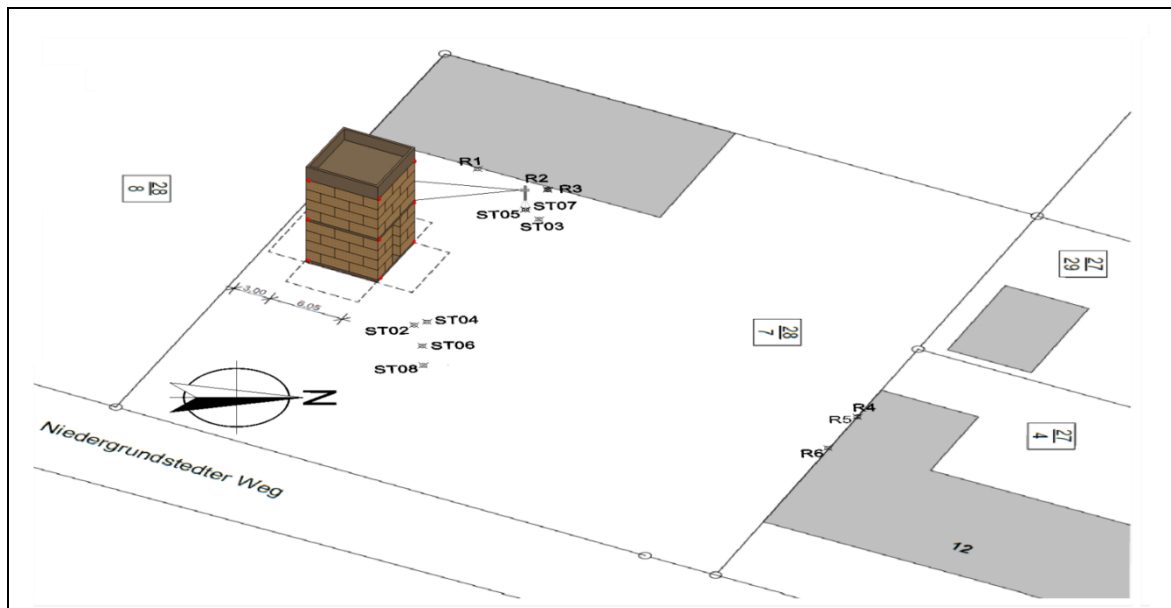


Abbildung 53 Position der Referenzpunkte R1 bis R6 und der frei gewählten Tachymeterstandpunkte ST2 bis ST8 im Flurplan mit räumlichem Bezug zum Demonstratorbauwerk

Am Demonstratorbauwerk selbst wurden die Messmarken mit Fortschreiten des Baus ebenfalls kraftschlüssig in drei Ebenen angebracht:

- Ebene 1: Gitterrost als Teil der Grundplatte (oberhalb der Streifenfundamente),
- Ebene 2: Ringanker (über EG-Wand),
- Ebene 3: Dachplatte (über OG-Wand).

In jeder Ebene wurden vier Messmarken in annähernd jeder Gebäudeecke an drei „visuell zugänglichen“ Gebäudeseiten angebracht. Die Positionen wurden so gewählt, dass alle Messmarken von maximal zwei Tachymeterstandpunkten eingemessen werden konnten. Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen die tachymetrische Aufnahme und Messpunkte am Bauwerk während der Errichtung und die schematische Darstellung der Position der Messmarken. Von jedem Tachymeterstandpunkt aus wurden mindestens drei Referenzmarken und neun der zwölf Marken am Gebäude eingemessen. Aus den Messdaten zeitlich verschiedener Aufnahmen wurden im Nachgang die Verschiebungen in den drei Raumrichtungen (vertikal und zweimal horizontal) ermittelt. Die Setzungen ergeben sich dabei als vertikale Verschiebung mit Referenz zur Erstmessung. Aufgrund der Positionierung der Messpunkte in den Gebäudeecken konnten mittlere Setzungen je Wand ermittelt werden.



Abbildung 54 Einmessen der Messpunkte mit Tachymeter (links) und Messpunkte am Ringbalken in der mittleren Ebene (rechts)

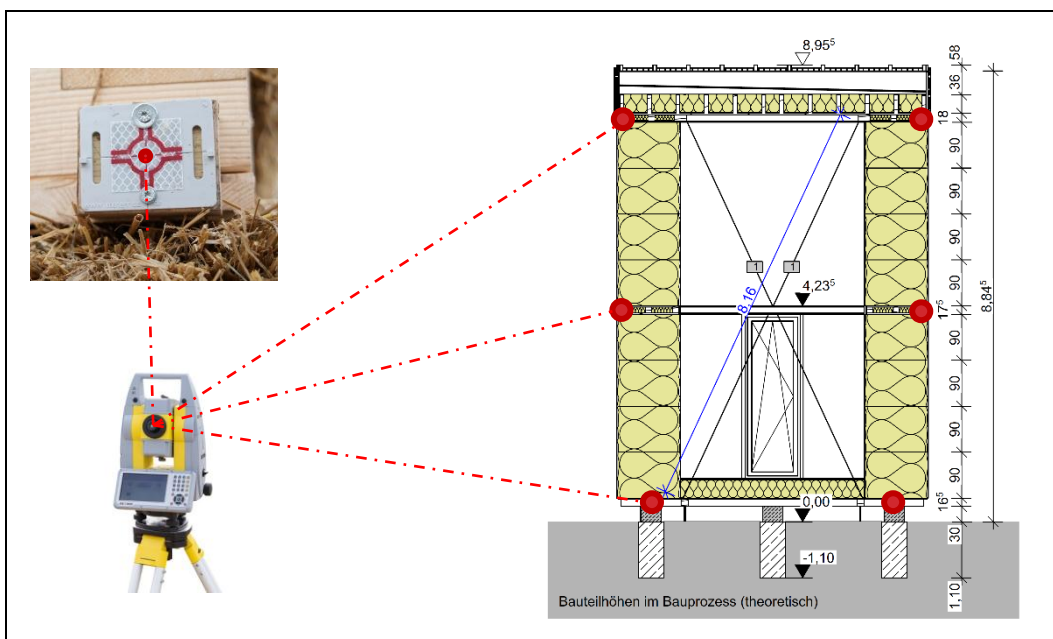


Abbildung 55 Symbolische Darstellung der tachymetrischen Aufnahme der Messpunkte. Die Position der Messpunkte am Bauwerk ist im Gebäudequerschnitt schematisch dargestellt. Die Messmarken befinden sich an der Außenseite des Bauwerks.

Die tachymetrische Aufnahme erfolgte erstmalig während der Errichtung des Demonstratorbauwerks. Die Messungen wurden in unterschiedlichen zeitlichen Abständen wiederholt, wobei dies am Beginn der Aufnahmen mit einem Abstand von wenigen Tagen erfolgte. Mit beobachtbarer Abnahme der Setzungen über die Zeit wurden die Intervalle der tachymetrischen Aufnahmen angepasst, sodass sich zuletzt ein Intervall von mehreren Wochen ergab. Die über eine Dauer von knapp einem Jahr ermittelten Setzungen werden in Abbildung 56 dargestellt.

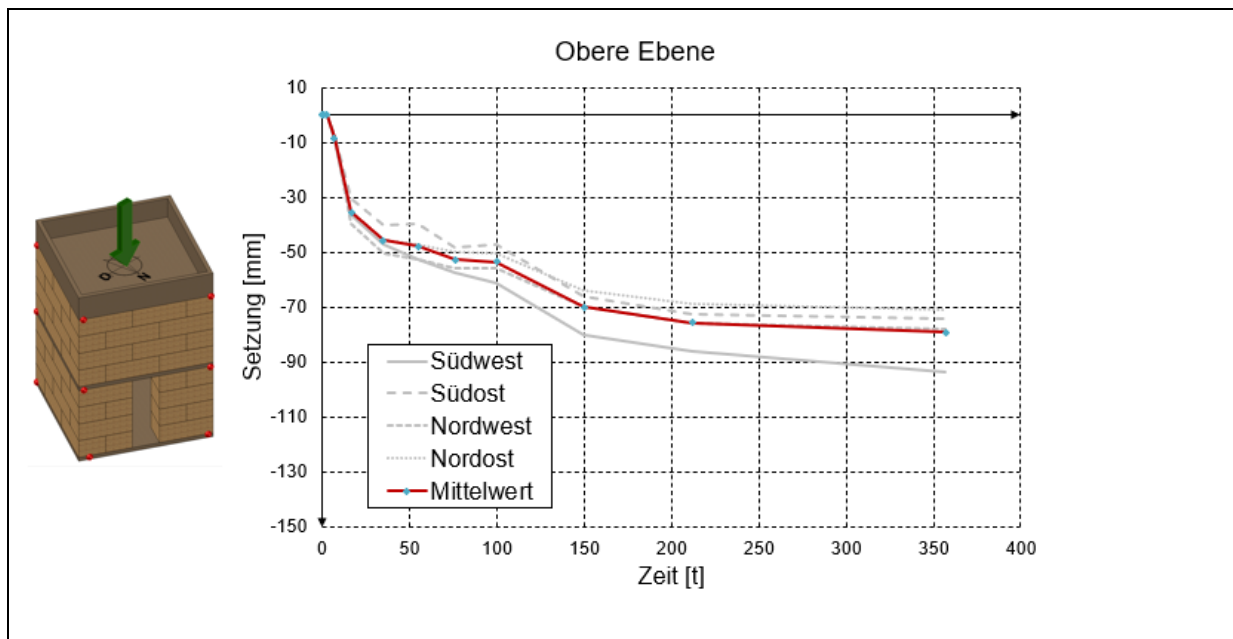


Abbildung 56 Zeitlicher Verlauf der Setzungen der einzelnen Wände in der obersten Ebene gemeinsam mit dem Mittelwert der Wandsetzungen.

Das Setzungsdiagramm zeigt einen starken Anstieg der Setzungen am Beginn, der die initialen Setzungen und den weiteren Ausbau des Gebäudes charakterisiert. Ein Abflachen der Kurve ist deutlich zu erkennen, d. h. ein Abklingen der Setzung stellt sich erwartungsgemäß ein. Der zwischenzeitliche Anstieg der Setzungsrate zwischen Tag 100 und 150 ist dem weiteren Ausbau des Bauwerks durch Aufbringen der Putzschichten geschuldet. Ein Lehmputz wurde mehrlagig zum Ausgleichen der geometrischen Unterschiede zwischen den Strohballen verwendet. Dabei ergaben sich stellenweise sehr große Putzdicken. Die beobachtete Zunahme der Setzung ist daher realistisch. Die wiederholte Ermittlung der Setzungen wurde über die Bauphase des Gebäudes hinaus fortgesetzt und wird weiterhin als ein diskontinuierliches Setzungsmonitoring fortgeführt. Die Messdaten werden im Folgeprojekt *INNOSTROH - Innovatives Bauen mit lasttragenden Strohballen* (TAB 2023 FGR 0051 & 0052) weiter ausgewertet. Erste Ergebnisse wurde bei den Strohballenbautagen 2025 einem breiten Fachpublikum vorgestellt.

[<https://www.uni-weimar.de/de/bau-und-umwelt/forschung/innostroh/aktuelles/>]

3D-Gebäudemodell

Im Sommer 2025 fand eine Befliegung des Forschungsdemonstrators zur Dokumentation des Ist-Zustandes statt. Dabei wurde die Gebäudehülle mit einer handelsüblichen, kleinformatischen Drohne befliegen und mit rund 300 Einzelbildern aufgenommen. Basierend auf den Bilddaten, die unter der Beachtung von Randbedingungen aufgenommen wurden, und unter Anwendung von Methoden der dreidimensionalen Rekonstruktion (Photogrammetrie, Structure-from-Motion) konnte auf diese Weise ein digitales Abbild des Demonstrators als 3D-Modell ermittelt werden. Die erhobenen Bilddaten sind im 3D-Modell integriert und exakt verortet (Screensshot Abbildung 57). Das 3D-Modell kann daher als digitaler Zwilling des Gebäudes angesehen werden.

Das 3D-Gebäudemodell ist über die Web-Oberfläche HeriTwin der Bauhaus-Universität Weimar frei zugänglich und über folgenden Weblink erreichbar:

<https://www.heritwin.de/share/strohbau?space=1>

Hinweis:

Die Ansicht des Modells sollte am Laptop oder Rechner erfolgen, da mobile Endgeräte plattformseitig nicht unterstützt werden. Ein kurzes Video zur Erläuterung der Navigation innerhalb ist auf der Weboberfläche verfügbar.

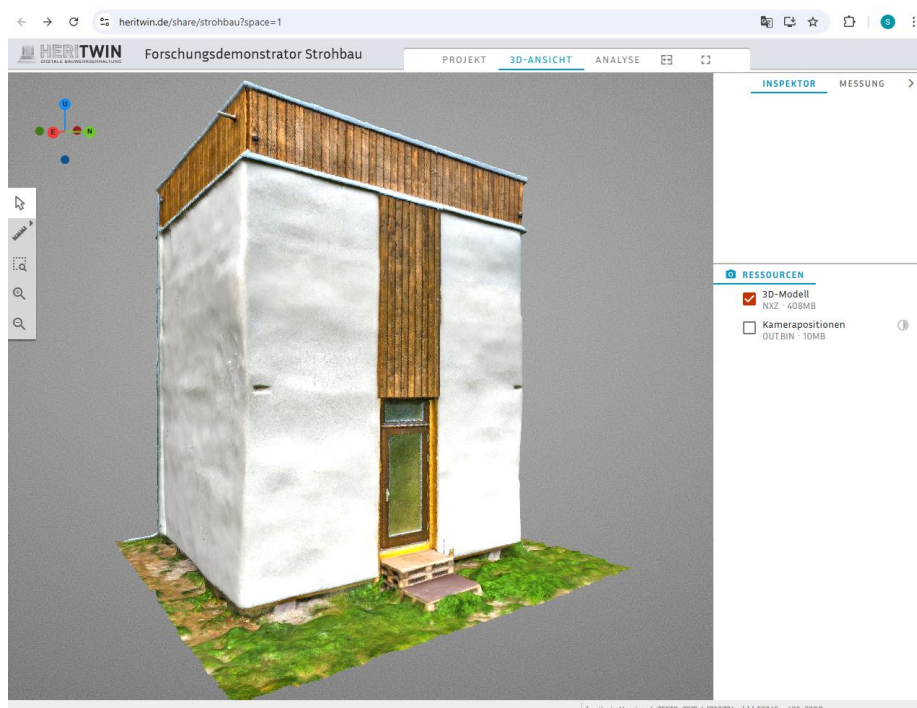


Abbildung 57 Digitales 3D-Gebäudemodell in einer Weboberfläche. Quelle: <https://www.heritwin.de/>

Monitoringkonzept

Zur messtechnischen Begleitung des Forschungsdemonstrators wurde mit dem Ziel der ganzheitlichen Erfassung mechanischer, bauphysikalischer und metrologischer Daten ein umfassendes Monitoringkonzept erarbeitet, welches folgende Messungen beinhaltet:

- Erfassung der Windeinwirkungen: Windrichtung, Windgeschwindigkeiten (BUW)
- Erfassung der Bauwerksreaktion infolge der Windeinwirkung: Dehnung der Diagonalstreben (Gewindestäbe der Aussteifung) (BUW)
- Erfassung des thermohygrischen Verhaltens der Strohballenwände: Temperatur und Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Bauteilquerschnitten (MFPA)
- Erfassung der hygrischen Bedingungen in der Mauerwerkskrone: Feuchtigkeitmessung (TDR) durch die MFPA

Eine wichtige Frage, die mithilfe des Monitorings aus mechanischer Sicht beantwortet werden soll, ist, ob Strohballenwände eine ausreichende Aussteifung für auftretende Schubkräfte aus Windbeanspruchung darstellen, oder ob zusätzliche Aussteifungssysteme notwendig sind. Diesem Ziel folgend wird die Windbeanspruchung erfasst, die in eine äquivalente Schubbeanspruchung auf die Längswände (in Windrichtung) überführt werden soll. Durch Instrumentierung der vorhandenen Aussteifung (Diagonalstäbe) mit Dehnmessstreifen (Abbildung 58) kann auf die abgetragenen Kräfte geschlossen werden. Wenn die einwirkende Schubkraft und die durch die Aussteifung abgetragene Schubkraft bekannt sind, kann bestimmt werden, welcher Anteil der Schubkraft über die zu untersuchenden Strohballenwände abgetragen wird. Auf diese Weise wird das Tragverhalten der Strohballenwände überwacht.



Abbildung 58 Konzept zur Ermittlung der von den Strohballenwänden abgetragenen Schubkräften: Schematische Darstellung mit einwirkender Schubkraft (blau) und Zugbeanspruchung der Aussteifungsdiagonalen (rot) (links); installiertes Messsystem mit instrumentierten Schrägstäben (Mitte); Dehnmessstreifen an den Aussteifungsdiagonalen (rechts)

Zur dynamischen Ermittlung der Windeinwirkungen wurde auf dem Dach des Gebäudes ein 3D-Ultraschall-Anemometer (Thies CLIMA) installiert. Die Windmessungen erfolgen kontinuierlich mit einer Abtastrate von 75 Hz. Messdateien werden jedoch nur abgelegt, wenn ein Grenzwert von 7 m/s Windgeschwindigkeit überschritten wird (Triggermessungen).

Das thermohygrische Verhalten in der Strohballenwand wird mithilfe von Temperatur- und Luftfeuchtemessungen überwacht, die an insgesamt 22 Messstellen im Inneren der Wandkonstruktion durchgeführt werden. Die Sensoren befinden sich in Tiefen von 5 cm, 60 cm und 115 cm in der Strohballenwand (Tiefe von innerer Putzschicht gemessen). Abbildung 59 zeigt die Belegung der beiden wetterbelasteten Außenwände des Demonstrators mit Temperatur/Luftfeuchte-Sensoren zur Bauteilüberwachung.

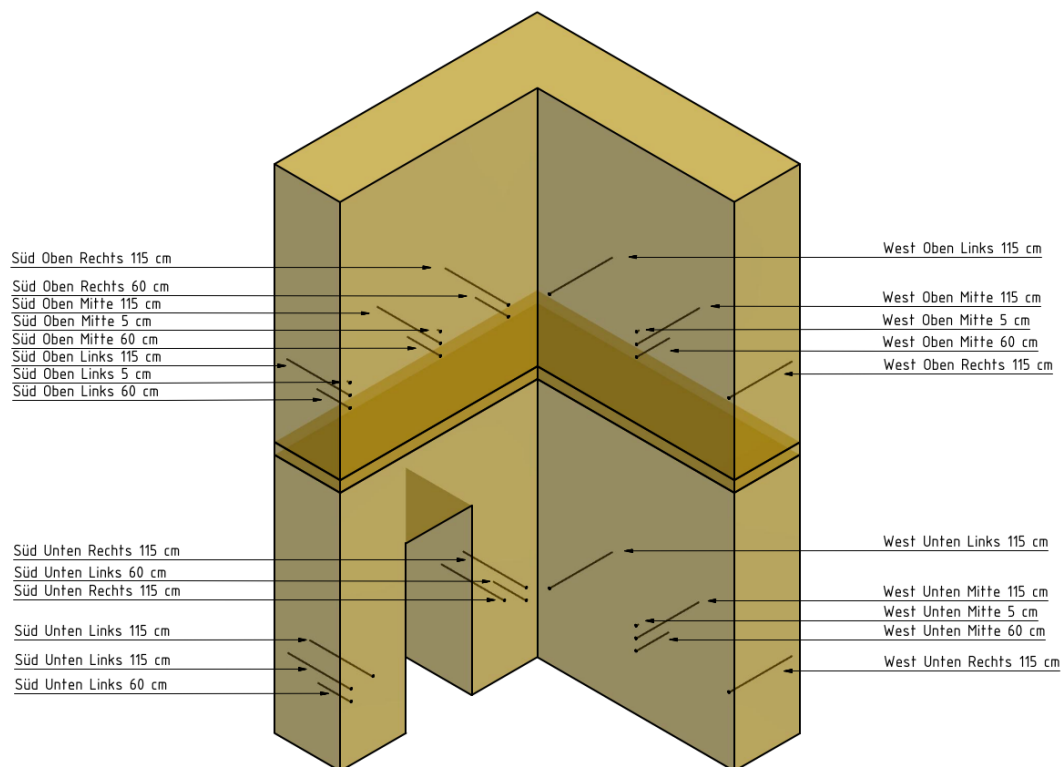


Abbildung 59 Feuchtemonitoring in Bauteilquerschnitten – schematische Darstellung der Sensoranordnung

Diese Sensoren sind mit Messkabeln durch dünne Kunststoffröhrchen zum Messort verlegt. Die Messungen zu den thermischen und hygrischen Zuständen in den Wänden erfolgen kontinuierlich mit einer Abtastrate von 10 Minuten.

Darüber hinaus wird die Bauteilfeuchte qualitativ in der Mauerwerkskrone mit TDR-Sensorik erfasst. Analog zur Installation im Demonstrator Strohklassenzimmer ist umlaufend ein Satkabel-Sensor verlegt.

Die verschiedenen Messgrößen werden mit einer unterschiedlichen Abtastrate erfasst, da sich die zugrundeliegenden Messgrößen in sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten ändern. Windgeschwindigkeiten ändern sich z.B. sehr schnell, wohingegen sich die Temperatur und Feuchtigkeit innerhalb der Wand nur sehr langsam ändern. In nachfolgender Abbildung 60 sind einige der am Demonstratorgebäude installierten Sensoren und Messstellen dargestellt.

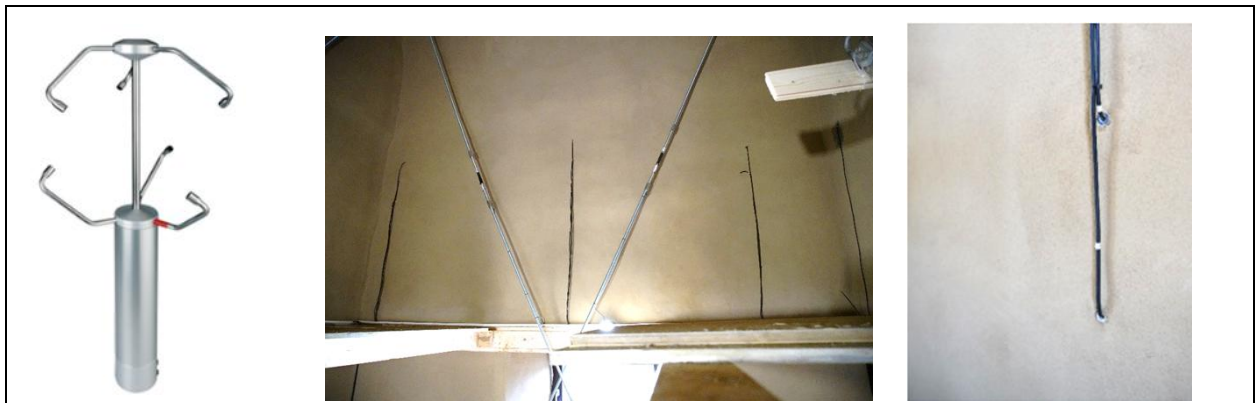


Abbildung 60 Installierte Messtechnik am Forschungsdemonstrator: 3D-Ultraschall-Anemometer auf dem Gebäudedach (links); Messstelle zur Erfassung von Temperaturen und Luftfeuchtigkeit in einer der Strohballenwände im OG (Mitte und rechts).

Weiterführende Informationen zum 3D-Ultraschall-Anemometer findet man unter dem Link <https://www.thiesclima.com/de/ultraschall-anemometer-1d-2d-3d/>

Die Erfassung der Messdaten erfolgt aufgrund der unterschiedlichen notwendigen Abtastraten mit zwei separaten Messsystemen. Das erste Messsystem erfasst dynamisch die Windeinwirkungen und die Dehnungen an den Spannstäben des Aussteifungssystems. Das zweite System erfasst niederfrequent alle Temperatur- und Feuchtigkeitsdaten. Die beiden Messdatenerfassungseinrichtungen, bestehend aus Datenlogger und PC, wurden jeweils in einer der Gebäudeecke an einer Holzunterkonstruktion installiert. Messsystem 1 ist durch eine Pufferbatterie zusätzlich vor Stromausfällen geschützt. Beide Messwert-Monitoringsysteme sind in Abbildung 61 gezeigt.



Abbildung 61 Messwerterfassung im Forschungsdemonstrator: Windmonitoring und Dehnungen an den Gewindestäben des Aussteifungssystems (linker Monitor); Temperatur- und Feuchtemonitoring (rechter Monitor)

Die Sensoren wurden erst nach dem Laufzeitende des Projektes *LaStrohBau* installiert. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung sind alle Sensoren am Demonstrator installiert und die Messwerterfassungen sind in Betrieb genommen. Die erfassten Messdaten werden sowohl für die geplanten Untersuchungen im Forschungsprojekt *LaStrohBau II* als auch für die Auswertungen innerhalb der Forschungsgruppe *INNOSTROH* (TAB 2023 FGR 0051 & 0052) zur Verfügung stehen. Die TAB-Forschungsgruppe *INNOSTROH* wird von drei Professuren der Bauhaus-Universität Weimar und der MFPA durchgeführt.

Exemplarisch werden nachfolgend erfasste Messdaten gezeigt: In Abbildung 62 sind Windgeschwindigkeit, -richtung und der Verteilung über Geschwindigkeitsklassen in Form einer Windrose für eine Kurzzeitmessung dargestellt. Abbildung 63 zeigt exemplarisch die an dem Dehnmessstreifen ermittelten Messdaten für eine Kurzzeitmessung während des Vorspannens der Gewindestäbe der Diagonalaussteifung der vier Wände.

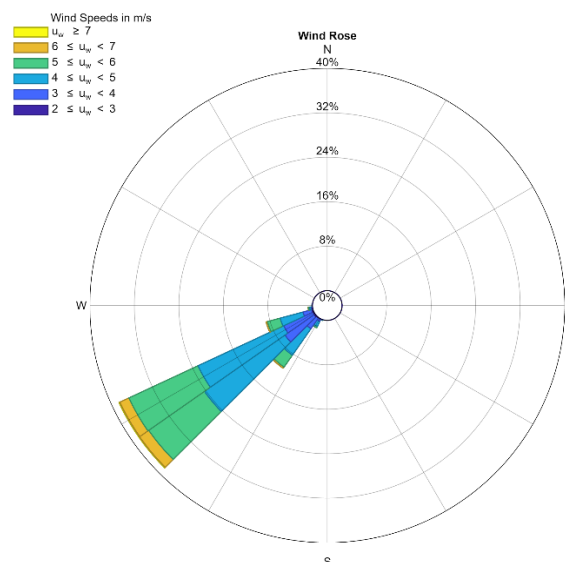


Abbildung 62 Exemplarische Darstellung der Windrose einer Kurzzeitmessung während des Vorspannens der Diagonalen mit Darstellung der Verteilung der Windgeschwindigkeiten

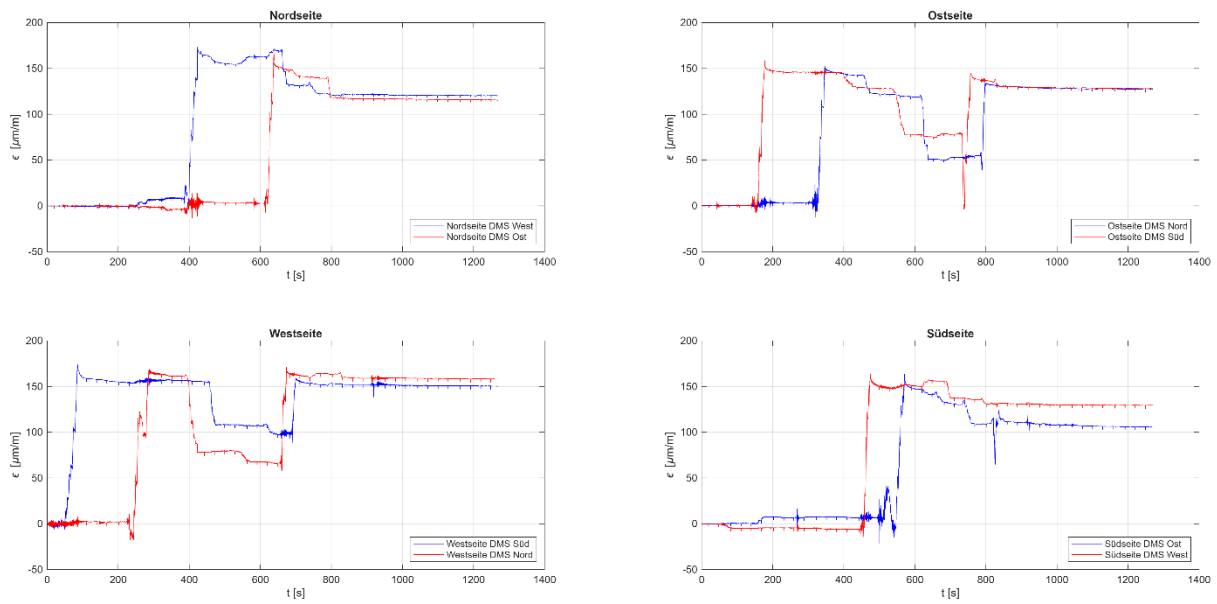


Abbildung 63 Zeitverläufe der gemessenen Dehnungen an den Diagonalstäben in den vier Seiten des Gebäudes (Nord, Ost, Süd, West) während des Vorspannens der Diagonalen. Die zweite Himmelsrichtung bezeichnet die Seite des Aussteifungsstab im Kreuzverband auf der unteren Ebene.

6 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse des Projektes wurden in vielfältiger Weise in der Öffentlichkeit bekanntgemacht. Dafür wurden durch Mitglieder der Kooperation während der Laufzeit des Vorhabens regelmäßig Vorträge auf Tagungen gehalten, die sich mit der Thematik lasttragender Strohballenbau beschäftigen. Der Partners Z-Architektur arbeitet aktiv im Vorstand des Fachverband Strohballenbau e.V. So führte das Büro Z-Architektur die Organisation mehrerer Strohballenbau-Tagungen in Zusammenarbeit mit den Partnern der Kooperation (Tagung in Weimar 2023 und 2025) bzw. mit externen Partnern der bundesdeutschen Strohballenbau-Community (Bayreuth 2022, Aachen 2024, Dresden 2025) durch. Referenten waren bei diesen Tagungen Partnern der Kooperation sowie Fachreferenten aus Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Beim Projektpartner Diakonie Landgut Holzdorf ergaben sich öfter Gelegenheiten, den lasttragenden Strohballenbau am Strohklassenzimmer zu erläutern und Besucher im Objekt zu führen. So war im Oktober 2025 mit dem Bundes-Landwirtschaftsminister Alois Rainer auch ein prominenter Gast beim Projektpartner Diakonie im Landgut Holzdorf zu Besuch, das Veranstaltungsort für das Vernetzungstreffen der Thüringer LEADER-Regionen in 2025 war. Der Minister zeigte sich beeindruckt von den Resultaten des Einsatzes der EU-Mittel aus der LEADER-Förderung auch im Landgut Holzdorf. Dabei besuchte und würdigte er auch das Strohklassenzimmer in lasttragender Strohballenbauweise. (siehe Link zum Videobeitrag aus der MDR-Mediathek in Tabelle).

Die verschiedenen Aktionen zur Öffentlichkeitsarbeit sind chronologisch in der folgenden Tabelle 5 aufgelistet. Videos und Internetmeldungen der Partner wurden im Kapitel 5 mit QR-Codes zum schnellen Aufrufen versehen.

Tabelle 5 Öffentlichkeitsarbeit während der Laufzeit des Projektes LaStrohBau

Datum	Veranstaltung	Aktionen/Beschreibung/Hinweise
16.09.2021	Fachvortrag auf dem 6. Internationalen BBB-Kongress in Weimar	Zusammenfassung des Status Quo auf dem Gebiet der Strohballenforschung und Vorstellung des neuen Forschungsprojektes Publikation (Taube 2021-1)
15.07.2022	Summaery 2022 eine Veranstaltung der Bauhaus-Uni Weimar zur Präsentation von Projekten für Studenten	Zusammen mit weiteren Projekten Präsentation von Belastungsversuchen an Quaderstrohballen und flankierenden Studentischen Projekten. ca. 150 Besucher in den Versuchslaboren in der Coudraystraße 4 https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/aktuell/veranstaltungenkalender/highlights-des-jahres/archiv/2022/summaery/science-mile-q3/

13./14.09.2022	Strohballenbautage 2022 in Bayreuth	https://forum1punkt5.de/ballenbautage2022/ 3 Vorträge von Projektpartnern federführende Organisation der Tagung durch Z-Architektur
10.10.2022	Leader Regionalkonferenz Geringswalde	Vortrag Florian Hoppe - Strohballenbau in Deutschland Entwicklung Planung Chancen Herausforderungen
04.11.2022	Heinze – Klimafestival	Vortrag Florian Hoppe – Bauen mit Strohballen
04.02.2023	Showroom Bockelwitz	Vortrag Florian Hoppe, Bauen mit Strohballen
18.11.2022	Lange Nacht der Wissenschaften Weimar	Zusammen mit weiteren Projekten Präsentation von Belastungsversuchen an Quaderstrohballen. ca. 200 Besucher in den Versuchslaboren in der Coudraystraße 4 https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/aktuell/veranstaltungenkalender/highlights-des-jahres/archiv/2022/lange-nacht-der-wissenschaften-2022/
06.05.2023	1. Deutscher Strohbahtag – FASBA in Lüneburg	Vortrag Florian Hoppe: Vorstellung Forschungsaktivitäten in Weimar
14.07.2023	Summaery 2023 eine Veranstaltung der Bauhaus-Uni Weimar zur Präsentation von Projekten für Studenten	Zusammen mit weiteren Projekten Präsentation von Belastungsversuchen an Quaderstrohballen und flankierenden studentischen Projekten. ca. 150 Besucher in den Versuchslaboren in der Coudraystraße 4 https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/aktuell/veranstaltungenkalender/highlights-des-jahres/archiv/2023/summaery/science-mile-q3/
11. und 12.09.2023	Strohballenbautage 2023 in Weimar	https://www.uni-weimar.de/de/bau-und-umwelt/forschung/tagungen/strohballenbautage-2023/ 3 Vorträge von Projektpartnern LaStrohBau Laborführung der Teilnehmer an der MFPA und Bauhaus-Universität Organisation der Tagung durch Partner Z-Architektur, MFPA und Bauhaus-Universität

22.11.2023	3. Innovationsforum der Thüringer Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft - „Regionalität. Zusammenarbeit. Innovation.“	https://www.aufbaubank.de/Veranstaltungen/Regionalitaet.-Zusammenarbeit.-Innovation-Das-Innovationsforum-der-Thueringer-Land-Forst-und-Ernaehrungswirtschaft https://www.aufbaubank.de/Veranstaltungen/Ausschwaermen-Innovationsforum-2023-LaStrohBau-Clean-Air-in-Weimar Ausschwärmen vom Innovationsforum 2023 LaStrohbau & CleanAir in Weimar, Besichtigung der Labore in MFPA und Bauhaus-Uni, Vorstellung Video über Errichtung Schafstall im Hof Herten
Januar 2024	Beitrag über lasttragendes Bauen in Zeitschrift d. Thüringer Bauernverbandes e.V.	Betriebsreportage von Barbara Wünsche zum Thema lasttragender Strohbau für Landwirte
16.01.2024	Frankfurt University of Applied Sciences	Vortrag Florian Hoppe: Bauen mit Strohballen – Grundlagen und Anwendungsbeispiele lasttragender Konstruktionen
07.02.2024 (Sendetermin)	Beitrag zum lastragenden Strohballenbau in der Wissenschaftsendung nano auf 3sat, Beitrag in der Sendung „Pläne für das Tierwohlcent werden konkreter“ <u>ab Minute 19</u>	Beitrag in Mediathek abrufbar https://www.3sat.de/wissen/nano https://www.3sat.de/suche?q=NANO+vom+7.+Februar+2024%3A+PI%C3%A4ne+f%C3%BCr+Tierwohlcent+werden+konkreter&synth=true&attrs=
17.04.2024	Güteschutz Workshop MFPA Weimar	Vortrag Florian Hoppe: Bauen mit Strohballen – Grundlagen und Anwendungsbeispiele lasttragender Konstruktionen
26.-28.04.2024	2. Deutscher Strohbautag – FASBA in Freiburg i.B.	Projektvorstellung/Ausstellung Demonstratoren Schafstall und Strohklassenzimmer - Florian Hoppe
17.05.2024	Einweihung des Demonstrators Strohklassenzimmer in Holzdorf	Öffentliche Festveranstaltung des Projektpartners Landgut Holzdorf gGmbH anlässlich Einweihung, Präsentation von Video über Errichtung des Gebäudes sowie der Messtechnik für Monitoring der Feuchte in Außenwänden
Juni 2024	FAZ-Beitrag „Enkelfähig Bauen“ von Clara Müller	Beitrag über lasttragenden Strohballenbau und energie- und ressourcenschonendes Bauen https://cmk.faz.net/cms/microsite/17405/anzeige/republic/enkelfaehiq-bauen

14.06.2024	27. Fachtagung „Nutzung nachwachsender Rohstoffe - Bioökonomie	Vortrag Florian Hoppe - „Praxisanwendungen im lastabtragenden Strohganzzballenbau“
19./20.09.2024	Strohballenbautage 2024 in Aachen	Vortrag Florian Hoppe (Z-Architektur) https://aachenbuildingexperts.de/strohballenbautage-am-19-09-20-09-2024-in-aachen/
26.09.2024	4. Innovationsforum der Thüringer Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft	Vortrag von Florian Hoppe und Stefan Helbig Innovationsforum https://tllr.thueringen.de/wir/aktuelles/import-mi/detailseite/innoforum2024 Zur Projektvorstellung wurde ein Video über das Strohklassenzimmer Holzdorf erstellt: https://www.youtube.com/watch?v=gwbfmfdW6x5k
29.09.2024	Grüne Tage auf Messe Erfurt	Teilnahme am Messestand mit dem Vorhaben LaStrohBau
15.11.2024	Lange Nacht der Wissenschaften Weimar	Zusammen mit weiteren Projekten Präsentation von Belastungsversuchen an Quaderstrohbällen und Ballenfugen. ca. 150 Besucher in den Versuchslaboren in der Coudraystraße 4 https://www.uni-weimar.de/de/universitaet/aktuell/veranstaltungs-kalender/highlights-des-jahres/archiv/2024/lange-nacht-der-wissenschaften/
26./27.03.2025	Workshop der Innovationsdienstleister EIP-AGRI Innovationsförderung mit Dr. Leonie Göbel (DVS) in MFPA Weimar	Vortrag Stefan Helbig zur Präsentation von Ergebnissen aus LastrohBau sowie Führung durch die Labore der Projektpartner MFPA und Bauhaus-Uni
9./10.05.2025	3. Deutscher Strohbautag -FASBA in Weimar, eine Veranstaltung mit der MFPA und der Bauhaus-Universität Weimar	Vorstellung der Projekte LaStrohBau I, LaStrohBau II und INNOSTROH Besichtigung der Demonstratoren „Strohklassenzimmer“ und „Strohturm“ Besichtigung der Forschungslabore der Projektpartner MFPA und Bauhaus-Uni https://strohbautag.de/

20.06.2025	WBA - Zertifikatsstudium Lehmbau	Vortrag und Exkursion in Strohklassenzimmer Holzdorf, Fachvortrag Florian Hoppe: „Temporäres Klassenzimmer in Strohballenbauweise“
28.06.2025	KIT - Strohbauseminar	Onlinevortrag Florian Hoppe: „Einführung lasttragender Strohballenbau“
28.06.2025	Tag der Architektur 2025	Präsentation Strohklassenzimmers in Holzdorf als eins von 45 innovativen Thüringer Bauprojekten ca. 100 Besucher, dabei u.a. auch Gespräche mit Vertretern der Architektenkammer Thüringen https://architekten- thueringen.de/aft/sammlungen/?id=241 https://architekten- thueringen.de/aft/projekte/p/temporaere klas senzimmer aus str-4792.html
11.07.2025	Summaery 2025 eine Veranstaltung der Bauhaus-Uni Weimar zur Präsentation von Projekten für Studenten	Zusammen mit weiteren Projekten Präsentation des Demonstrators Strohballenturm für die Öffentlichkeit; ca. 100 Besucher am Standort Böckelsberg https://www.mfpa.de/nachrichtenbeitrag/sum maery-2025-am-boeckelsberg-nachhaltiges- bauen-zum-anfassen.html https://www.youtube.com/watch?v=mVllvcO QeJg
23./24. 10.2025	Strohballenbautage am in Dresden	Tagungs-Vorträge aus der Kooperation LaStrohBau: Florian Hoppe (Z-Architektur), Christopher Taube (Bauhaus-Universität) und Andreas Keller (Keller-Stroh) https://tu- dresden.de/ing/maschinenwesen/int/hft/resso urcen/dateien/veranstaltungen/strohballenba utage2025/Faltprogramm Ballenbautage 20 25.pdf?lang=en

28.10.2025	Besuch von Bundes-Landwirtschaftsminister Alois Rainer bei Diakonie im Landgut Holzdorf	Beitrag im Thüringen-Journal des MDR https://www.ardmediathek.de/video/mdr-thueringen-journal/bundesminister-besucht-landgut-holzdorf/mdr/Y3JpZDovL21kci5kZS9iZWl0cmFnL2Ntcy9mZmEzZTdhdhNC1mYzFkLTQwMWwQtYTBhYy03NWVhMzNiOGU1OWY Info auf Internetseite Diakonie https://www.diakonie-wl.de/oeffentlichkeitsarbeit/aktuelles/detail/besuch-des-bundesagrarministers-alois-rainer-im-weimarer-land/
18./19.11.2025	WPK-Workshop in der MFPA für Firmen der Ziegelindustrie (Werkseigene Produktionskontrolle)	Florian Hoppe: Strohballenbau in Deutschland - Projektberichte Vorstellung von Projektergebnissen aus LaStrohbau der Partner MFPA und Bauhaus-Uni (Laborführungen) Besichtigung Demonstrator „Strohturm“
21.11.2025	Verband für Agrarforschung und Bildung Thüringen e.V.	Exkursion und Vortrag Florian Hoppe Demonstrator Strohturm
16.12.2025	1. Fachtagung Landwirtschaftliches Bauen mit Holz und Stroh in Erfurt	Vortrag Florian Hoppe „Lastabtragender Strohballenbau- Anwendungsbeispiele in der Landwirtschaft“

Außerdem wurden bei verschiedenen Gelegenheiten sowie nach Anfragen Führungen der interessierten Fachöffentlichkeit in den Demonstratoren durchgeführt. So wurden zum Beispiel die Demonstratoren in Holzdorf und im Niedergrunstedter Weg 12 für eine Besuchergruppe der Hochschule Bremen, Professur Nachhaltige Bauweisen im urbanen Kontext (Prof. Konrad, M.A. Matthis Gericke) vorgestellt, die eine Exkursion zu Themen des nachhaltigen Bauens durchführte.

Zu erwähnen ist außerdem, dass während der Projektlaufzeit über das lasttragende Bauen mit Strohballen durch bzw. über Partner Z-Architektur einige weitere Medienbeiträge (Reportage-Videos, Erfahrungsberichte in Zeitungen ...) über das Wohnen im eigenen lasttragenden Strohballenhaus entstanden sind. Das hat bereits sehr zur öffentlichkeitswirksamen Verbreitung der Ideen über diese neue Bauweise beigetragen.

Es wurden verschiedene Videos über die Demonstratoren erstellt. Dafür wurden alle im Projekt LaStrohBau errichteten Demonstratoren mit Kameras während ihres Aufbaus gefilmt und daraus u.a. Zeitraffervideos erstellt.

Öffentliche Video-Links zu den verfügbaren Baudokumentationen:

<https://www.youtube.com/@mfpa-weimar>

Demonstrator Schafstall Herten:

<https://www.youtube.com/watch?v=4IJ1LyKuX-o>

(QR-Codes siehe Kapitel 5.1)

Demonstrator Holzdorf:

<https://www.youtube.com/watch?v=gkjCFMvAktM&t=28s>

<https://www.youtube.com/watch?v=SXTpZ2340s8&t=233s>

<https://www.youtube.com/watch?v=gwbmfdW6x5k>

(QR-Codes siehe Kapitel 5.2)

7 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Projekt LaStrohBau wurden durch die Kooperation LaStrohBau systematische Untersuchungen an großen, hochverdichteten Quaderballen aus Weizenstroh vorgenommen. Diese Untersuchungen dienen der Ermittlung der statischen und wärmetechnischen Eigenschaften der Quaderballen bei der Anwendung für die lasttragende Bauweise.

Die Untersuchungen wurden an Chargen aus regionalem Thüringer Stroh aus verschiedenen Erntejahren vorgenommen. Dabei wurden Ballen mit unterschiedlicher Rohdichte durch unterschiedliche Pressdrücke produziert.

Bei den statischen Versuchen wurden Kurzzeit- und Langzeitbelastungsversuche durchgeführt. Mit den Messdaten der statischen Untersuchungen konnte ein verallgemeinertes Modell abgeleitet werden, was in Abhängigkeit von der Ballenrohichte das Tragverhalten und die auftretenden Unsicherheiten abschätzen kann. Das Modell ist eine quadratische Spannungs-Dehnungslinie, die das zunehmend versteifende Verhalten mit Erhöhung der Ballendichte widerspiegelt. Im gesamten Projekt, also für alle Laboruntersuchungen, wird dabei der flach liegende Einbau der Ballen in Gebäuden vorausgesetzt. Die Langzeituntersuchungen ergaben ein über die Belastungszeit asymptotisch abklingendes Kriechverhalten mit moderaten Kriechzahlen, für die sich jedoch aus den bisherigen Versuchsergebnissen keine klare Rohdichteabhängigkeit herausgestellt hat.

Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit zeigen die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte für einen flach liegenden Einbau. Durch ein Sägen der gesamten Ballen konnten die Messungen an Ballenprobekörpern mit unveränderter Rohdichte und innerer Struktur vorgenommen werden.

Es wurden durch die Kooperation im Vorhaben drei experimentelle Demonstratoren mit verschiedenen Nutzungen errichtet: ein Unterstand für Schafe und Ziegen, ein Strohklassenzimmer für eine Schullnutzung und ein Strohturm. Letzterer ist ein zweigeschossiger reiner Forschungsdemonstrator, der in wetterexponierter Lage errichtet wurde. Alle Demonstratoren wurden aus großen Quaderballen in flach liegender Einbaulage errichtet.

An allen Demonstratoren werden regelmäßig Feuchtemessdaten erfasst. Der Forschungsdemonstrator Strohturm wurde zudem umfangreich instrumentiert, um für die vorliegende herausfordernde Geometrie (hohes Bauwerk mit kleinem Grundriss) die Einflüsse von Windlasten auf die Gebäudekonstruktion beobachten zu können. Außerdem wurde ein umfangreiches Setzungsmonitoring begonnen, dessen Daten zur Validierung der weiteren mechanischen Modellbildung in Forschungsvorhaben wie der Forschungsgruppe INNOSTROH herangezogen werden können.

8 Ausblick

Im laufenden Anschlussprojekt LaStrohBau II sollen die Grundlagen für eine allgemeine bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) für Quaderballen zum lasttragenden Strohballenbau in Verbindung mit einer allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) für diese neuartige Bauweise geschaffen werden. Der Weg dazu soll in Abstimmung mit dem DiBt vorbereitet werden.

Durch die Ergebnisse des Anschlussprojektes soll der FASBA unterstützt werden, die abZ und aBG für definierte Quaderstrohballen zu beantragen und erlangen zu können. Dazu gehört auch die Erarbeitung von Konstruktionsgrundlagen für die Ausbildung von lasttragenden Strohballenwänden als Grundlage für die aBG.

Die aus experimentellen Versuchsergebnissen abgeleiteten Modelle und die an den Demonstratoren gewonnenen Monitoring-Daten (Feuchte, Bewegung, Setzung) dienen dabei der Argumentation gegenüber den Gutachtern beim DiBt.

Die den Demonstratoren gewonnenen Monitoring-Daten (Feuchte, Bewegung, Setzung) dienen dabei der Argumentation gegenüber den Gutachtern beim DiBt.

Die bisher errichteten Gebäude in lasttragender Bauweise – einschließlich der für weitere Bauherren geplanten und realisierten lasttragenden Bauwerke des Kooperationspartners Z-Architektur – werden als Musterbauten für verschiedene Anwendungsklassen von Strohballenbauten gesehen. Solche Anwendungsklassen sind:

- Landwirtschaftliche Nutzbauten
Unterbringung von Sachen oder zum vorübergehenden Schutz von Tieren
- Gebäude mit Aufenthaltsräumen
für Büro- und Schulungszwecke, Notsituationen oder Übergangs- und Ausweichlösungen (ggf. auch temporäre Bauten, Containerersatz), Verkaufsgebäude, Hofläden
- Wohngebäude für den ländlichen Raum

Im Projekt LaStrohBau II sollen außerdem weitere kleinere Demonstratoren errichtet werden, um beispielhafte Anwendungen in den genannten Nutzungsklassen aufzuzeigen und um auch Erfahrungen bei Verwendung von Kleinballen für die lasttragende Bauweise zu sammeln.

Ein weiterer Schwerpunkt des Nachfolgeprojekts soll der Aufbau eines Muster-(typen)katalogs für die genannten Anwendungsklassen sein. Dazu sollen auch beispielhafte konstruktive Detaillösungen z.B. für den Mauerwerksfuß- und Kopfpunkt, Ringbalkenkonstruktionen, konstruktiver Wetterschutz (Dachüberstände u.a.) sowie Bauteilanschlüsse (Fenster, Türen, Tore ...) erarbeitet werden. Außerdem gehen in den Katalog die Erfahrungen der Nutzer der bestehenden Gebäude (u.a. der Demonstratoren) in die Bewertung der vorgeschlagenen Baukonstruktionen ein.

Die Mitglieder der Kooperation sind in diesem Zusammenhang offen für gegenwärtig weiterführende Anfragen und Anregungen aus der Praxis bezüglich weiterer Nutzungen der lasttragenden Bauweise in der landwirtschaftlichen Praxis. So werden gegenwärtig u.a. auch eine

Anfrage zur Herstellung eines einfachen temporären Unterstandes für eine Mutterkuhherde und eine Anfrage zum Schaffen von Lagermöglichkeiten für Feldfrüchte unter Verwendung der lasttragenden Bauweise konzeptionell bearbeitet.

9 Verwertung der Projektergebnisse

Als eine Verwertung von Projektergebnissen sind die wissenschaftlichen Publikationen [Taube 2021-1, 2] und [Taube 2024], die Konferenzbeiträge und Fachvorträge der Projektpartner (siehe Tabelle 5) sowie die weitere Öffentlichkeitsarbeit zu berichten. Damit wurden die Ergebnisse einerseits der forschenden Community und andererseits der interessierten Fachöffentlichkeit sowie auch einer breiten interessierten Öffentlichkeit mitgeteilt.

Außerdem flossen die Ergebnisse von Untersuchungen im Rahmen der laufenden Planungstätigkeiten der Partner u. a. für das Erreichen von Zustimmungen im Einzelfall für Bauobjekte sowie beratende Tätigkeit für interessierte Fachkollegen ein. Beispiele dafür sind:

- Dorfgemeinschaftshaus Erbsen
- Projekt Musterhaus bei Leipzig

Mitarbeiter der Kooperation LaStrohbau werden sich im Jahr 2026 an der Ausrichtung des Zertifikatslehrgang „Ökologisches Bauen“ der WBA Weimar mit einem Schulungstag zum Strohbau beteiligen. Die MFPA verwendet außerdem die Erkenntnisse zum lasttragenden Strohballenbau im Rahmen von Bildungsprojekten (z.B. im wir!-Bündnis RENAT.BAU).

Mit dem aktuell laufenden Nachfolgeprojekt „Lasttragender Strohballenbau- Ermittlung statisch-konstruktiver und bauphysikalischer Kennwerte und Modelle für eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung und allgemeine Bauartgenehmigung, Entwicklung konstruktiver Standardlösungen und Musterkatalog für Außenwandkonstruktionen aus Quaderballen für Landwirtschaftliche Nutzbauwerke“ (LaStrohBau II) ist bereits ein wissenschaftlicher Anschluss gelungen. Mit diesem Projekt soll eine deutlich vereinfachte Genehmigung von Bauwerken in lasttragender Strohballen-Bauweise durch die entsprechenden bauaufsichtlichen Regelungen (allgemeine Bauartgenehmigung aBG und allgemeine bauaufsichtliche Zulassung abZ) gelingen.

Die Erfahrungen mit den bereits gebauten Demonstrator-Objekten fließen in einen Mustertypenkatalog für landwirtschaftliche Nutzbauten (Lager, Unterstände für Tiere, Maschinen), Gebäude mit Aufenthaltsräumen (Büro- und Schulungszwecke, Verkaufsgebäude, Hofläden ...) und Wohngebäude für den ländlichen Raum ein.

10 Danksagung

Die Kooperation LaStrohBau wurde durch einen Zuschuss für das Vorhaben „Lasttragender Strohballenbau für landwirtschaftliche Nutzbauwerke und Wohngebäude – Erarbeitung statisch-konstruktiver und bauphysikalischer Bemessungsgrundlagen -LaStrohBau“ (Projekt-Nr.: 2020 LFE 0010) im Rahmen der Förderung der Zusammenarbeit in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft (LFE) gemäß der Richtlinie des Thüringer Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft (TMIL) gefördert. Die Zuwendung erfolgte aus Mitteln der Europäischen Landwirtschaftsfonds zur Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) und Mitteln des Freistaates Thüringen.

Die Mitglieder der Kooperation sind dankbar für die Bereitstellung der Mittel zur Durchführung des Projektes und wollen sich hiermit auch ausdrücklich beim Projektträger, der Thüringer Aufbaubank TAB, für eine stets hilfreiche Betreuung bei der Projektabwicklung bedanken. Dabei seien insbesondere auch die Hilfe des Projektträgers bei der Umsetzung des zusätzlichen temporären Demonstratorgebäudes Strohklassenzimmer im Landgut Holzdorf erwähnt.

Die praktische Demonstration der lastragenden Bauweise in den gebauten Demonstratoren ist ein wesentlicher Teil des Vorhabens. Sie wäre nicht möglich gewesen ohne die bereitgestellten Investmittel des Partner Diakonie Landgut Holzdorf gGmbH (Strohklassenzimmer) und die anteiligen Investmittel der MFPA (Strohturm, Niedergrunstedter Weg 12).

Weiterhin sagen die LaStrohBau-Akteure „Danke!“ für alle bereitgestellte Unterstützung und Beratung seitens des assoziierten Partners Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR).

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Quaderballenpresse: BIGPACK 1290 HDT II XC, Krone, Quelle: Z-Arch.	7
Abbildung 2 Schadsichtung, Ernte 2022 – Quelle: Z-Arch.	8
Abbildung 3 Prüfung Halmlänge, Ernte 2022 – Quelle: Z-Arch.	9
Abbildung 4 Feuchte-Messgeräte Agreto HFM II für Ernte 2024 (links) und Delmhorst F-2000 für Ernte 2022 (rechts), Quelle: Z-Arch.	10
Abbildung 5 Ballenmassebestimmung Ernte 2024, Quelle: Z-Arch.	11
Abbildung 6 Halber Quaderballen mit Markierung, Quelle: Z-Arch.	12
Abbildung 7 Verfärbung an Getreidehalmen, Ernte 2023 – Quelle: Z-Arch.	13
Abbildung 8 Feld bei Vogelsberg (Thür.), Ernte 2023 – Quelle: Z-Arch.	14
Abbildung 9 Dokumentation (Messen, Fotografieren, Markieren), Ernte 2024 – Quelle: Z-Arch	15
Abbildung 10 Transport Baustrohballen und Entladungstechnik, 2024, Quelle: Z-Arch.	16
Abbildung 11 Stapeln der Probestballen im Lager, 2024, Quelle: Z-Arch.	16
Abbildung 12 Längenermittlung mit Schiebelehre, 2024, Quelle: Z-Arch.	17
Abbildung 13 Visueller Eindruck (oben links), Halmlängenverteilung (oben rechts) und Klimatische Bedingungen während der Wachstumsperioden der untersuchten Ballenchargen	20
Abbildung 14 Schematischer Versuchsaufbau für die Kurzzeitversuche (links), Versuchsaufbau im Versuchslabor (oben rechts), Ballenoberfläche mit Mess-Markern zur Kalibrierung der optischen Messung (Mitte rechts) und eingesetztes Kamerasystem (unten rechts) (Tauben 2024)	25
Abbildung 15 Visualisierung der vertikalen und horizontalen Dehnungszustände in den Strohballen unterschiedlicher Dichte unter einer Vertikalspannung von 40 kN/m ² : Seitlich nicht deformationsbehinderte Ballen (links) und seitlich deformationsbehinderte Ballen (rechts) (Tauben 2024)	26
Abbildung 16 Vertikale Ballendehnungen unter verschiedenen Auflasten in Abhängigkeit der Ballenrohndichte: Vergleich zwischen den im Projekt durchgeführten Versuchen und Versuchsergebnissen aus der Literatur [Tauben 2024].	27
Abbildung 17 Ablauf der Langzeit-Kriechversuche: Ballenanlieferung (oben links), Ballen im Versuchsstand vor (oben rechts) und nach (Mitte links) dem Auflegen der ersten Ballastplatte, Aufladen weiterer Ballastplatten mithilfe des Gabelstaplers (unten links) und Ballen unter voller Dauerlast während des Kriechversuchs (unten rechts)	29
Abbildung 18 Modellbildung des Kurzzeit-Tragverhaltens: Vorgehensweise der Modellbildung (links) und Modellvorhersage der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der seitlich deformationsbehinderten Strohballen (rechts) [Tauben 2026].	32
Abbildung 19 Kriechdehnungen (links) und Kriechzahlen (rechts) für eine Auswahl der unter Kriechbeanspruchung getesteten Strohballen mit Mittelwerten und Modellapproximation.	34

Abbildung 20 Prüfstände zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an großen Materialproben: Plattengerät (links) und Wandprüfstand mit typischem Probekörper (rechts).....	35
Abbildung 21 Schneiden eines Quaderballens mit einer Kettensäge, Fixierung des Ballens in einem Holzkastens	37
Abbildung 22 links: Kapp-Kettensäge zum Teilen eines Quaderstrohballens in Probekörper, rechts: Herstellung von drei Probekörpern für Wandmessung und Plattengerät	38
Abbildung 23 Sichern eines abgebundenen Ballens mit Spanngurten als Vorbereitung für die Messung im Plattengerät.....	38
Abbildung 24 Messungen an einem verputzten Probekörper im Holzrahmen: Probekörper im Holzrahmen in der Prüfmaske eingebaut mit Temperatursensorbelegung (links), Probekörper nach den Ausbau aus dem Holzrahmen (rechts).	39
Abbildung 25 Wandmessung am nicht verputzten Probekörper: Rechts Einbau mit Holzrahmen in die Prüfmaske, links oben: Befestigung der Wärmestrommessplatte mit gespannten Kunststoffbändern, links unten: Luftdichtes Abkleben der Oberflächen mit selbstklebendem Kreppband.....	40
Abbildung 26 Vorrichtung für die Trocknung der Probekörper für Messung im Plattengerät	40
Abbildung 27 Dickenbestimmung der Strohballenprobe zwischen zwei Holzwerkstoffplatten (links), Demonstration der Ebenheit der Schnittoberfläche mit Stahllineal (rechts)	41
Abbildung 28 Einbau in das Plattengerät: oben links: Probekörper mit Thermelementen auf unterer Kühlplatte liegend, oben rechts: Heizplatte mit Schutz-Randheizung, unten links: Einbau Gegenheizung für Einplattenverfahren, unten rechts: fertiger Einbau mit oberer Kühlplatte und Beschwerungsplatte	41
Abbildung 29 Konditionierung der Feuchte von Probekörper mit hygisch konditionierter Raumluft, Kasten mit luftdurchlässigem Boden und angeflanschem Ventilator	42
Abbildung 30 Feuchtemessung im Inneren eines zu prüfenden Probekörpers: links: Ahlborn-Datenlogger mit angesteckten Sensoren, rechts: Probekörper 4.1 mit installierten Sensoren...	43
Abbildung 31 Temperatur- und Feuchtemessung im unverputzten Ballen während der Wandmessung (Anfangsfeuchte auf 80% r.H. konditioniert).....	44
Abbildung 32 Messwerte der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte für die Ernte 2022	45
Abbildung 33 Lage vom Hof Herten in offener Landschaft bei der Ortschaft Haufeld (linkes Bild) und Standort des Demonstrators Schafstall Hof Herten, roter Pfeil (rechtes Bild). Quelle: Google Maps	47
Abbildung 34 Schafstall im Hof Herten, Grundrissplanung (rechts) und Rohbauzustand (links)	47
Abbildung 35 Schafstall Hof Herten im dritten Winter der Nutzung, Ansichten aus Richtung der Wetterseite West (oben links) und Ost (oben rechts), Detailansichten der Beplankung Westseite (unten links) und der inneren Verbretterung (unten rechts).....	50
Abbildung 36 Landgut Holzdorf mit Strohklassenzimmer (roter Pfeil). Quelle: Google Maps. ...	52

Abbildung 37 Strohklassenzimmer in Holzdorf: Grundriss und Querschnitt (Quelle: Z-Architektur).....	54
Abbildung 38 Luftdichtheitskonzept für Strohklassenzimmer	55
Abbildung 39 Luftdichte Anschlüsse von Bauteilen: gelbe Klebebänder zur Abdichtung der Fugen der OSB-Platte (oben), Anschluss Isover-Folie/Lehmputz mit gelochten, überputzbarem Klebeband Siga-Fentrim.....	56
Abbildung 40 Installation eines Luftfeuchte-/Temperatursensors: Einschlagen eines Kunststoffröhrchens mit einem Metaldorn in den Strohbällen	60
Abbildung 41 Kunststoffröhrchen und Stahlstab-Einschlaghilfe (oben), Kombisensor (Fa. Ahlborn) (unten).....	60
Abbildung 42 Feuchte- und Temperaturverläufe in zwei witterungsbelasteten Wandquerschnitten im Strohklassenzimmer Holzdorf	60
Abbildung 43 Anordnung der Messstellen für diskontinuierliche Strohfeuchtemessung mit Einstichsonde (Delmhorst) von außen (rechts) und von innen (links).....	62
Abbildung 44 Strohfeuchte in verschiedenen Tiefen an den witterungsbelasteten Messstellen der Holzverschalten Westseite sowie den anschließenden Eckbereichen mit Lehmputz, Quelle: MFPA	63
Abbildung 45 Messung der Strohfeuchte von der Raumseite aus in verschiedenen Tiefen	64
Abbildung 46 TDR-Sensoren, Blick vom Eingang nach links (linkes Bild) und Blick vom Eingang nach rechts (rechtes Bild).....	65
Abbildung 47 Sensorinstallation im Bereich der Gebäudeecke: TDR-2-Sensor auf Innenseite durchlaufend, Satsensor außen umlaufend um Gebäudeecke (15 cm nach innen versetzt).....	66
Abbildung 48 Verlegen der ersten Strohbälle auf die installierten TDR-Sensoren	67
Abbildung 49 Messungen mit TDR-Flachbandsensoren zur Feuchteüberwachung des Mauerwerksfußpunktes: Reflexionssignal TDR-1-Sensor (oben) und TDR-2-Sensor (unten)...	68
Abbildung 50 Außengelände der MFPA, Niedergrunstedter Weg 12, links: Lage des Strohturms - roter Pfeil, rechts Außengelände am süd-westlichen Weimarer Stadtrand (grüner Pfeil) Quelle: Google Maps.....	70
Abbildung 51 Planungszeichnungen Forschungsdemonstrator Strohturm: Längsschnitt (links) und Grundriss (rechts), Quelle: Z-Architektur	71
Abbildung 52 Forschungsdemonstrator „zweigeschossiger Strohturm“ im Bau (links) und im fertiggestellten Zustand (rechts), Quelle: Z-Architektur	73
Abbildung 53 Position der Referenzpunkte R1 bis R6 und der frei gewählten Tachymeterstandpunkte ST2 bis ST8 im Flurplan mit räumlichem Bezug zum Demonstratorbauwerk	74
Abbildung 54 Einmessen der Messpunkte mit Tachymeter (links) und Messpunkte am Ringbalken in der mittleren Ebene (rechts).....	75

Abbildung 55 Symbolische Darstellung der tachymetrischen Aufnahme der Messpunkte. Die Position der Messpunkte am Bauwerk ist im Gebäudequerschnitt schematisch dargestellt. Die Messmarken befinden sich an der Außenseite des Bauwerks.	75
Abbildung 56 Zeitlicher Verlauf der Setzungen der einzelnen Wände in der obersten Ebene gemeinsam mit dem Mittelwert der Wandsetzungen.	76
Abbildung 57 Digitales 3D-Gebäudemodell in einer Weboberfläche. Quelle: https://www.heritwin.de/	77
Abbildung 58 Konzept zur Ermittlung der von den Strohballenwänden abgetragenen Schubkräften: Schematische Darstellung mit einwirkender Schubkraft (blau) und Zugbeanspruchung der Aussteifungsdiagonalen (rot) (links); installiertes Messsystem mit instrumentierten Schrägstäben (Mitte); Dehnmessstreifen an den Aussteifungsdiagonalen (rechts).....	78
Abbildung 59 Feuchtemonitoring in Bauteilquerschnitten – schematische Darstellung der Sensoranordnung.....	79
Abbildung 60 Installierte Messtechnik am Forschungsdemonstrator: 3D-Ultraschall-Anemometer auf dem Gebäudedach (links); Messstelle zur Erfassung von Temperaturen und Luftfeuchtigkeit in einer der Strohballenwände im OG (Mitte und rechts).	80
Abbildung 61 Messwerterfassung im Forschungsdemonstrator: Windmonitoring und Dehnungen an den Gewindestäben des Aussteifungssystems (linker Monitor); Temperatur- und Feuchtemonitoring (rechter Monitor).....	80
Abbildung 62 Exemplarische Darstellung der Windrose einer Kurzzeitmessung während des Vorspannens der Diagonalen mit Darstellung der Verteilung der Windgeschwindigkeiten.....	81
Abbildung 63 Zeitverläufe der gemessenen Dehnungen an den Diagonalstäben in den vier Seiten des Gebäudes (Nord, Ost, Süd, West) während des Vorspannens der Diagonalen. Die zweite Himmelsrichtung bezeichnet die Seite des Aussteifungsstab im Kreuzverband auf der unteren Ebene.....	82

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Markierungen der mit vorgegebenem Pressdruck verdichteten Ballen und zugehörige Rohdichten	12
Tabelle 2 Wandmessungen an halbierten Quaderballen im trockenen und feuchten Zustand ..	43
Tabelle 3 Web-Links zu Video und Internetbeiträgen über Schafstall im Hof Herten	49
Tabelle 4 Web-Links zu Videos und Internetbeiträgen über das Strohklassenzimmer	58
Tabelle 5 Öffentlichkeitsarbeit während der Laufzeit des Projektes LaStrohBau.....	83

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
aBG	allgemeine Bauartgenehmigung
abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BMLEH	Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat
BUW	Bauhaus-Universität Weimar
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DVS	Deutsche Vernetzungsstelle Ländliche Räume für die gemeinsame Agrarpolitik der EU
FASBA	Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V.
INNOSTROH	Innovatives Bauen mit lasttragenden Strohballen, Forschungsgruppe der TAB
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MFPA	Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
OSB	Oriented Strand Board (Grobspanplatte aus flachen Holzspänen)
RENAT.BAU	interdisziplinäres wir!-Bündnis zum ressourcenschonendem Bauen (www.renatbau.de)
WPK	Werkseigene Produktionskontrolle
TAB	Thüringer Aufbaubank
TDR	Time Domain Reflectometry
TLLLR	Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum

13 Quellenverzeichnis

[BMLEH 2019]

BMLEH. (2019). *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung*.

<https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/Klimaschutz/Klimaschutzprogramm2030.html>

[Bonitz 2016]

Bonitz, F.; Kuhne, M.; Kühne, H.; Blüthgen, L.: Long term monitoring of roof constructions with spatial time domain reflectometry (STDR). In: Proc. 11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances – ISEMA 2016, Florence, May 23–27, 2016, pp. 383–389

[Braungart 2014]

Braungart, M., & McDonough, W. (2014). *Cradle to Cradle: Einfach intelligent produzieren*. Piper Verlag

[Daniel-Gromke 2018]

Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Stinner, W., Schmalfuß, T., Scheftelowitz, M., ... & Liebetrau, J. (2018). *Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany*. *Chemie Ingenieur Technik*, 90(1-2), 17-35.

[Gallegos 2018]

Gallegos, D., Wedwitschka, H., Moeller, L., Weinrich, S., Zehnsdorf, A., Nelles, M., & Stinner, W. (2018). *Mixed silage of Elodea and wheat straw as a substrate for energy production in anaerobic digestion plants*. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1), 7.

[Krick 2008]

Krick, B. (2008). *Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise*. kassel university press GmbH.

[MFPA 2017]

MFPA-Prüfbericht Nr. B12.17.097.01 vom 23.08.2017

[Molari 2017]

Molari, L., Maraldi, M., Molari, G. (2017). Non-linear rheological model of straw bales behavior under compressive loads. *Mechanics Research Communications*, 81, 32-37.

[Müller 2019]

B. Müller, F. Bonitz, Alexander Ulanov und Martin Schickert, Ortsauflösende TDR zur Überwachung von Verschlussbauwerken – 10 Jahre Monitoring, CMM 2019

[Schamer 2008]

Schamer, D. (2008). *Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise - Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance*, DBU-Projekt Az. 22430. Fachverband Strohballenbau e.V.

[Weiser 2011]

Weiser, C., Reinicke, F., Zeller, V., Vetter, A., Thrän, D., Wagner, B. (2011). Bestimmung des deutschlandweiten Getreidestrohpotenzials auf Landkreisebene unter Anwendung verschiedener Humusbilanzmethoden. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

DIN 4108-4: 2020-11

Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte

DIN EN 12390-13: 2021-09

Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2021

[WTA 6-5, 2014]

WTA Merkblatt 6-5-16/D Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Deutsche Fassung. Stand Oktober 2014

[WTA 6-8, 2016]

WTA Merkblatt 6-8-16/D Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation. Deutsche Fassung. Stand August 2016

14 Veröffentlichungen

[Taube 2021-1]

Taube, C., Hoppe, F., & Morgenthal, G. *Strohballen als lasttragender Baustoff–Aktueller Stand in Forschung und Baupraxis*. Bargstädt HJ, editor, 6.

[Taube 2021-2]

Taube, C., Timmler, H. G., Hoppe, F., & Morgenthal, G. (2021). *Experimentelle Untersuchungen zum horizontalen Lastabtrag in aussteifenden Strohballenwänden*. *Bautechnik*, 98(10), 745-757.

[Taube 2024]

Taube, C., & Morgenthal, G. (2024). *Experimental investigation of the biaxial load-bearing and deformation behaviour of wheat straw big bales for construction*. *Construction and Building Materials*, 433, 136630.

[Taube 2026]

Taube, C., & Morgenthal, G. (2026). *Modelling and Data-Driven Parameter Identification of a Material Law for Load-Bearing Straw Bales under vertical compression. IABSE Symposium 2026, Kopenhagen.*