

BBSR-
Online-Publikation
60/2024

Robotergestützte Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm

von

Prof. Harald Kloft
Joschua Gossler
Daniel Fernández-Barba



Robotergestützte Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.45

Projektlaufzeit: 04.2019 bis 02.2022

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Arnd Rose
arnd.rose@bbr.bund.de

Autoren

TU Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Prof. Harald Kloft (Projektleitung)
h.kloft@tu-braunschweig.de

Joschua Gossler, M. Sc.
j.gossler@tu-braunschweig.de

Daniel Fernández-Barba, M. Sc.
dani.fernandezbarba@gmail.com

Redaktion

TU Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf

Stand

Dezember 2022

Gestaltung

TU Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Joschua Gossler

Bildnachweis

Titelbild: Joschua Gossler
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 50

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Kloft, H.; Gossler, J.; Fernández-Barba, D., 2024: Robotergestützte Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm. BBSR-Online-Publikation 60/2024, Bonn. <https://doi.org/10.58007/n7c1-f114>

DOI 10.58007/n7c1-f114

ISSN 1868-0097

Bonn 2024

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Die heutige Relevanz des Lehmbaus in Deutschland	5
2.2	Der Stampflehm- und Strohlehm-Bau	6
2.3	Konzeption	6
3	Forschungsergebnisse	7
3.1	Auswahl der Lehmmischung	7
3.2	Entwicklung der Prozesskomponenten	8
3.2.1	Verdichtungsgerät	9
3.2.2	Gleitschalung und Stirnseitenschalung	14
3.2.3	Stirnseitenschalung	15
3.2.4	Materialbeschickung	16
3.2.5	Prozessversuche im 1:1 Bauteilmaßstab am DBFL	17
3.2.6	Weitere Prozessversuche im 1:1 Bauteilmaßstab	19
3.2.7	Oberflächenbeschaffenheit	20
3.3	Entwicklung von Prüfverfahren	21
3.3.1	Herstellen von Probekörpern	21
3.3.2	Anwendung subtraktiver Bearbeitungsmethoden	22
3.3.3	Versuchsreihen zur Feinabstimmung der Verdichtungsparameter	24
3.4	Implementierung des automatisierten Prozesses	29
3.4.1	Programmierung des Ablaufs	29
3.4.2	Ansteuerung der Aktorik	31
3.4.3	Benutzeroberfläche	32
3.5	CNC-gesteuerte, subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm-Elementen	34
3.5.1	Versuchsreihen zur subtraktiven, CNC-gesteuerten Nachbearbeitung am DBFL	34
3.5.2	Vermessung und Validierung	36
3.6	Robotische Stampflehm- und Strohlehm-Bau (Beitrag zum Zukunft Bau Pop-Up Campus 2022)	42
3.6.1	Voruntersuchungen zur Zerteilung wandartiger Elemente	42
3.6.2	Zerscheiden übergroßer Elemente in einzelne Segmente	43
3.6.3	Fügeprinzipien	44
3.7	Wirtschaftliche Aspekte	45
3.8	Öffentlichkeitsarbeit und Ergebnisverwertung	46
4	Literaturverzeichnis	48
5	Abbildungsverzeichnis	50
6	Tabellenverzeichnis	53
7	Mitwirkende	54

2 Einleitung

Die Relevanz des vorliegenden Forschungsprojekts ergibt sich aus der Kombination zweier hochaktueller und zukunftsweisender Themen: Der Digitalisierung der Bauwirtschaft, sowie der Verwendung von ökologisch vorteilhaften und vollständig recycelbaren Materialien. In der Kombination können digitale Prozesse bauwirtschaftlich wenig beachteten Materialien wie dem Lehm zu einer gesteigerten ökonomischen, sowie bautechnischen Leistungsfähigkeit und Attraktivität verhelfen.

Ein hoher Anteil des Ressourcen- und Energieverbrauchs in Deutschland ist dem Bausektor zuzuordnen [Sta2017]. Vor diesem Hintergrund wird der Ruf nach einem Umdenken immer lauter. Der Bund Deutscher Architekten (BDA) fordert bspw. in einem Diskussionspapier, den Fokus verstärkt auf einfaches Bauen und natürliche Materialien zu legen [Bun2019]. Das vorliegende Forschungsvorhaben zeigt, dass dies nicht im Widerspruch zur Verwendung innovativer digitaler Fabrikationstechnologien stehen muss. Durch robotergestützte Fertigungsprozesse können auch traditionelle und einfache Materialien wie Lehm zu neuer Leistungsfähigkeit und neuen Ausdrucksformen gebracht werden. In dem vorliegenden Bericht werden die Forschungsarbeiten an einem neuen, automatisierten Verfahren vorgestellt, mit dem Stampflehmteile robotergestützt in Vorproduktion gefertigt werden können. Neben den Vorteilen einer gesteigerten Qualität und neuen Gestaltungsmöglichkeiten ist dieses technologische Up-Scaling der Stampflehm-Bauweise auch in wirtschaftlicher Hinsicht attraktiv.

2.1 Die heutige Relevanz des Lehmbaus in Deutschland

Lehm gehört zu den ursprünglichen Baustoffen und ist in Kulturen weltweit in unterschiedlichen Bauweisen vertreten. Stampflehmwände sind als Massivbauweise geeignet, Lasten abzutragen, daher kann auf Stützkonstruktionen weitestgehend verzichtet werden. Ihr Ursprung wird im antiken China vor ca. 3 500–4 000 Jahren vermutet [Jaq2008]. Die Herstellung von Stampflehmwänden erfolgt traditionell manuell in einer steifen Schalung aus Holz: Erdfeuchter Lehm wird in Lagen in der Schalung verteilt und durch manuelle Druckstöße gleichmäßig verdichtet.

Während die Stampflehm-Bauweise hierzulande in Folge der Industrialisierung und der Entwicklung moderner Baustoffe unbedeutend wurde, ist sie in anderen Teilen der Welt sehr präsent. In den vergangenen Jahren sind es aus heutiger Sicht vor allem die ökologischen Vorteile des Materials, die Stampflehm auch bei uns wieder interessant machen. Ausschlaggebend sind vor allem der geringe Primärenergiebedarf [Web2017], die weltweite Verfügbarkeit in großen Mengen [Dan2018], sowie die vollständige Recyclbarkeit [Min2013]. Zu den ökologischen Argumenten kommt hinzu, dass sich Lehm positiv auf das Raumklima auswirkt [Min2013]. Der Baustoffbedarf der vergangenen Jahre wird im Wesentlichen durch die industriell erzeugten Werkstoffe Beton und Stahl gedeckt. Gerade am Beispiel von Beton werden die ökologischen Auswirkungen des hohen Baustoffbedarfs deutlich sichtbar. Allein das Brennen von Zement hat einen Anteil von 7 % an der weltweiten, künstlichen CO₂-Emission [Pie1997]. Der benötigte Sand ist nach Wasser die meist verbrauchte Ressource der Welt [Ped2014]. Dass zudem 52 % des Gesamtabfallaufkommens in Deutschland durch Bau- und Abbruchabfälle zustande kommen [Sta2017], hängt mit dem hohen Aufwand beim Recyclen von Baumaterialien wie Beton zusammen. In der Konsequenz steigen im Bauwesen sowohl der Bedarf an immer neuen Ressourcen als auch das Aufkommen von Bauschutt.

Trotz viel beachteter Projekte in Stampflehm-Bauweise in jüngster Zeit, wie dem 2008 erbauten Wohnhaus Rauch in Schlins von Roger Boltshauser und Martin Rauch, ist der Anteil an Lehm-Bauten hierzulande nach wie vor verschwindend gering. Entgegen aller ökologischen Vorteile bestimmen in der Bauwirtschaft – wie auch in anderen Wirtschaftsbereichen – die ökonomischen Faktoren den Wettbewerb. Die Vorbereitung des Materials, die Konstruktion der steifen Schalung und das händische

Stampfen bilden ein zwar technologisch einfaches-, durch den manuellen Prozess aber extrem zeitaufwendiges, kräftezehrendes und damit unwirtschaftliches Herstellungsverfahren. Obwohl das Rohmaterial sehr günstig ist, sind die Produktionskosten in Summe deutlich höher als bei anderen Massivbauweisen wie dem Mauerwerks- oder Betonbau. Innovationen finden beim Lehmbau deswegen nur sehr langsam statt. Entsprechend hinken auch die Entwicklungen bei den Normen hinterher. Eine Wiederaufnahme des Lehmbaus in die Normen erfolgte zwar 2013, speziell der Bereich des Stampflehms ist normativ aber noch immer nicht einheitlich geregelt, sodass für jedes Bauvorhaben eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden muss und die Wirtschaftlichkeit der Lehmbauweise stagniert.

2.2 Der Stampflehmbau

Die ursprünglich händisch geführten Stampfer wurden in den vergangenen Jahren in Folge des technischen Fortschritts durch pneumatische Stampfer ersetzt. Diese werden jedoch weiterhin von Hand geführt. Dadurch verringert sich zwar der Kraftaufwand erheblich, der Zeitaufwand aber nur unwesentlich. Neben dem händisch geführten Stampfer beruht die traditionelle Stampflehmtechnik auf einer Kletterschalung. Da die Stabilität des Stampflehms nicht, wie bei Beton, auf eine chemische Reaktion zurückzuführen ist, sondern allein durch die Verdichtung des Materials erreicht wird, ist keine Abbindezeit erforderlich. Die Schalung kann unmittelbar entfernt werden. Die übliche Kletterschalung stammt aus der französischen Pisé-de-Terre-Bauweise. Verwendet werden Paneele, die über das Bauteil durchdringende Bolzen zusammengehalten werden. Hauptsächlich zur Reduzierung der Umbauzeiten wurde dieses System mehrfach um- und weiterentwickelt, sodass mittlerweile eine Vielzahl an Varianten existiert [Man2003].

Die Entwicklung großformatiger Schalungen ermöglicht in einigen Fällen eine Beschleunigung der Produktion. Durch geschosshohe Schalungsabschnitte, das Einbringen hoher Lagen mit Baggern sowie das Verdichten mit schweren Maschinen kann der Arbeitsaufwand verringert werden [Min2013]. Die Wirtschaftlichkeit dieser Schalungstechnik hängt allerdings stark von der Gebäudegröße ab.

2.3 Konzeption

Das Forschungsprojekt basiert auf einer studentischen Vorarbeit. Im Forschungsseminar „Digital Fabrication Studio (DBFS) – Earth Construction“ wurde mit der Arbeit „Sliding Earth Tamper – Robotic Slipform and Pneumatic Tamper“ von Joshua Gossler die Idee einer robotisch geführten Gleitschalung für die Herstellung von Stampflehm entwickelt (Abbildung 1).

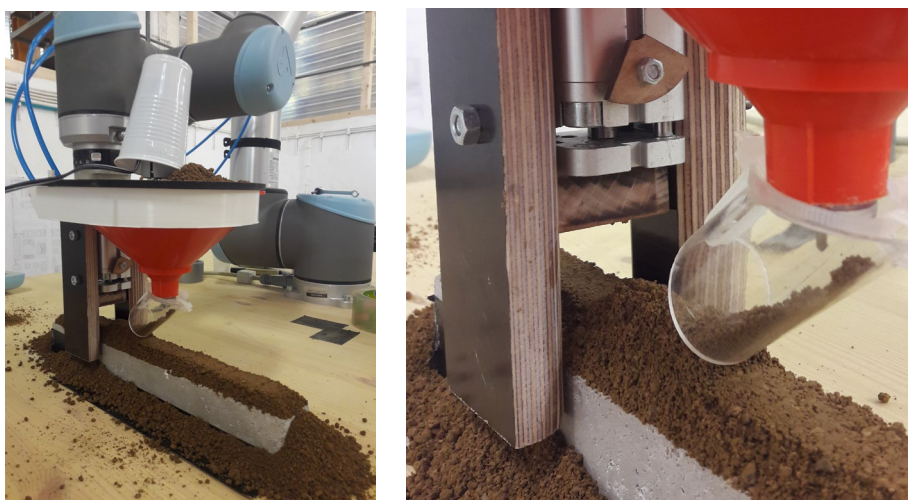


Abbildung 1: Kleinmaßstäbliche Voruntersuchungen zur robotischen Fertigung von Stampflehmteilen mittels aktiv geführter Gleitschalung und pneumatischer Verdichtung

In dieser Arbeit wurden mithilfe eines pneumatischen Zylinders kleinmaßstäbliche Versuche zur automatisierten Fertigung und Verdichtung von Stampflehm durchgeführt. Der Materialfluss wurde mit Hilfe eines Elektromotors gesteuert und über ein mitgeführtes Materialdepot in Form eines Trichters kontinuierlich zugeführt.

Um das Potenzial der robotergeführten Stampflehmbauweise zu untersuchen, wird in dem vorliegenden Forschungsvorhaben das Konzept des gleichzeitig ausgeführten Schalens und Verdichtens durch einen digital gesteuerten Roboterarm systematisch für die großmaßstäbliche 1:1 Herstellung von Stampflehmteilen weiterentwickelt.

Im Wesentlichen unterscheidet sich das Verfahren von den handwerklichen Methoden in drei Punkten:

1. Die Gleichzeitigkeit der Prozesse Schalen und Verdichten:
Während bei der traditionellen Stampflehmbauweise die Schalung vorab gestellt wird und das Befüllen und Verdichten nachläuft, erfolgt bei der vorliegenden Methode das Schalen, Befüllen und Verdichten in einem kontinuierlichen Prozess. Dies spart Ressourcen in Form von nicht benötigtem Schalungsmaterial, Bauzeit durch den Entfall des Umbauens der Kletterschalung und schlussendlich Baukosten.
2. Die robotergestützte Automatisierung erlaubt es, die Effizienz des Prozesses nicht in der Vergrößerung der Schalungsteile zu suchen, sondern in der präzisierten Prozesssteuerung. Insbesondere die Erhöhung der Frequenz der Wiederholungen des Verdichtungsprozesses ermöglicht die Reduzierung der im Stampflehmbau üblichen Lagenhöhen, wodurch sich auch die Verdichtungsenergie entsprechend verringert, was wiederum die Schalung entlastet. So kann der Herstellungsprozess optimiert werden. Neben der Optimierung der Steifigkeit ist auch die Reibung zwischen Schalung und Bauteil bei einer kleineren Schalungseinheit mit reduzierter Verdichtungsenergie deutlich geringer. In einem automatisierten Verfahren können die Parameter Schalungsdimension, Lagenhöhe und Verdichtungsenergie präzise aufeinander abgestimmt werden.
3. Durch den automatisierten robotischen Fertigungsprozess ist eine gleichbleibende Qualität sichergestellt, die sich auch auf die Materialkennwerte, insbesondere in der Druckfestigkeit auswirken kann. Die zu erwartenden geringeren Streuungen können die Zulassung höherer Festigkeiten für die Bemessung von Stampflehmteilen zur langfristigen Folge haben.

3 Forschungsergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die im Zuge des Forschungsvorhabens durchgeführten Forschungsarbeiten und Ergebnisse beschrieben und erläutert.

3.1 Auswahl der Lehmischung

Natürlicher Stampflehm besteht aus Kies, Sand, Schluff und Ton in veränderlichen Proportionen. Idealerweise sollte die Lehm-Mischung einen hohen Kies- und Sandanteil, weniger Schluff und nur so viel Ton enthalten, dass dieser als Binder wirkt und das Verdichten des Materials fördert [Kea1996].

In den Lehmbauregeln [Vol2009] werden folgende Kriterien für die rohe Stampflehm-Mischung gefordert:

„Zur Herstellung von Stampflehm können magere bis fette Baulehme verwendet werden [...] Besonders geeignet ist von Natur aus gemischtkörniger bis steiniger Lehm (z. B. Berg- oder Gehängelehm). [...] Eine Aufbereitung mit Zuschlägen ist notwendig, wenn der Baulehm ein zu hohes Schwindmaß hat und deshalb nicht unmittelbar als Baustoff verwendet werden kann oder um die Druck- und ggf. Wetterfestigkeit zu erhöhen. Mineralische Zuschläge sind Grobsand, Kies oder Splitt. Gebrochene Körnungen sind besonders geeignet. Auf eine weitgestufte Kornverteilung ist zu achten.“

Grubenlehm (Aushubmaterial) ist kostengünstig in der Beschaffung, notwendige Analysen zur Materialbestimmung sind jedoch aufwendig und die Materialzusammensetzung ist nur mit geeigneter Maschinerie reproduzierbar, weshalb ein Rückgriff auf industriell hergestellte Fertigmischungen entschieden wird. Um die Materialeigenschaften des robotisch gefertigten Stampflehms mit den in der Praxis gängigen Stampflehm-Mischungen vergleichen zu können, wird die Fertigmischung eines Lehmbaustoffherstellers eingesetzt. Weil das Material unter industriellen Standards gemischt und aufbereitet wird, kann so eine konstante Qualität und Zusammensetzung gewährleistet werden.

Die ausgewählte Stampflehmmischung wird erdfeucht in Big Bags geliefert. Die verschiedenen Mischungen unterscheiden sich grundsätzlich in der Größe des zugefügten Größtkorns, werkseitig angeboten wird ein feiner und ein grober Stampflehm (Korngröße 0-8 mm, bzw. 0-22 mm).

Bezüglich der Materialkennwerte des Rohmaterials werden vom Hersteller folgende Angaben gemacht (Tabelle 1), die im Einklang mit den von den Lehmbauregeln geforderten Kriterien [Vol2009] stehen.

Kennzahlen	Stampflehm grob	Stampflehm fein
Korngruppe, Überkorngröße	0/22, < 30 mm	0/8, < 22 mm
Rohdichte (trocken)	2200 kg/m ³	2200 kg/m ³
Baustoffklasse	A1	A1
Wärmeleitfähigkeit	1,40 W/mK	1,40 W/mK
Trocknungsschwindmaß	< 0,5 %	< 0,5 %
Wasserdampfdiffusionswiderstand	$\mu = 5/10$	$\mu = 5/10$

Tabelle 1: Materialkennwerte des Rohmaterials

3.2 Entwicklung der Prozesskomponenten

Die Übertragung des Prozesses von den Vorversuchen im Maßstab 1:20 in den Maßstab 1:1 verlangt eine Neubetrachtung der einzelnen Komponenten. Insbesondere das Verdichtungswerkzeug muss angepasst und auf seine Skalierbarkeit in den Realmaßstab überprüft werden.

Die Geräte zur Verdichtung und Schalung des Stampflehms werden in einem fortlaufenden Optimierungsprozess schrittweise konstruiert, um Entscheidungen anhand von physischen Versuchen überprüfen - und gegebenenfalls anzupassen zu können.

3.2.1 Verdichtungsgerät

Im Stampflehm-Bau gibt es eine Vielzahl an Verdichtungsmethoden. Grundsätzlich kann zwischen der manuellen-, der pneumatischen- und der elektrischen Verdichtung unterschieden werden. Im klassischen Verfahren wurden Holz- oder Stahlstampfer mit einem Gewicht zwischen 5 kg – 10 kg in einem arbeitsintensiven, händischen Prozess verwendet. Trotzdem manuelle Verdichtungsmethoden in Europa größtenteils ersetzt wurden, werden manuelle Stampfer noch immer für schwierig zu erreichende Bereiche, wie abgerundete Flächen oder Ecken eingesetzt [Man2003]. Das Verdichten mittels pneumatischer Stampfer kann die Zeit, die für das Verdichten des Materials aufgewendet werden muss halbieren [Mid1987], weshalb pneumatische Stampfer heutzutage manuelle Stampfer größtenteils ersetzt haben. Eingesetzte pneumatische Stampfer haben typischerweise einen runden Fuß mit einem Durchmesser von 70 mm – 150 mm.

Ein weiteres Konzept zur Verdichtung von Stampflehm ist die mittels elektrischer Energie angetriebene Rüttelplatte. Das Forschungslabor für experimentelles Bauen (FEB) an der Universität Kassel [Min2013] entwickelte eine elektrische Rüttelplatte, welche durch einen Unwuchtmotor in gerichtete Schwingung versetzt wird und somit ohne weiteren Antrieb gesteuert werden kann. Das Prinzip, Stampflehm mittels Vibration zu verdichten wurde auch beim Bau der Kapelle der Versöhnung in Berlin angewendet. Hier wurde eine sog. Schafffuß-Walze verwendet.

3.2.1.1 Definieren der Verdichtungsmethode

Die Trockendruckfestigkeit ist ein wesentliches Kriterium der Beurteilung lasttragender Stampflehm-Elemente. Diese steigt mit zunehmender Dichte, während die Schwindneigung des Materials sinkt (Sch2012). Die Lehmischung wird also verdichtet, um den Luftporenanteil im Material soweit wie möglich zu reduzieren und so die Materialdichte zu erhöhen.

Die Verdichtungsfläche von üblicherweise genutzten pneumatischen Stampfern beträgt bis zu 15 cm im Durchmesser. Im Maßstab 1:20 ist die Stärke des Bauteils ausreichend gering, um von nur einem Stampfer verdichtet zu werden. Pneumatische Stampfer verdichten tendenziell aber kleine Flächen mit vergleichsweise geringer Verdichtungsenergie. Eine Skalierung der Verdichtungsmethode in den Maßstab 1:1 würde deshalb nicht zu einer Skalierung der Verdichtungsfläche auf die Bauteilbreite im Realmaßstab führen, sondern zu einer Quantifizierung der Stampfer-Anzahl, da die zu verdichtende Fläche zu groß wäre, um sie mit einem einzigen Stampfer zu verdichten. Deshalb wird als notwendig erachtet, das Verdichtungskonzept neu zu bestimmen. Dabei ist ein zu beachtender Faktor die Vibrationsentkopplung des Verdichtungsgeräts vom Roboterarm. Auftretende Vibrationen können von den starren Gelenken nicht aufgenommen werden und stellen deshalb eine hohe Belastung dar. Da maximal zulässige Vibrationen vom Hersteller nicht präzise quantifiziert werden können, gilt es, das Verdichtungsgerät und den Roboterarm bestmöglich zu entkoppeln.

Tabelle 2 zeigt die Vor- und Nachteile der pneumatischen-, sowie der elektrisch angetriebenen Verdichtung.

Pneumatischer Stampfer

Vorteile	Nachteile
Geometrische Flexibilität (einfache Krümmung des Bauteils bei flexibler Schalung möglich)	Hoher Vibrationspegel
Geringes Gewicht (<20kg)	Eigenständiges Fortbewegen (Entkopplung) aufwendig
	Kleine Verdichtungsfläche, mehrere Stampfer nötig

Rüttelplatte

Vorteile	Nachteile
Eigenständiges Fortbewegen (Entkopplung) in Verbindung mit Frequenzumformer möglich	Eingeschränkte geometrische Flexibilität
Geringer Vibrationspegel	Hohes Gewicht (~40kg)
Große Verdichtungsfläche	

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Verwendung von pneumatischen Stampfern sowie einer Rüttelplatte für die Verdichtung von Stampflehm in Kombination mit einer Gleitschalung

Ein Vorteil der Verwendung pneumatischer Stampfer liegt im höheren Maß geometrischer Flexibilität: Durch die insgesamt kleinere Verdichtungsfläche, ist eine Aktivierung der Schalung und dadurch die Fabrikation einfach gekrümmter Bauteile denkbar. Hinzu kommt das vergleichsweise geringe Gewicht. Dem gegenüber stehen die Nachteile, wie einem hohen Vibrationspegel, der notwendigen Führung der Stampfer und der kleinen Verdichtungsfläche, wodurch eine Kombination mehrerer Geräte nötig wäre.

Die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit einer Rüttelplatte kann durch die Verwendung eines Frequenzumrichters gesteuert werden. In Kombination mit dem vergleichsweise geringen Hub des Vibrierens im Vergleich zum Stampfen, scheint eine Entkopplung vom Roboterkopf leichter zu erreichen. Der Nachteil der eingeschränkten geometrischen Flexibilität ist zunächst nicht ausschlaggebend, da der Fokus auf quaderförmigen Bauteilen liegt.

Im Vergleich der beiden Verdichtungsmethoden wird das Verdichten mittels Rüttelplatte, insbesondere wegen der Möglichkeit der vom Roboter unabhängigen, steuerbaren Fahrtrichtung und der damit einhergehenden Vibrationsentlastung desselben favorisiert. Die vom Roboter geführte Gleitschalung wird in diesem Szenario lediglich dort angesetzt, wo sich das selbstständig fortbewegende Verdichtungsgerät jeweils befindet. Um eine ausreichende Verdichtung der Bauteiloberflächen zu gewährleisten, ist der gezielte Einsatz pneumatischer Stampfer an den Längsseiten in Kombination mit der primären Verdichtung mittels Rüttelplatte notwendig.

3.2.1.2 Entwicklung des Verdichtungswerkzeugs

Aufgrund der in Kapitel 3.2.1.1 beschriebenen Prozessvorteile wird ein aktiv gesteuertes Verdichtungssystem bestehend aus einer Rüttelplatte und pneumatischen Randverdichtern entwickelt. Die in dem vorliegenden Kapitel beschriebenen Ergebnisse beruhen auf einem mehrstufigen Entwicklungsprozess, in welchem verschiedene Varianten eines Verdichtungswerkzeuges entwickelt und zur Anwendung optimiert wurden.

Grundlage der Konstruktion des Verdichtungswerkzeuges stellt die von Prof. Gernot Minke am Forschungslabor für experimentelles Bauen (FEB) an der Universität Kassel entwickelte Rüttelplatte zur Verdichtung von Stampflehm [Min2000] dar (Abbildung 2). Der dort benutzte Unwuchtmotor hat eine Frequenz von 1000 bis 1200 U/min (16 – 20 Hz) und einen speziell geformten Stahlschlitten als Basis, welcher ein selbständiges Fortbewegen der Rüttelplatte gewährleistet [Min2013].



Abbildung 2: Elektronische Rüttelplatte, entwickelt am FEB der Universität Kassel [Min2013]

3.2.1.2.1 Konstruktion des Verdichtungswerkzeuges

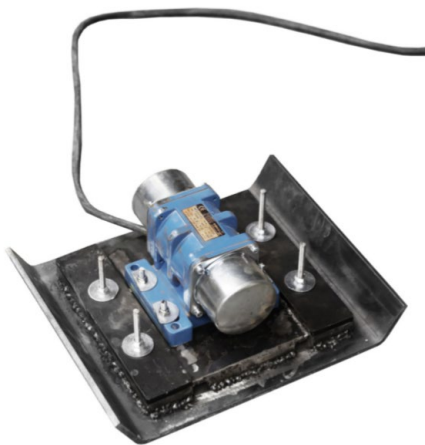


Abbildung 3: Verdichtungsgerät 1 mit Unwuchtmotor Eviro A10-5.4-2 und veränderlichen Gewichten



Abbildung 4: Verdichtungsgerät 2 mit Unwuchtmotor Eviro A30-18,2-2 und pneumatischen Randverdichtern

Für das Verdichtungsgerät 1 wird ein Unwucht-Motor der Firma Eviro (Typ A10-5,4-2) mit einem maximalen Arbeitsmoment von 5,4 kgcm, einer maximalen Fliehkraft von 2,67 kN und einer Netznennfrequenz von 50 Hz eingesetzt. Dieser wird zusammen mit anpassbaren Stahlgewichten mit einer abgekanteten Stahlplatte verschraubt (

Abbildung 3). In einer Testreihe werden die Verdichtungseigenschaften des Verdichtungsgeräts evaluiert. Dabei werden die Erkenntnisse tabellarisch dokumentiert (Tabelle 3). Insbesondere die zu geringe Motorleistung des Unwuchtmotors und die suboptimale Geometrie des Stahlschlittens veranlassen den Austausch der erwähnten Komponenten.

Nr.	Beobachtung	Ursache	Lösungsansatz
1	Rüttelplatte schiebt unverdichteten Lehm vor sich her	Der verwendete Unwucht Motor hat nicht genügend Hub	Verwendung eines leistungstärkeren Motors
2	Die Rüttelplatte erreicht die Ecken aufgehender Schalungen (Stirnseiten) nicht	Rundung des Stahlschlittens in Kombination mit starrer Stirnseitenschalung	Neues, in der Höhe flexibles Schalsystem für die Stirnseiten
3	„Abbröckeln“ der längsseitigen Oberfläche bei steigender Bauteilhöhe	Die längsseitigen Außenseiten des Bauteils werden nicht ausreichend verdichtet	Einsatz pneumatischer Stampfer als Randverdichter
4	Hohe Vibrationsübertragung auf den Roboter	Rüttelplatte wird von der starr an den Roboter montierten Schalung gezogen	Vibrationsentkopplung in der Roboter-Aufnahme- installieren. Außerdem wirkt sich die Integration eines Frequenzumformers durch eigenständiges Fortbewegen der Rüttelplatte positiv auf die Vibrationsübertragung aus

Tabelle 3: Evaluation Verdichtungseigenschaften des Verdichtungsgerät 1

Auf Grundlage der in Tabelle 3 erfassten Erkenntnisse wird das Verdichtungsgerät 2 mit optimierter Stahlplattengeometrie und stärkerem Unwuchtmotor mit einer Fliehkraft von 8,88 kN (Tabelle 4) geplant und ausgeführt (Abbildung 4). Zusätzlich werden pneumatische Stampfer (Mannesmann Demag S 2000) für die Verdichtung der Bauteiloberflächen integriert. In Zusammenarbeit mit einer Firma für Druckluft-Maschinen wird die Integration eines im Vergleich zu handgeführten, kleineren pneumatischen Stampfers entwickelt. Dadurch werden die Vorteile der steuerbaren Bewegung und der gleichmäßigen Verdichtungsfläche der Rüttelplatte mit dem Vorteil der gezielten Verdichtung pneumatischer Stampfer im Randbereich kombiniert. Durch die Montage der Stampfer an der vom Roboter weitestgehend entkoppelten Rüttelplatte werden auftretende höhere Vibrationen über die Rüttelplatte auf das Bauteil abgeleitet und wirken nicht im Roboterarm.

Technische Daten	Eviro A10-5,4-2	Eviro A30-18.2-2
Arbeitsmoment, max. [kgcm]	5,4	18
Fliehkraft, max. [kN]	2,67	8,88
Netznennfrequenz [Hz]	50	50

Tabelle 4: Technische Daten der verwendeten Unwucht-Motoren

Zusätzlich zu den Anpassungen am Verdichtungsgerät selbst wird durch die Integration eines steuerbaren Frequenzumrichters (FU) die digitale Steuerung des Verdichtungsgeräts ermöglicht. Der FU ermöglicht die digitale Steuerung der Frequenz des Unwuchtmotors (0 Hz – 50 Hz), die Drehrichtung, sowie die Integration einer Anlaufverzögerung (Beschleunigung und Entschleunigung).

In Kapitel 3.3.3 wird das Vorgehen der Feinabstimmung der einzelnen Verdichtungskomponenten beschrieben. Kapitel 3.4.2 beschreibt die digitale Ansteuerung der Aktorik.

Im Verdichtungsbild ist der Effekt der Randverdichtung erkennbar (Abbildung 5): Das Material in der Bauteilmitte erfährt die Hauptverdichtung über die flächig aufliegende Rüttelplatte, die Ränder werden mittels der pneumatischen Stampfer nachverdichtet, sodass die Bauteiloberflächen eine höhere Dichte aufweisen.

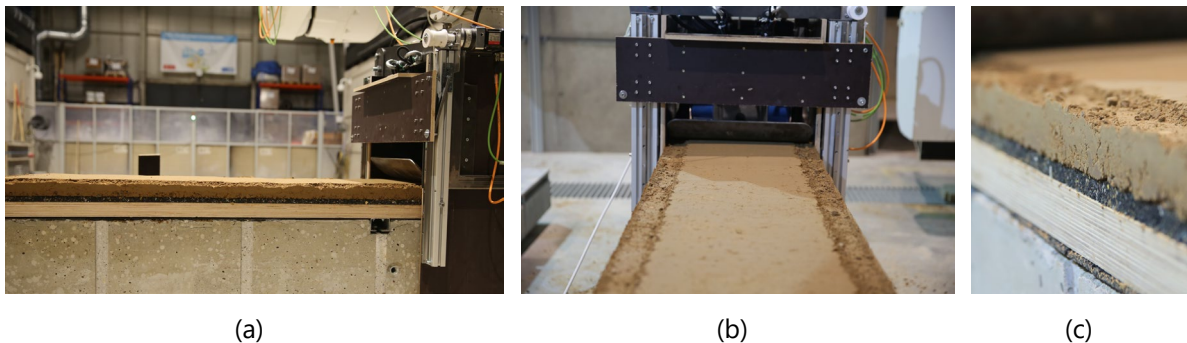


Abbildung 5: Verdichtungsbild des Stampflehms. (a) Seitenansicht von drei verdichteten Lagen; (b) Oberflächiges Verdichtungsbild; (c) Close-Up des seitlichen Verdichtungsbilds

3.2.2 Gleitschalung und Stirnseitenschalung

Die Konstruktion der Gleitschalung wurde in mehreren Schritten durchgeführt. Im Folgenden werden die grundlegenden Entwicklungsstufen beschrieben.

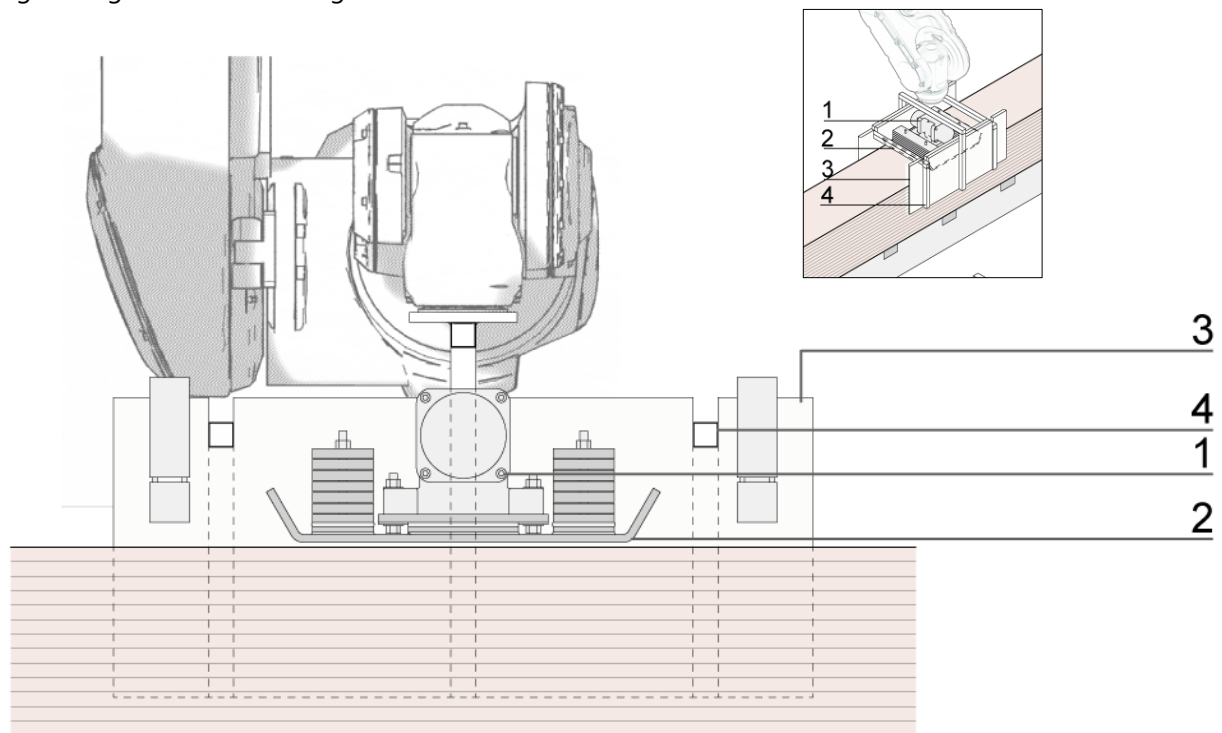


Abbildung 6: Seitenansicht der Gleitschalung und Verdichtungsgerät

Der erste Prototyp der Gleitschalung besteht aus einem Stahlgestell aus verschweißten Vierkantrohren (Abbildung 6, (4)), welche über einen Flansch mit dem Roboterarm verbunden sind. Das Stahlgestell hält die beiden Gleitschalungsbretter aus phenolharzbeschichteten Multiplexplatten (Siebdruckplatte) (3). Durch die steife Verbindung zwischen Gleitschalung und Roboter, kann die Schalung präzise durch den Roboterarm bewegt werden. Das Verdichtungsgerät (1,2), welches auf der Bauteiloberfläche aufliegt, wird über Spanngurte in die jeweilige Richtung mitgezogen.

In den ersten Prozesstests wurde festgestellt, dass die Gleitschalung für etwaige Zwischenfälle die ein An- bzw. Abfahren der Schalungseinheit vom Bauteil erfordern zu öffnen sein sollte, sodass die Bauteiloberfläche beim Anfahren nicht beschädigt wird. Zusätzlich muss die Torsionssteifigkeit des Stahlgestells verbessert werden. Um die auftretenden Vibrationen nicht über das Schalungsgestell in die Gelenke des Roboters einzuleiten, soll hier eine Vibrationsentkopplung integriert werden. Die statische Stirnseitenschalung kann im Versuch nicht bis zuletzt angefahren werden, sodass durch den abgekanteten Stahlschlitten des Verdichtungsgeräts an den Bauteilstirnseiten ein 4 cm breiter, unverdichteter Bereich zurückbleibt.

Die Gleitschalung wurde mehrfach weiterentwickelt und optimiert. Das neu konstruierte Gestell ist durch das Lösen zweier Schrauben zu öffnen. Dies ermöglicht das Ab- und Anfahren vom bzw. zum Bauteil, ohne dass die Lehmoberfläche beschädigt wird. Zusätzlich wird die torsionsbelastete Mittelstange, welche einen Schwachpunkt in der vorherigen Konstruktion darstellt, durch eine verstärkte Stahlplatte ersetzt.

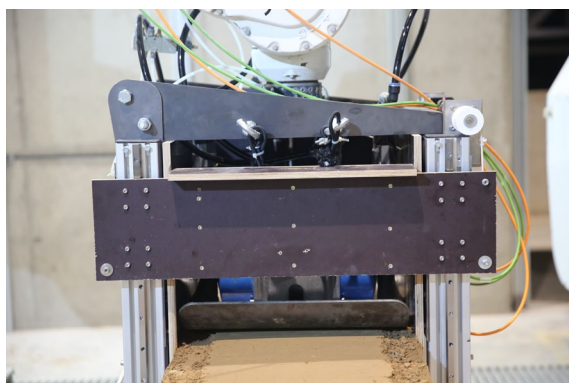
Um den Roboter von den Vibrationen der Rüttelplatte zu entkoppeln, wurden Schwingungsdämpfer als Verbindung zwischen Roboter und Gleitschalung eingesetzt. Zudem verbessert das nun mögliche selbstständige Fortbewegen der Rüttelplatte durch die Integration eines Frequenzumformers in das Verdichtungssystem die Vibrationsentkopplung.



Abbildung 7: Gleitschalung mit zu öffnender Schalungsseite und integrierter Stirnseitenschalung

3.2.3 Stirnseitenschalung

Für das Schalen der Stirnseiten (Bauteilenden) wurden zwei Konzepte entwickelt und in der Anwendung getestet (Abbildung 8). Eine Möglichkeit ist das Schalen der Stirnseiten mittels integrierter, aktiver Schalungseinheiten, welche digital angesteuert werden und so keinen weiteren äußeren Schalungsaufbau benötigen (Abbildung 8a, Abbildung 9). Eine andere Möglichkeit ist das Schalen der Stirnseiten mittels statisch montierter Schalungsbretter (Abbildung 8b).



(a)



(b)

Abbildung 8: Zwei Konzepte für das Schalen der Bauteil-Stirnseiten. (a) Aktive, integrierte Stirnseitenschalung; (b) Statisch montierte Stirnseitenschalung



Abbildung 9: Aktive Stirnseitenschalung. Die Schalungstore können aktiv in Z-Richtung (+/-) bewegt werden und erlauben so das Schalen der Stirnseiten am Bauteilende

3.2.4 Materialbeschickung

Für flexible Abläufe wird die Trennung der Prozesse Verdichten/Schalen und Beschicken angestrebt, so kann die Materialbeschickung unabhängig vom Verdichtungsprozess stattfinden. Unabhängig vom 6-Achs Roboter wird dafür am DBFL ein zweites Portal genutzt. Vorteil des 5-achsigen CNC-Portals ist die Möglichkeit, den Materialfluss durch Schwenken des Materialkorbs (Abbildung 10) zu aktivieren, so kann ohne die Integration weiterer Steuertechnik Rohmaterial präzise zugeführt werden (Abbildung 11). Die Ansteuerung der Beschickung in Kombination mit dem Verdichtungsprozess ist in Kapitel 3.4 beschrieben.

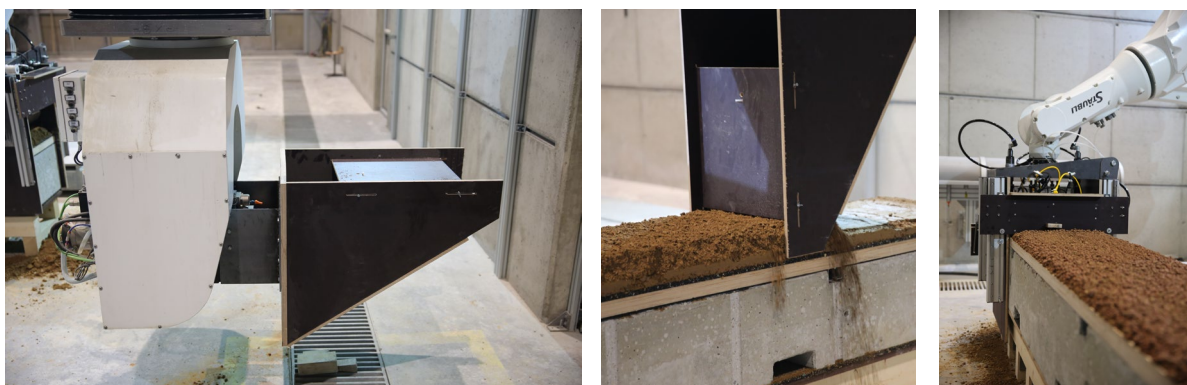


Abbildung 10: Materialkorb zur CNC-gesteuerten Beschickung. (a) Materialkorb in Warteposition; (b) Materialkorb während Beschickung; (c) Eine beschickte Lage vor dem Verdichtungsprozess

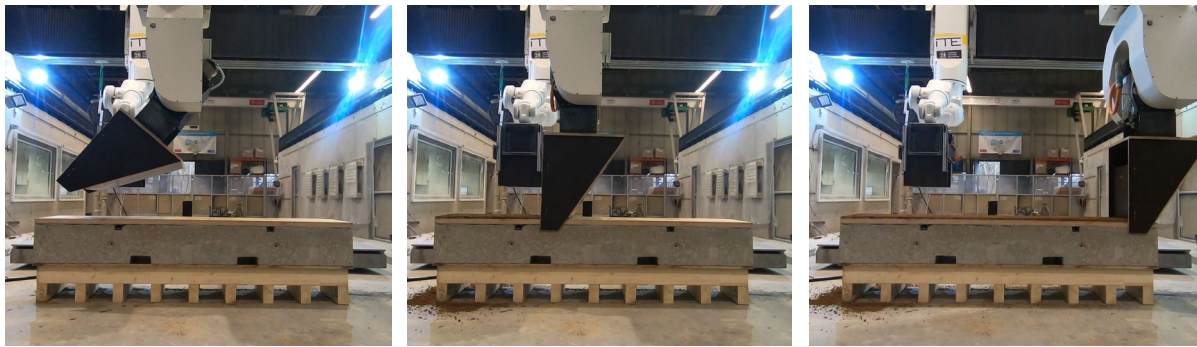


Abbildung 11: Beschickung einer Lage: Passiver Materialkorb an aktivem CNC-Portal

3.2.5 Prozessversuche im 1:1 Bauteilmaßstab am DBFL

Im 1:1 Versuch wurde die erste Konstruktion der Werkzeuge überprüft. Das Ziel dabei war die Erstellung eines Bauteils mit den Abmaßen $0,80 \times 0,34 \times 2,50$ m (h x b x l). Der Fokus lag auf der Prüfung des Verdichtungs- und Schalungsprozesses, weshalb die Materialzufuhr zunächst händisch ausgeführt wurde.

Das fertiggestellte Bauteil (Abbildung 13) hat eine Masse von 1,4 t bei einer Dichte von $2\,060 \text{ kg/m}^3$. Die Bandbreite der üblichen Dichten bewegt sich bei Werten von $1\,700 \text{ kg/m}^3$ – $2\,200 \text{ kg/m}^3$ [Vol2009]. Die robotisch erstellte Lehmwand besteht aus 58 Lagen mit einer durchschnittlichen Schichthöhe von 1,4 cm. Die visuelle Beschaffenheit der Wand unterscheidet sich daher deutlich von Stampflehmteilen in traditionell manueller Bauweise, die eine Schichthöhe von 5 – 10 cm aufweisen.



Abbildung 12: Fertigungsprozess im Bauteilversuch



Abbildung 13: Bauteilversuch im 1:1 Bauteilmaßstab

Bei dem Prozess konnten, Unterbrechungen herausgerechnet, in einer Stunde ca. 15 cm an Bauteilhöhe hergestellt werden. Das entspricht einer Fertigungsgeschwindigkeit von 8 h/m^3 im Vergleich zur Fertigungsgeschwindigkeit von 20 – 30 h/m^3 bei der manuellen Stampflehmabauweise [Min2013].

3.2.5.1 Erkenntnisse

Wie zuvor beschrieben, wurden einzelne Komponenten aufgrund von Prozesstests im 1:1 Bauteilmaßstab evaluiert und angepasst. Im Folgenden sind einzelne Erkenntnisse aus dem ersten Bauteilversuch zusammengefasst.

Der Versuch zeigt Schwachstellen des Prozesses auf, welche durch die Anpassung verwendeter Komponenten optimiert werden können. Für die Erstellung des Bauteils sind wiederholt händische Eingriffe, primär für eine hinreichende Verdichtung der Stirn- und Längsseiten und die Materialzufuhr notwendig.

Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus der Erstellung des Demonstrators diskutiert und Lösungsansätze erörtert.

1. Die Rüttelplatte neigt dazu, den unverdichteten Lehm vor sich her zu schieben, wenn dieser höher als circa 2 cm aufgeschüttet wird, was auf eine suboptimale Geometrie der Rüttelplatte, sowie zu wenig Hub des Motors zurückzuführen ist. Die Geometrie der Rüttelplatte muss so angepasst werden, dass der Lehm leichter „geschluckt“ werden kann, was einen größeren Radius der Biegewalzung an den Plattenenden erfordert. Der Unwucht-Motor sollte für mehr Hub größer dimensioniert werden.
2. Ein weiteres Problem stellt die Verdichtung der Stirnseiten dar. Die Rüttelplatte kann nicht bis an die statisch installierte Schalung fahren und die Stirnseiten müssen somit händisch nachverdichtet werden. Hier muss die Schalung, oder das Verdichtungsgerät so angepasst werden, dass das Material bis an die Stirnseiten ausreichend verdichtet wird.
3. Mit zunehmender Bauteilhöhe neigen die längsseitigen Bauteiloberflächen zum Abplatzen, was auf eine unzureichende Verdichtung der Außenseiten (Bauteiloberfläche) schließen lässt. Hier kann es sinnvoll sein, diese zusätzlich mit pneumatischen Stampfern zu verdichten.
4. Insgesamt ist eine Vibrationsübertragung auf den Roboter zu beobachten, die im weiteren Verlauf so weit wie möglich reduziert werden sollte. Die wahrscheinliche Ursache für die Übertragung der Vibrationen auf den Roboter ist das aktive Führen der Rüttelplatte durch den Roboter, sowie das Anstoßen der Rüttelplatte gegen die Schalbretter. Um die Vibrationsübertragung zu reduzieren, sollte das selbstständige Fortbewegen der Rüttelplatte in eine vorgegebene Richtung mittels eines Frequenzumformers ermöglicht werden, so würde der Roboter die Rüttelplatte nur passiv leiten. Außerdem kann die Integration von Stoßdämpfern in der Roboteraufnahme zu einer weiteren Reduzierung der Vibrationsübertragung führen.
5. Die Konstruktion des Stahlgestells (Abbildung 6), welches die Verbindung zwischen Roboter und Gleitschalung darstellt, ist nicht genügend ausgesteift, was durch das Verdrehen des Mittelrohrs sowie das Aufreißen der Schweißnähte sichtbar wird. Zusätzlich treten Probleme bei der Entschalung des Bauteils auf, da sich das Gestell nicht öffnen lässt und so zusätzlich die Bauteiloberfläche beschädigt. Hier sollte eine öffnenbare, steifere Konstruktion, insbesondere gegen die auftretende Torsion gefertigt werden.
6. Die beobachtete ungleichmäßige Schichthöhe ist auf das händische Auftragen der Lehmmischung, sowie das händische Verdichten der Stirnseiten zurückzuführen. Beides wird voraussichtlich durch die diskutierten Maßnahmen und das spätere maschinelle Auftragen des Materials verbessert.

Die beschriebenen Beobachtungen wurden als Grundlage der Prozessoptimierung genutzt (Kapitel 3.2.1)

3.2.6 Weitere Prozessversuche im 1:1 Bauteilmaßstab

In weiteren Prozessversuchen im 1:1 Bauteilmaßstab wurde der Gesamtprozess verfeinert und die einzelnen Prozesskomponenten zusammengeführt. Wie beschrieben wurde ein CNC-gesteuertes Portal für die Materialbeschickung genutzt, sodass der Prozess bestehend aus Beschickung und Verdichtung Kooperativ zwischen zwei CNC-Portalen stattfindet (Abbildung 14). Eine besondere Herausforderung ist hier die Abstimmung der Prozesssequenz und Koordination zwischen den einzelnen, automatisierten Prozessschritten. Die Stirnseitenschalungen wurden zugunsten der Robustheit des Prozesses reintegriert, was Auswirkungen auf den Beschickungsprozess, sowie die Materialverdichtung an aufgehenden Bauteilen zur Folge hat.



Abbildung 14: Kooperativer Prozess für die Materialbeschickung und Materialverdichtung

Die gesammelten Erkenntnisse aus den vorherigen Prozesstests führten zur Anpassung und Weiterentwicklung der meisten Prozesskomponenten, die einzelnen Maßnahmen werden in den jeweiligen Kapiteln zuvor beschrieben.

Die Verwendete Lagenhöhe betrug 30 mm unverdichtet und 20 mm verdichtet, die Bauteilbreite 450 mm. Das gesamte Bauteil besteht somit aus 50 Lagen und hat ein Gewicht von 2,5 t bei einer Rohdichte von 2.200 kg/m^3 . Das Abstimmen der tatsächlichen Lagenhöhe nach der Verdichtung auf die Beschickungshöhe der jeweils nächsten Lage stellte sich als Herausforderung dar, da nicht jede Lage auf die exakt gleiche Endhöhe verdichtet wird und sich kleine Ungenauigkeiten mit der Zeit aufaddieren. Hier kann zukünftig die Integration von Sensor-Messtechnik helfen, den tatsächlichen Materialaufbau und Höhenzuwachs live zu überwachen mit direkten Einflussmöglichkeiten auf die jeweils nächste Beschickungshöhe. Auch in Bezug auf die Verdichtungsleistung sollte in zukünftigen Untersuchungen die Integration von Sensorik zur Überwachung der tatsächlich ausgeübten Verdichtung in Betracht gezogen werden.



a)

b)

Abbildung 15: Robotischer Endeffektor bestehend aus aktiver Gleitschalung und Verdichtungsgerät (a); Stampflehm-Bauteil 250 x 45 x 100 cm (b)

3.2.7 Oberflächenbeschaffenheit

Die Oberfläche robotisch hergestellter Stampflehmelemente weist aufgrund der geringen Lagenhöhe keine starke horizontale Akzentuierung wie im herkömmlichen Stampflehmabau auf. Durch die auf die Lagenhöhe abgestimmte Verdichtung wird eine vollständige Durchdringung der Lage mit den Verdichtungswerkzeugen erreicht, was zu einer maximalen Packungsdichte über die gesamte Lagenhöhe bei geringer Verdichtungsenergie führt. Im traditionellen Ansatz, wo bis zu 15 cm Rohmaterial pro Lage in einem Durchgang verdichtet werden wird diese durchgängige Packungsdichte nicht erreicht, der untere Teil der Lage bleibt weniger verdichtet als der gut verdichtete obere Teil. Abbildung 16 zeigt die resultierende Oberflächenbeschaffenheit und Lagenhöhe im Vergleich zwischen manuell- und robotisch verdichtetem Stampflehm.

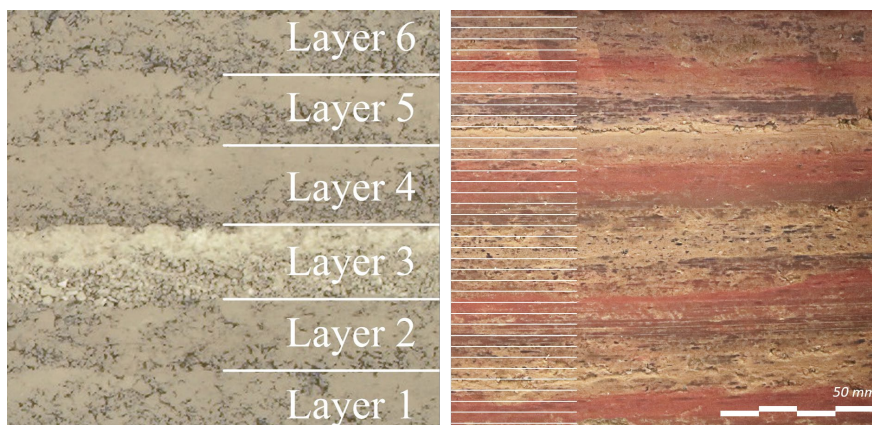


Abbildung 16: Oberflächenbeschaffenheit und Lagenhöhe von manuell- und robotisch verdichtetem Stampflehm

3.3 Entwicklung von Prüfverfahren

Die Bewertung des entwickelten Prozesses ist in erster Linie von der Qualität des produzierten Stampflehms abhängig. Deshalb werden die Prüfverfahren so angelegt, dass mit fortschreitender Weiterentwicklung Stichproben der Materialeigenschaften genommen werden können. Die Evaluierung verschiedener Verfahrens- und Prozessschritte findet vornehmlich anhand der Trockenrohdichte und der Druckfestigkeit des Stampflehms statt.

3.3.1 Herstellen von Probekörpern

Die Prüfung der Rohdichte, sowie der Druckfestigkeit von Stampflehm wird anhand von Probewürfeln mit 20cm Kantenlänge empfohlen [Vol2009]. Für die Prüfung der Rohdichte wird aus mindestens drei Prüfungen der gerundete Mittelwert angegeben, wobei die Abweichung der Einzelwerte bei <5% liegen muss. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt in der bautechnischen Anwendung an drei Probewürfeln, wobei der kleinste gemessene Wert maßgeblich ist. Dieses Vorgehen ist notwendig, da Einzelwerte der Druckfestigkeit teilweise stark voneinander abweichen, was auf die Inhomogenität des Materials, sowie der manuellen Verarbeitung zurückzuführen ist. Da im vorliegenden Forschungsvorhaben die Streuung von Materialkennwerten berücksichtigt wird und kein absoluter Wert für die Bemessung von Bauteilen ermittelt werden soll, werden die einzelnen Kennwerte miteinander verglichen, ohne einen Mittelwert zu bilden.

Um parallel zu den am Großgerät des DBFL durchgeführten Versuchen die Auswirkungen verschiedener Verdichtungsparameter auf die Qualität des Stampflehms miteinander vergleichen zu können, wird eine statische Schalung konstruiert (Abbildung 17). Die Schalung hat die Dimensionen 125cm x 45cm x 40cm (l x b x h), sodass die Schalungsbreite dem Abstand der robotergeführten Gleitschalungsplatten entspricht. Diese erlaubt die Herstellung von Prüfkörpern zu verschiedenen Verdichtungsparametern.



Abbildung 17: Statische Schalung zum Erstellen von Probekörpern

Wie von Ávila et al. [Ávi2020] beschrieben, können bestimmte Parameter bei der Herstellung von Probekörpern zur Bestimmung der Druckfestigkeit das Prüfergebnis beeinflussen und so die realen Druckfestigkeitskennwerte eines Bauteils verfälschen. Zu diesen Parametern gehören die Probekörpergeometrie, Größe und Einfluss des Schalungsdrucks auf den Probekörper. So haben Bui et al. [Bui2014] Testreihen mit Probekörpern in verschiedenen Größen durchgeführt, welche gezeigt haben, dass kleine Probekörper eine tendenziell höhere Druckfestigkeit aufweisen als große Probekörper (deren Druckfestigkeit aufgrund größerer Ähnlichkeit möglicherweise realistischere Werte in Bezug auf ein Wandelement im Realmaßstab vorweisen).

Auch der Einfluss der Schalung auf die Druckfestigkeit der Probekörper ist nicht abschließend geklärt, es gibt jedoch Hinweise, dass die Druckfestigkeit des Probekörpers durch den passiven Schalungsdruck der Schalung beeinflusst wird [Ávi2020]. Da die Lehmbauregeln hier keine Vorgaben machen und das Ziel eine möglichst exakte Prüfung der tatsächlichen Materialkennwerte im 1:1 Bauteilmaßstab ist, werden die Probewürfel mit 20cm Kantenlänge aus einem Bauteil mit den Dimensionen 125cm x 45cm x 20cm herausgeschnitten. So kann die tatsächliche Druckfestigkeit im Innern des Bauteils ermittelt werden.

3.3.2 Anwendung subtraktiver Bearbeitungsmethoden

Das Schneiden der Probekörper wird am Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL), der Versuchshalle des Instituts für Tragwerksentwurf durchgeführt (Abbildung 18, Abbildung 19). Für die Schnitte wird ein CNC-gesteuertes Diamant-Kreissägeblatt an einer Portalfräse genutzt, welches für den Einsatz in der subtraktiven Stein- und Betonbearbeitung entwickelt wurde, bei deren Verarbeitung Wasser zur Kühlung des Sägeblatts verwendet wird. In dem vorliegenden Fall spielt die Wasserlöslichkeit des Lehms eine entscheidende Rolle und muss bei der Planung der subtraktiven Bearbeitung berücksichtigt werden.



Abbildung 18: Der Probekörper wird von einer CNC gesteuerten Kreissäge in Probewürfel (20x20x20 cm) zerschnitten



Abbildung 19: Das Resultat des Schneideversuchs: Stampflehmprobewürfel mit Kantenlängen von 20 cm

Um den Einfluss des aufgesprühten Kühlwassers auf die Lehmprobekörper und deren Schnittflächen besser beurteilen zu können, wurde eine Versuchsreihe mit verschiedenen Schnittparametern durchgeführt (Tabelle 5). Ziel der Testreihe ist die Evaluation der Schnittparameter, die zu einer möglichst homogenen Schnittgeometrie führen. Getestet wurde der Schneidvorgang mit- und ohne Wasserkühlung, sowie mit trockenen- und feuchten Probekörpern.

Versuch Nr.	Wasserkühlung	Feuchtegehalt Lehm	Anmerkungen	Foto
1	ja	trocken (Trocknungszeit 12 Wochen)	Ein Abspülen des Lehms ist erkennbar, was das Heraustreten der Kiesel zur Folge hat. Kanten zahnig aus. Durchfeuchtung der Oberfläche bis 6cm Tiefe	
2	nein	Trocken (Trocknungszeit 12 Wochen)	Große Staubentwicklung während Schneidvorgang. Teilweise Abbrechen der Schnittkanten. Schnittoberfläche sehr eben.	
3	nein	Feucht (Trocknungszeit 1 Woche)	Bestes Schnittergebnis. Keine Staubentwicklung. Nur minimales Ausbrechen der Schnittkanten. Schnittoberfläche sehr eben.	

Tabelle 5: Versuchsreihe zu verschiedenen Subtraktionsparametern

Zunächst wurde das Schneiden eines trockenen Probekörpers unter Verwendung der Wasserkühlung getestet, wobei das Auszahn der Schnittkanten und Abspülen der Lehmoberfläche beobachtet wurde. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass die Probekörper durch das auftreffende Wasser auf dem flächigen Untergrund unterspült- und somit Material im unteren Schnittbereich abgespült wurde. Der Schneidprozess selbst wurde zügig durchgeführt, um den Kontakt der Probekörper mit Wasser so gering wie möglich zu halten. Um Diesem weiter zu minimieren wurde der Lehmblock mit Kunststoffplanen abgedeckt. Nachdem die Parameter, bestehend aus Vorschub, Wassermenge und Drehzahl des Sägeblattes aufeinander abgestimmt waren, verlief das Schneiden der Lehmblöcke wie geplant.

In Versuch 2 wurde ein trockener Probekörper ohne Wasserkühlung bearbeitet. Hier wurde eine hohe Staubentwicklung beobachtet, welche durch das Kühlwasser in Versuch 1 verhindert wurde, außerdem platzten mehrere Zentimeter große Teile der Oberfläche nahe der Schnittkanten ab. Die Schnittoberfläche selbst war sehr eben und homogener als im vorherigen Versuch, da kein Lehm abgespült wurde. Die Temperatur des Sägeblattes direkt nach dem Schnitt betrug 19,3°C.

Im dritten Versuch wurde das Schneiden eines feuchten Probekörpers ohne Wasserkühlung getestet. Das Schneiden des Lehms im frischen Zustand ist wegen der geringen Schwindwerte des Materials von unter 0,5% möglich [Vol2009]. Im dritten Schnittversuch wurde eine geringe Staubentwicklung und ein gleichmäßiges Schnittbild an der Schnittoberfläche und den Schnittkanten beobachtet.

Weitere Untersuchungen zur Evaluierung der geometrischen Präzision von subtraktiv nachbearbeiteten Stampflehm-Probekörpern werden im Kapitel 3.5 beschrieben.

3.3.3 Versuchsreihen zur Feinabstimmung der Verdichtungsparameter

Um die Parameter der einzelnen Komponenten des Verdichtungsgeräts optimal aufeinander abzustimmen, wurden Probekörper mit unterschiedlichen Verdichtungseigenschaften erstellt. Mittels Druckfestigkeitstests wurden die Probekörper dann auf ihre Druckfestigkeit getestet und miteinander verglichen. Das Herstellen der Probewürfel wurde wie in Kapitel 3.2.7 beschrieben durchgeführt.

3.3.3.1 Ausschlaggebende Verdichtungsparameter

Frequenz des Unwuchtmotors: Die Unwucht des Motors wird durch die Montage von Fliehscheiben auf einer zentralen, durch einen Elektromotor angetriebenen Welle erreicht. Durch das Drehen des einseitigen Gewichts wird der Unwuchtmotor in Schwingung versetzt, je nach Drehrichtung wird die Fahrtrichtung bestimmt. Je höher die Frequenz, desto höher ist die Geschwindigkeit der Fortbewegung und desto kleiner sind die bewirkten Vibrationssprünge. Die Frequenz muss so gewählt werden, dass einerseits eine moderate Fortbewegungsgeschwindigkeit des Verdichtungsgeräts- und andererseits ausreichend Hub entsteht, um unverdichtetes Material aufzunehmen.

Sieblinie des Materials: Die Materialsieblinie sollte dem Verdichtungsprozess entsprechend gewählt werden. Da mit industriell vorgemischtem Material gearbeitet wird, wird mit einer groben- (0-22 mm Korngröße) und einer feinen Stampflehmmischung (0-8 mm Korngröße) gearbeitet.

Lagenhöhe: Der Schalungsdruck nimmt proportional zur Lagenhöhe zu. Um ein leichtes Setup und somit eine erhebliche Reduzierung des Schalungsaufwandes zu ermöglichen, werden im vorliegenden Forschungsvorhaben Lagenhöhen von maximal 5 cm getestet. Im traditionellen Stampflehmbau wird die Lagenhöhe des unverdichteten Materials so gewählt, dass eine kontinuierliche Verdichtung durch händisch geführte Stampfer erreicht werden kann. Wegen der erhöhten Fertigungsgeschwindigkeit sind hohe Lagen von Vorteil, das obere Limit der Lagenhöhe wird jedoch begrenzt durch die begrenzte manuell aufgebrachte Verdichtungsenergie.

Die optimale Frequenz und Fliehkraft des Unwuchtmotors wurden in einer Versuchsreihe hinsichtlich Laufgeschwindigkeit, Laufruhe und Verdichtungseigenschaften der Rüttelplatte evaluiert. Die Drehfrequenz kann Stufenlos über den angeschlossenen Frequenzumrichter bestimmt werden, die Fliehkraft wird schrittweise durch Umlegen von Unwuchtscheiben am Unwuchtmotor eingestellt. Die resultierende Fliehkraft kann mittels Tabelle 6 und der folgenden Formel bestimmt werden:

$$F = F_{max} - z * f$$

F *Fliehkraft*

F_{max} *Maximale Fliehkraft*

z *Anzahl der umgelegten Fliehscheiben pro Seite*

f *Reduzierfaktor*

	Nenndrehzahl [min ⁻¹]							
	1500	1800	3000	3600	4500	6000	9000	12000
Reduzierfaktor f bei Umlegen 1 Fliehscheibe je Seite [kN]	0,19	0,27	0,74	1,07	1,84	2,96	3,33	5,92

Tabelle 6: Einstellen der Fliehkraft des Unwuchtmotors und resultierende Fliehkraft (Quelle: Eviro)

Die höchste Laufruhe in Verbindung mit einer moderaten Laufgeschwindigkeit und guten Verdichtungseigenschaften wurde erreicht durch das Umlegen von acht Fliehscheiben je Seite (insgesamt 24 Fliehscheiben je Seite) und einer Frequenz von 30 Hz (1800 min⁻¹). Dementsprechend ergibt sich eine Fliehkraft von 6,72 kN

$$F = 8,88 \text{ kN} - 8 * 0,27 \text{ kN}$$

$$F = 6,72 \text{ kN}$$

3.3.3.2 Testergebnisse

Die Versuchsreihe wurde in der Zeit vom 03.09.2020 bis zum 26.02.2021 durchgeführt. Die Probewürfel wurden am DBFL der TU Braunschweig erstellt und am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) auf Ihre Druckfestigkeit getestet (Abbildung 20 und Abbildung 21). Um einen flächigen Kontakt zwischen Prüfgerät und Probewürfel herzustellen wurden die Oberflächen der Prüfkörper mit Quarzsand abgeglichen.

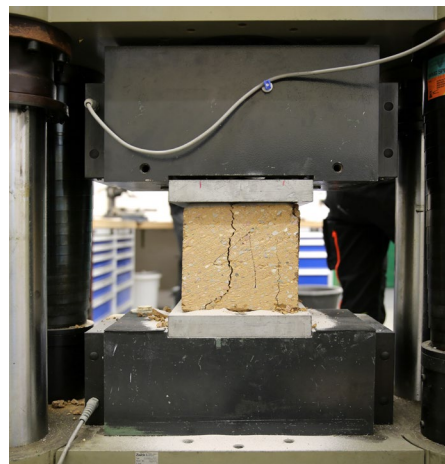
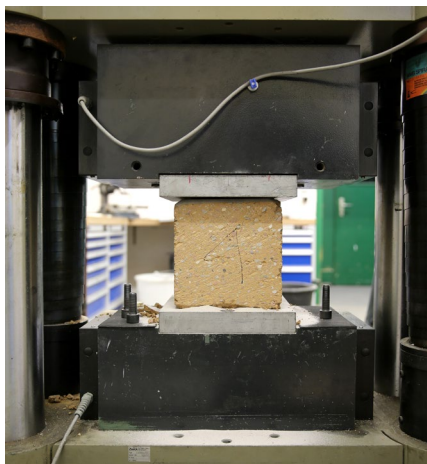


Abbildung 20: Druckfestigkeitstests am IBMB, Probewürfel vor dem Drucktest

Abbildung 21: Druckfestigkeitstests am IBMB, Probewürfel nach dem Drucktest

Für die Durchführung der Versuchsreihen wurden unterschiedliche Verdichtungsparameter definiert (Tabelle 7). Für die Versuchsreihen wurden entsprechend der Empfehlung der Lehmbauregeln [Vol2009] jeweils drei Probewürfel mit einer Kantenlänge von 20cm hergestellt. Die Nummerierungen in den folgenden Abbildungen weisen jeweils auf die Versuchsreihe und die Probekörpernummer hin (die Nummer 2.3 bezeichnet z.B. den dritten Probekörper in der zweiten Versuchsreihe). Die Probekörper wurden mindestens drei Monate getrocknet, bevor die Drucktests durchgeführt wurden.

Folgende Verdichtungseigenschaften wurden miteinander verglichen:

Versuchsreihe	Korngröße [mm]	SL	Verdichtung	Lagenhöhe unverd. [mm]	Frequenz [Hz]
1	0 – 8		RP	30	30
2	0 – 22		RP/PS	30	30
3	0 – 8		M	30	30
4	0 – 8		RP/PS	50	30
5	0 – 8		RP/PS	30	30

Tabelle 7: Verdichtungsparameter der durchgeführten Versuchsreihen. RP=Rüttelplatte, PS=Pneumatischer Stampfer, M=Manuelle Verdichtung

Nr.	Verdichtung	Frequenz [Hz]	Randverdichtung	Lagenhöhe [cm]	Materialkörnung [mm]
1.1	Rüttelplatte	30 Hz	-	3,00	0-8
1.2					
1.3					
2.1	Rüttelplatte	30 Hz	Pneum. Zylinder, 6 Bar	3,00	0-22
2.2					
2.3					
3.1	Händisch	-	Händisch	3,00	0-8
3.2					
3.3					
4.1	Rüttelplatte	30 Hz	Pneum. Zylinder, 6 Bar	5,00	0-8
4.2					
4.3					
5.1	Rüttelplatte	30 Hz	Pneum. Zylinder, 6 Bar	3,00	0-8
5.2					
5.3					

Tabelle 8: Verdichtungsparameter der Versuchsreihen

Nr.	Rohdichte [kg/m ³]	Bruchkraft [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Amplitude	Abweichung
1.1	2.076,51	99,19	2,22	32,69	37%
1.2	2.057,65	100,07			
1.3	2.052,56	67,38			
2.1	1.984,56	16,53	0,64	15,85	62%
2.2	1.818,24	27,52			
2.3	1.842,75	32,38			
3.1	2.092,34	95,78	2,18	13,45	15%
3.2	2.040,83	83,95			
3.3	2.045,15	82,34			
4.1	2.006,92	73,75	2,18	21,45	25%
4.2	1.994,43	95,21			
4.3	1.979,12	92,79			
5.1	1.955,42	75,61	1,90	2,46	3%
5.2	1.987,33	77,49			
5.3	1.988,02	75,03			

Tabelle 9: Prüfergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen

Die durchgeführten Versuchsreihen liefern Hinweise auf Abhängigkeiten der Verdichtungsparameter zueinander. Um diese Werte zu bestätigen sind weiterführende Versuchsreihen mit einer höheren Anzahl an Probekörpern notwendig. Zunächst wurden drei händisch verdichtete Referenzkörper hergestellt (Tabelle 7, Versuchsreihe 3). Diese wurden manuell mit einem klassischen Handstampfer mit Stahlfuß und Holzgriff mit einer Lagenhöhe von 3 cm verdichtet. Die durchschnittliche Druckfestigkeit der händisch verdichteten Referenzkörper beträgt 2,18 N/mm², wobei die Abweichung der drei gemessenen Festigkeiten bei 15% liegt (Tabelle 9).

Grundsätzlich weisen die Druckfestigkeiten von Stampflehm größere Schwankungen auf, was teilweise auf die manuelle und somit ungleichmäßige Verarbeitung zurückzuführen ist. Hinzu kommt, dass es sich bei Stampflehm um einen inhomogenen Naturbaustoff handelt, was dazu führt, dass auch bei ständiger Qualitätskontrolle der rheologischen Eigenschaften des Rohmaterials keine gleichbleibende Verteilung der Aggregate im Bauteil nach der Verarbeitung sichergestellt werden kann.

Der Einfluss des Verhältnisses von Lagenhöhe (LH) zum Durchmesser des Größtkorns (LH/d) wurde in den Versuchsreihen 2,4 und 5 getestet. Es wurden Prüfkörper mit Lagenhöhen von 3 cm und 5 cm hergestellt. Als Material wurde entweder grober- (0-22mm) oder feiner Stampflehm (0-8mm) verwendet.

Tabelle 9 zeigt, dass die Probekörper mit 5 cm LH eine höhere durchschnittliche Druckfestigkeit aufweisen als die Prüfkörper mit einer LH von 3 cm. Dies wird auch in Abbildung 23 im Vergleich der Versuchsreihe 4 (LH 5cm) und Versuchsreihe 5 (LH 3cm) deutlich. Im Vergleich zwischen grobem und feinem Stampflehm (Körnung 0-8mm / 0-22mm) erreichen die Druckfestigkeitswerte der groben Materialmischung bei einer LH von 30mm lediglich durchschnittlich 0,64 N/mm² (

Tabelle 9 und Abbildung 23). Die Körnungsgröße von maximal 22 mm entspricht in diesem Fall über 70% der Lagenhöhe von 30mm (LH/d= 1:1,36), was sich negativ auf die Verdichtung des Materials auswirkt, dies wurde bereits bei der Herstellung der Probekörper beobachtet und wird auch in der geringen Dichte von durchschnittlich 1.881,85 kg/m³ sichtbar.

Daraus lässt sich schließen, dass das Verhältnis von Lagenhöhe zu Größtkorn des Materials bei gleichbleibender Verdichtungsenergie eine entscheidende Rolle im Verdichtungsresultat und somit der Druckfestigkeit spielt. Abbildung 23 zeigt, dass in den drei durchgeführten Versuchsreihen 2, 4 und 5 die Druckfestigkeit zunimmt bei abnehmendem LH/d-Verhältnis. Die höchste gemessene

Druckfestigkeit wurde bei einem LH/d-Verhältnis von 1:6,25 erreicht. Inwieweit dieses Ergebnis skalierbar ist, kann nicht beantwortet werden und sollte in weiteren Versuchsreihen evaluiert werden.

Hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Materialkennwerte hat eine größere LH jedoch den Effekt einer erhöhten Streuung der Druckfestigkeiten. So wurde in der Versuchsreihe 5 (LH 3cm) eine Streuung von 3% und in Versuchsreihe 4 (LH 5cm) eine Streuung von 25% gemessen (Abbildung 24 und Abbildung 25). Im Vergleich der Versuchsreihen (Abbildung 28) wurde die höchste Druckfestigkeit in Versuchsreihe 4 gemessen (LH 50mm, d=0-8mm). Hier wird die Versuchsreihe 1 wegen unvergleichbar langer Trocknungszeit (aufgrund der Schließung von universitären Prüfungseinrichtungen während der Corona-Pandemie) außeracht gelassen. Ein ähnlich wichtiges Kriterium ist die Streuung der einzelnen Druckfestigkeiten innerhalb einer Versuchsreihe, welche bei optimal aufeinander abgestimmten Verdichtungs- und Materialeigenschaften in Versuchsreihe 4 lediglich 3% betrug (Tabelle 9).

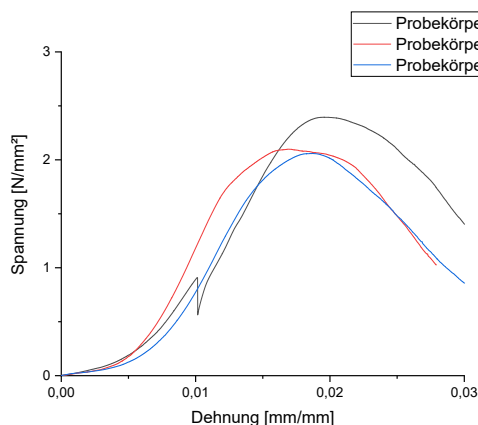


Abbildung 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Händisch verdichtete Referenz-Probewürfel

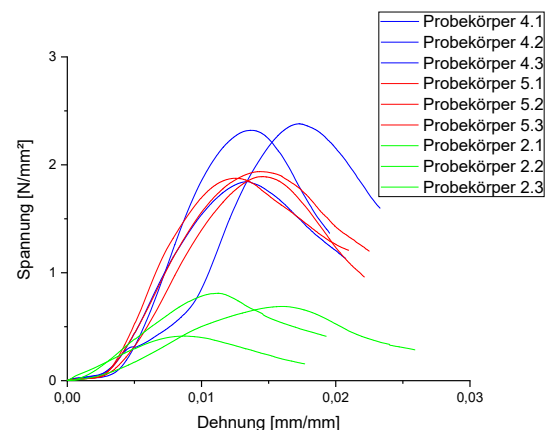


Abbildung 23: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Vergleich verschiedener Verhältnisse Lagenhöhe/Größtkorn (Versuchsreihe 2: 1:1,36; Versuchsreihe 4: 1:6,25; Versuchsreihe 5: 1:3,75)

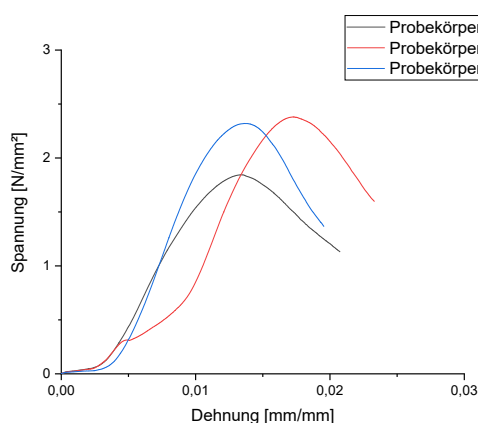


Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Versuchsreihe 4

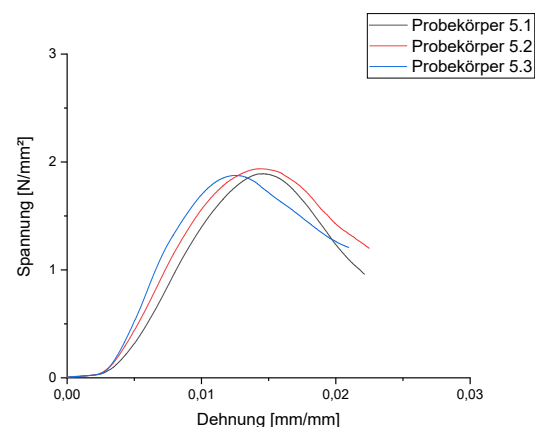


Abbildung 25: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Versuchsreihe 5

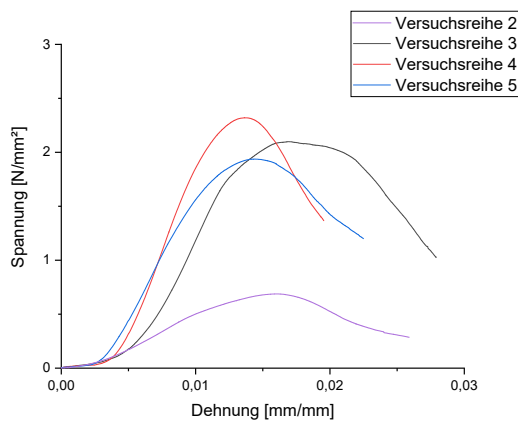


Abbildung 26: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Vergleich der Versuchsreihen

3.4 Implementierung des automatisierten Prozesses

Die DBFL Anlage besteht aus vier Steuerungen:

- Zwei Sinumerik 840d sl (beide Portale)
- Ein Beckhoff C6920 Industrie-PC
- Ein Robotercontroller der Fa. Stäubli

Sinumerik ist eine Marke der Siemens AG. Diese CNC wird als eine Steuerung für unterschiedliche Werkzeugmaschinen der Technologien Fräsen, Drehen, Schleifen, Nibbeln, Stanzen, Handling, Blechumformung, Zahnradbearbeitung etc. eingesetzt.

Der Beckhoff Industrie-PC wird als SPS¹ eingesetzt und dient als übergeordnete Steuerung der gesamten Anlage. Er ermöglicht die Kommunikation zwischen den beiden Portalen sowie die Signalverarbeitung der Sensoren und Ansteuerung der Aktorik der Anlage.

Der Robotercontroller wird vom Benutzer nicht direkt programmiert, er steuert die Achsen des Roboters anhand der von der Sinumerik vorgegebenen Sollpositionen.

3.4.1 Programmierung des Ablaufs

Die Bewegungen beider Portale werden in G-Code programmiert. Das Programm kann sowohl manuell als auch durch ein CAD-Programm (z.B. Rhinoceros 3D) automatisch generiert werden. Für diesen Zweck wurde die manuelle Variante ausgewählt, welche folgende Vorteile mit sich bringt:

- Lineare Bewegungen lassen sich mit einer Schleife programmieren.
- Die Anzahl der Stampflehmschichten kann in Laufzeit verändert werden, ohne das Programm abzuberechnen.
- Die Schichthöhe kann ebenfalls in Laufzeit angepasst werden.

¹ Eine SPS (Englisch: PLC) ist ein Gerät, das zur Steuerung oder Regelung einer Maschine oder Anlage eingesetzt und auf digitaler Basis programmiert wird.

3.4.1.1 Ablauf der Materialbeschickung

1. Der Beschickungskorb wartet in der Ladungsposition auf die Bestätigung „Material geladen“ durch einen physikalischen Taster an der Ladestation oder durch die Benutzeroberfläche / GUI² (Abbildung 27).
2. Der Materialkorb bewegt sich mit dem Material auf einer Zwischenposition, wo auf die Beschickungsfreigabe des Roboters gewartet wird.
3. Im Prozess wird die Endposition des Roboters abgefragt um eine Kollision während des Beschickungsvorgangs zu vermeiden.

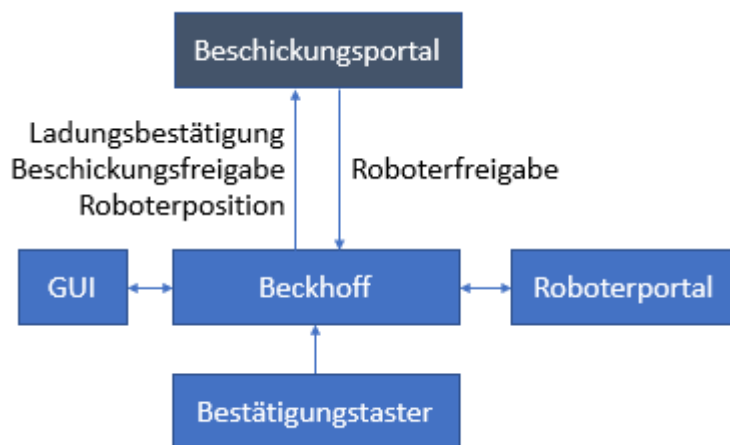


Abbildung 27: Übersicht der beteiligten Systeme und Kommunikation im Beschickungsprozess

3.4.1.2 Ablauf des Verdichtungs- und Schalungsprozesses

Zu Prozessstart sendet der Roboter die Beschickungsfreigabe und wartet auf die Roboterfreigabe des Beschickungsportals. Wenn das geschieht, fährt der Roboter mit montierter Gleitschalung zum Ausgangspunkt. Dort wird Diese mit dem Verdichtungsgerät verbunden.

Mit der Bestätigung des Benutzers beginnt der vollständige Automatikbetrieb. Das Verdichtungsgerät wird eingeschaltet. Der Roboter beginnt die Bewegung, wenn der Motor die gewünschte Drehzahl erreicht hat (Signal vom Frequenzumrichter) und fährt bis zur vorgegebenen Sollposition.

² Graphic User Interface

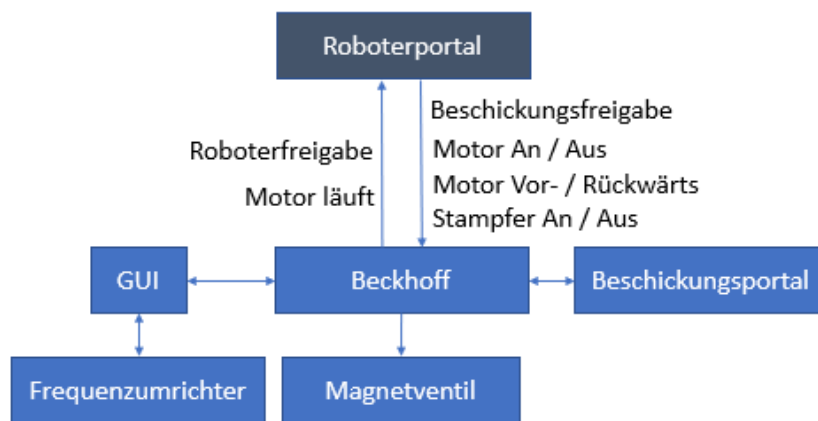


Abbildung 28: Übersicht der beteiligten Systeme im Verdichtungsprozess

3.4.2 Ansteuerung der Aktorik

Die verwendete Aktorik des Systems sind die Rüttelplatte und ein Magnetventil für die Stampfer. Deren Ansteuerung ist sowohl im Automatik- als auch im Manuelbetrieb möglich.

3.4.2.1 Pneumatische Stampfer

Ein Magnetventil wird durch ein digitales Ausgangssignal von der Beckhoff angesteuert. Im Automatikbetrieb wird Dieses mit einem M-Befehl im G-Code aktiviert.

Durch eine ADS³-Schnittstelle können Ausgangssignale der SPS mittels einer selbstentwickelten Softwareanwendung (GUI) angesteuert werden. Dies ermöglicht den manuellen Betrieb des Systems.

3.4.2.2 Rüttelplatte

Um die Rüttelplatte im Prozess ansteuern zu können, muss der Frequenzumrichter mit dem System kommunizieren. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten:

- Über analoge und digitale Ein- und Ausgänge (begrenzte Anzahl).
- Über ein industrielles Bussystem (Modbus-RTU).

Der Frequenzumrichter verfügt über eine integrierte serielle RS-485-Kommunikation mit dem Modbus-RTU Protokoll, welche den Zugriff auf alle Signale und Konfigurationsparameter ermöglicht (Abbildung 30).

³ Das ADS-Protokoll (ADS: Automation Device Specification) ist eine Transportschicht innerhalb des TwinCAT Systems. Es wurde für den Datenaustausch der verschiedenen Software-Module entwickelt, zum Beispiel für die Kommunikation zwischen einem Software-Tool und der PLC.

Da die Beckhoff-Steuerung über keine RS-485 verfügt, wurde ein USB-Adapter angeschafft (Abbildung 29). Hier spielt die Software der Benutzeroberfläche eine wichtige Rolle, da Diese eine neue Schnittstelle für das Modbus-RTU Protokoll ermöglicht (Abbildung 28).

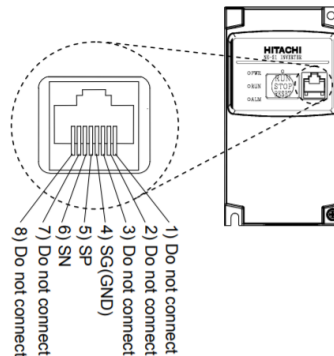
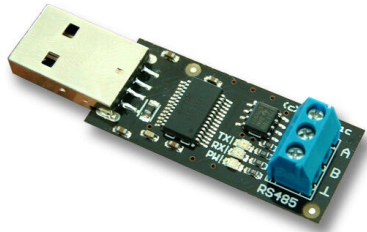


Abbildung 29: RS-485 USB Adapter

Abbildung 30: Integrierte RS-485-Kommunikation mit Modbus-RTU Protokoll am Frequenzumrichter

Eingänge des Frequenzumrichters	Ausgänge des Frequenzumrichters
Soll-Ausgangsfrequenz	Ist-Ausgangsfrequenz
Run / Stop	Motorstatus (Run / Stop)
Vor- / Rückwärts	

Tabelle 10: Im Prozess verwendete Steuersignale

3.4.3 Benutzeroberfläche

Jeder entwickelte automatische Prozess verfügt über eine Visualisierung oder Benutzeroberfläche, wodurch man auf die Prozessvariable einwirken kann (Abbildung 31). Die am ITE entwickelte Softwarelösung weist folgende Schnittstellen auf:

- Benutzer $\leftrightarrow$ Beckhoff
- Benutzer $\leftrightarrow$ Frequenzumrichter
- Beckhoff $\leftrightarrow$ Frequenzumrichter (Automatikbetrieb)

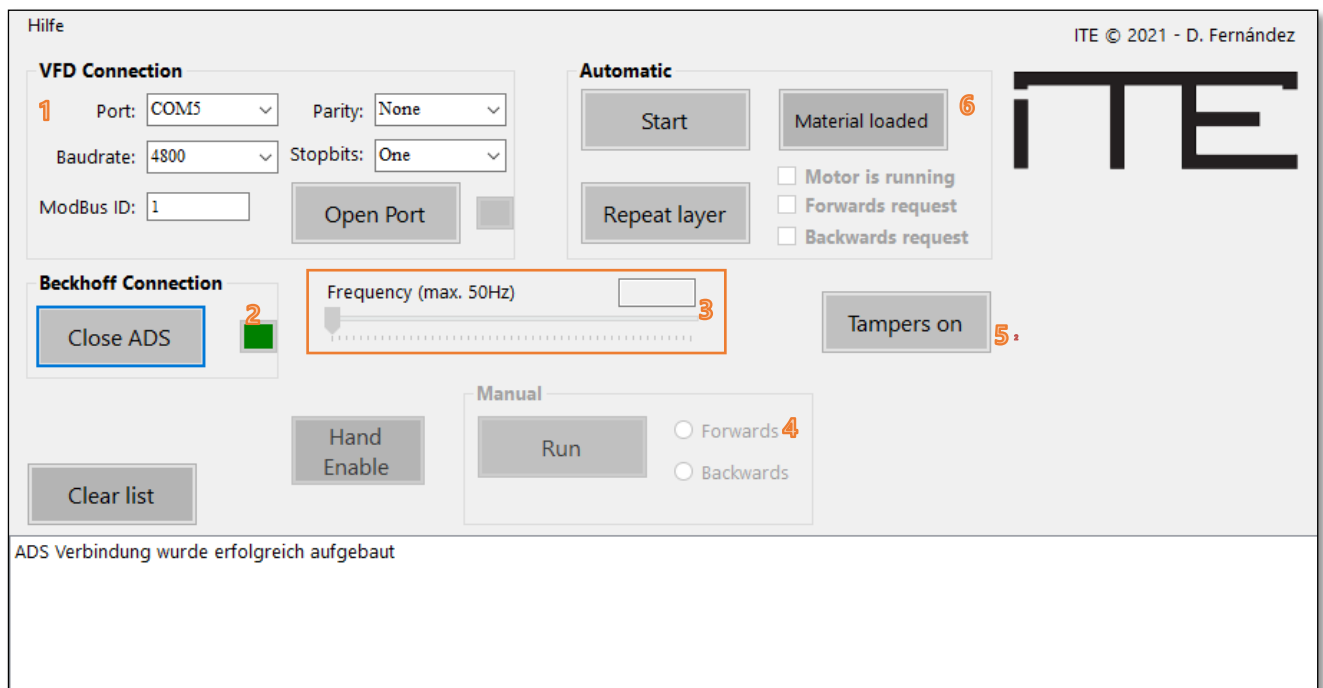


Abbildung 31: Benutzeroberfläche der entwickelten Software

Beschreibung der Benutzeroberfläche:

1. RS-485 Kommunikationsparameter
2. Verbindung mit der Beckhoff-Steuerung
3. Schieberegler zur Einstellung der Ausgangsfrequenz des Umrichters
4. Motorbefehle: Start/Stop und Vor/-Rückwärts
5. Aktivierung/Deaktivierung der Stampfer (Handbetrieb)
6. Start/Stop des Automatikbetriebs, Bestätigung „Material geladen“ inkl. Wiederholungsoption spezifischer Lagen (erneutes Verdichten, ohne Materialbeschickung).

3.5 CNC-gesteuerte, subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm-Elementen

Die Möglichkeiten der digitalen, subtraktiven Fertigung erlauben die hochpräzise Herstellung von Aussparungen und anderer digital definierter Geometrien. So können baupraktische Themen wie der Einbau von Ringbalken, die Herstellung von Durchbrüchen und Wandnischen, sowie die Implementierung technischer Installationen und Leitungsführungen für die technische Gebäudeausrüstung und Elektroausstattung adressiert werden. Weiterhin erlaubt die subtraktive Nachbearbeitung aufgrund der hohen Präzision die Herstellung von Füge-Geometrien, welche präzise ineinandergreifen und einen formschlüssigen Verbund bilden (Abbildung 32). Die komplexen Anforderungen der Bauindustrie an die Bauteilgeometrie von vorgefertigten Stampflehmteilen kann durch eine subtraktive Nachbearbeitung zur Steigerung der funktionalen Möglichkeiten beitragen.

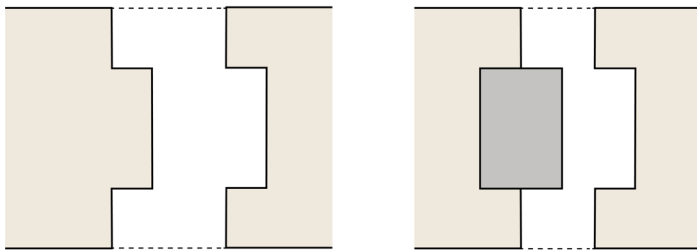


Abbildung 32: Fügestrategien auf Grundlage des Nut-Feder-Systems. (links) mit Spundung (rechts) mit Feder

Eine entscheidende Rolle für die Qualität der hergestellten Geometrie spielt die Schnittpräzision und die durch Materialtrocknung ausgelöste geometrische Verformung der Schnittgeometrie. Die nachfolgend beschriebenen Studien zu subtraktiven Nachbearbeitungsverfahren mittels CNC-gesteuerter Diamantkreissäge (DKS), sowie Flächen- und Fingerfräser (Abbildung 34 - Abbildung 36) sollen Erkenntnisse zum Einfluss der Bauteilfeuchte auf die geometrische Präzision, sowie die Schnittqualität von Stampflehmprobekörpern liefern. Dabei sollen die Potentiale der beschriebenen subtraktiven Verfahren erörtert-, sowie verschiedene Prozessvarianten miteinander verglichen werden.

3.5.1 Versuchsreihen zur subtraktiven, CNC-gesteuerten Nachbearbeitung am DBFL

Um die Präzision verschiedener Prozessvarianten miteinander vergleichen zu können, wurden Stampflehmprobekörper mit einem Kantenmaß von 300 - 350 mm hergestellt, um anschließend mittels subtraktiver Methoden verschiedene Geometrien herzustellen (Abbildung 33). Für die Versuche wurde ausschließlich Stampflehm der Firma Conluto mit einem Größtkorn bis 8mm verwendet. Die Probekörper wurden einerseits im getrockneten, andererseits im erdfeuchten Zustand bearbeitet und mittels optischer Messverfahren digital gescannt und anschließend verglichen.

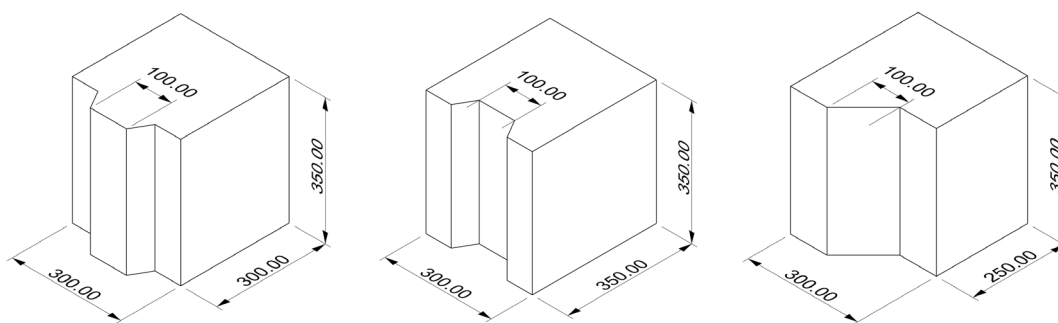


Abbildung 33: Schnittgeometrien; Versuchsreihe zur subtraktiven Nachbearbeitung von Stampflehm

Neben einer DKS kamen andere CNC-gesteuerte Werkzeuge, wie Flächenfräser und Fingerfräser in verschiedenen Durchmessern zum Einsatz. Der gewählte Durchmesser entsprach dabei maximal der Nutbreite der Sollgeometrie. Die Versuche zur subtraktiven Nachbearbeitung wurden in einer breit angelegten Studie am DBFL der TU Braunschweig durchgeführt.



Abbildung 34: Subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm mittels CNC-gesteuerter Diamantkreissäge (DKS)



Abbildung 35: Subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm mittels Diamant Flächenfräser mit Ø 91mm

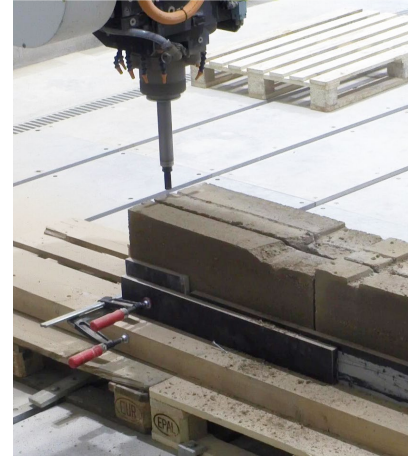


Abbildung 36: Subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm mittels Diamant Fingerfräser mit Ø 22mm

Sechs Probekörper wurden dafür einzeln im Arbeitsbereich befestigt und sukzessive bearbeitet. Für jede Geometrie gibt es dabei andere Anforderungen an die Werkzeuge und Prozessabfolgen. Grundsätzlich wurden lineare Schnitte größtenteils mittels DKS, großflächige Bereiche mittels Flächenfräser und kleinflächige Bereiche mittels Fingerfräser in der angegebenen Reihenfolge bearbeitet. Für das Herstellen von bestimmten Schnittgeometrien, wie der Feder (Abbildung 33, links), ist ein Unterschneiden nötig, was zum Abbrechen des überstehenden Materials – und somit zu einer ungleichmäßigen Oberfläche führte (Abbildung 37).



Abbildung 37: Brechen von Material im Zuge eines Unterschnitts

In der Stein- und Betonbearbeitung wird im Allgemeinen eine Wasserkühlung eingesetzt, dabei wird das Werkzeug mit Wasser durchspült und äußerlich benetzt um die durch Reibung entstehenden Temperaturen zwischen Bauteil und Werkzeug zu reduzieren. Bei der Nachbearbeitung von Elementen aus Lehm ist die Zugabe von Wasser kritisch, da das Material wasserlöslich ist und je nach Wassermenge Material von den Oberflächen gespült werden kann. Bei schnell durchgeführten, vertikal verlaufenden Schnitten ist das Abspülen des Lehmmaterials vernachlässigbar, was eine Wasserkühlung durchaus praktikabel macht und zu präzisen Oberflächen führen kann. Horizontal -und langsam verlaufende Schnitte sind für den Einsatz eines wassergekühlten Werkzeugs mit herkömmlichen Wassermengen jedoch ungeeignet und führen zur Durchnässung des Probekörpers im Bearbeitungsbereich und größeren Fehlstellen in der Schnittgeometrie. Die in Abbildung 38 dargestellten Probekörper wurden mit denselben Verfahren und unterschiedlichen Materialfeuchten bearbeitet: Die Probekörper a) – c) wurden direkt nach Herstellung im feuchten Zustand-, die Probekörper d) – f) nach zweimonatiger Trocknungszeit bearbeitet.

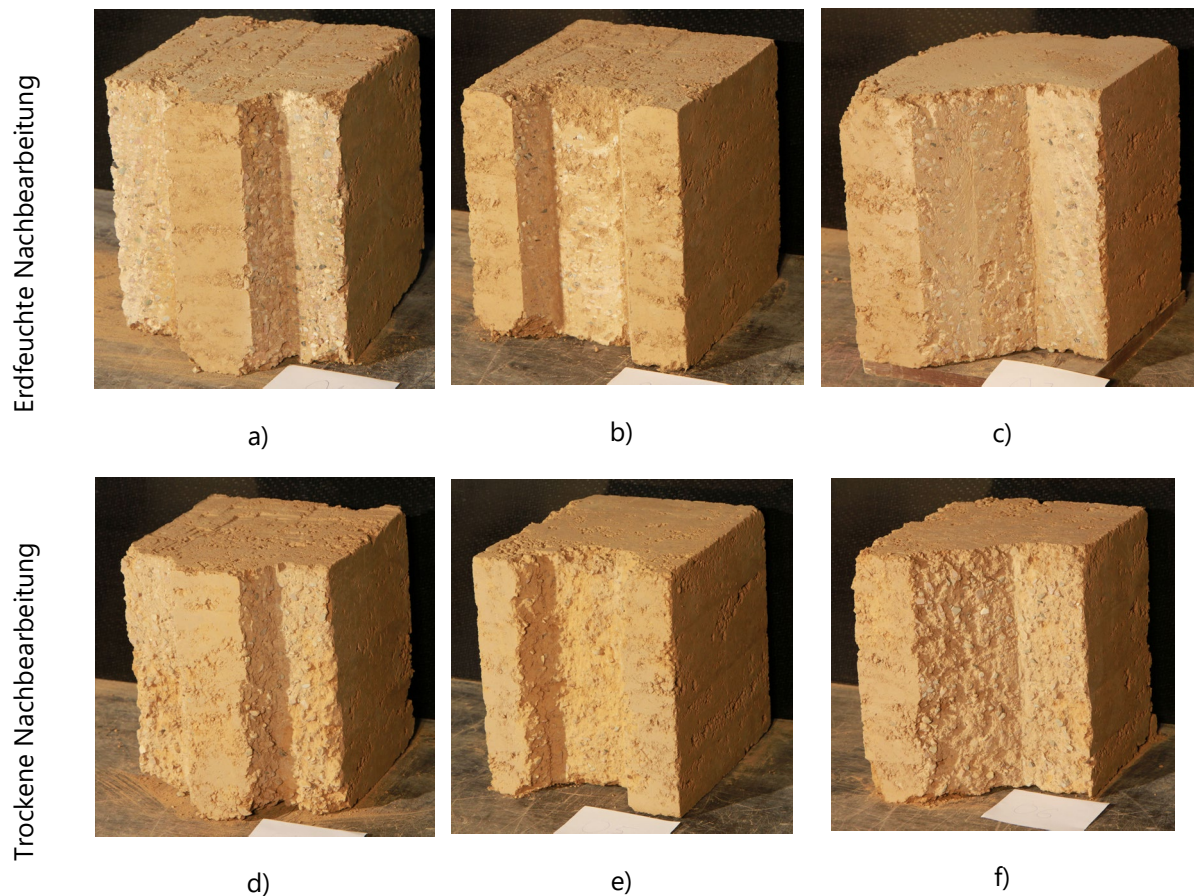


Abbildung 38: Subtraktiv nachbearbeitete Probekörper erdfeucht (a,b,c) und trocken (d,e,f) bearbeitet

3.5.2 Vermessung und Validierung

Die dreidimensionale Vermessung der Probekörper dient als Grundlage der Evaluierung der Schnittgeometrien. Dazu wurde das System ATOS der Firma GOM Metrology mit optischem 3D-Sensor am DBFL der TU Braunschweig genutzt. Die Verarbeitung sowie Auswertung der Daten wurde mittels firmeneigener Software durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Messungen waren alle Probekörper vollständig trocken und geometrische Veränderung aufgrund von Schwinden abgeschlossen. Es wurde jeder

Probekörper einzeln auf einer Drehscheibe umlaufend gescannt, die generierten Messpunkte wurden dann mit der CAD-Sollgeometrie verglichen und die Abweichung errechnet. Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen den Vergleich zwischen erdfeucht und trocken hergestellten Geometrien. Im Vergleich der dargestellten Graphen wird deutlich, dass im Fall der Nut-Geometrie eine Nachbearbeitung im erdfeuchten Zustand zu einer höheren Präzision der Geometrie führt, der größte Teil gemessener Punkte liegt hier im Bereich um $\pm 0,00$ mm Abweichung, zwischen $-2,50$ mm und $+2,50$ mm (Abbildung 39). Im Vergleich dazu liefert die Messung des trocken geschnittenen Probekörpers ein breit gefächertes Ergebnis mit Messwerten zwischen $-10,00$ mm und $+7,50$ mm Abweichung (Abbildung 40). Dieses Ergebnis bestätigt sich in der optischen Evaluierung der Probekörper, es gibt im trocken geschnittenen Fall große Materialausbrüche, vor allem an den Bauteilkanten.

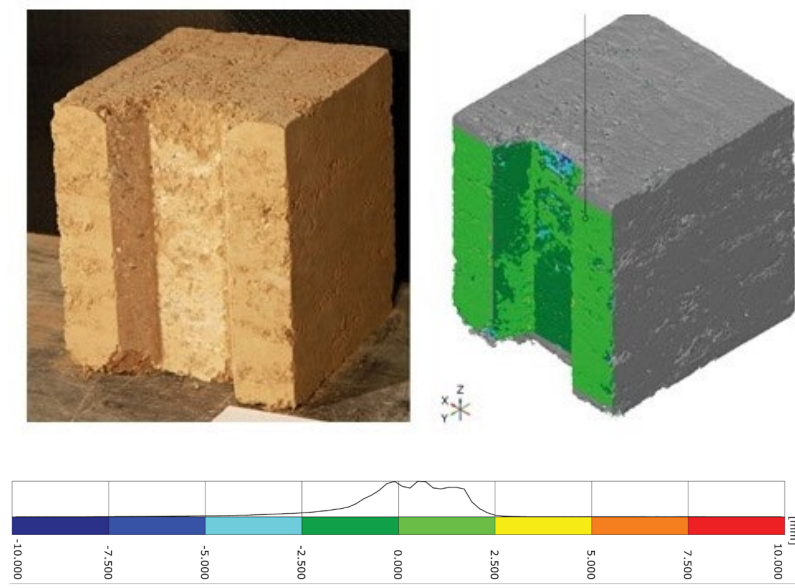


Abbildung 39: Messung der Schnittpräzision von erdfeucht nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- und Istgeometrie (Vergleich CAD Daten mit Punktwolke generiert mittels optischem Messverfahren)

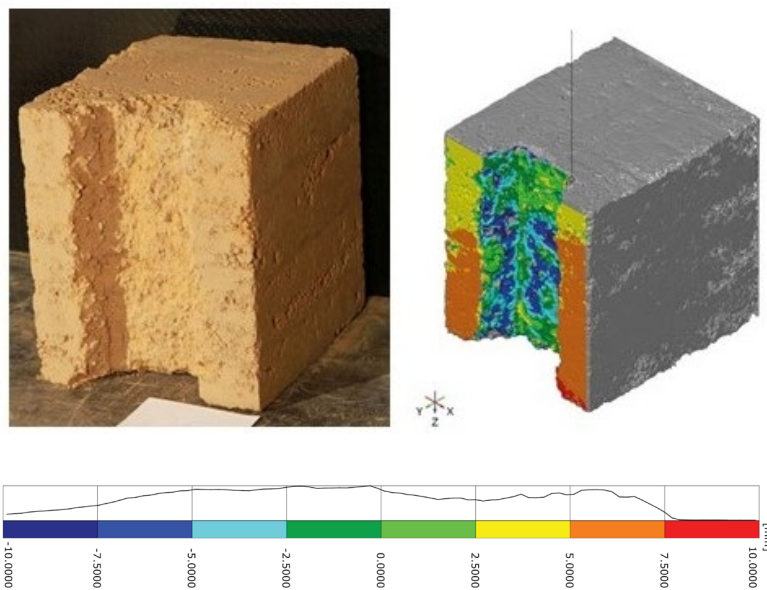


Abbildung 40: Messung der Schnittpräzision von trocken nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- und Istgeometrie (Vergleich CAD Daten mit Punktwolke generiert mittels optischem Messverfahren)

In den Abbildung 41 - Abbildung 43 ist der direkte Vergleich der Messwerte trocken und feucht bearbeiteter Bauteile dargestellt. Die Messpunkteanzahl zeigt in allen Graphen einen Anstieg im Bereich 0,00 mm (=keine Abweichung) und flacht zu den positiven und negativen Abweichungen hin ab. Im Vergleich zwischen trocken und nass fällt auf, dass die Kurve der nass bearbeiteten Bauteile im Bereich um 0,00 mm in der Regel über der Kurve der trocken bearbeiteten Bauteile liegt. Dies kehrt sich mit zunehmender Abweichung in positive, so wie negative Richtung um, sodass die rote Kurve („trocken“) in den Außenbereichen (abnehmende Präzision) tendenziell über der blauen Kurve („nass“) liegt. Dieser Trend ist vor allem in Abbildung 41 und Abbildung 43 klar erkennbar.

Ein durch Material-Schwinden hervorgerufener negativer Effekt auf die geometrische Präzision feucht bearbeiteter Elemente ist im Vergleich mit trocken bearbeiteten Probekörpern nicht festzustellen. Der isolierte Effekt des Schwindens auf die Präzision wurde jedoch nicht genauer betrachtet und sollte in tiefergehenden Studien untersucht werden.

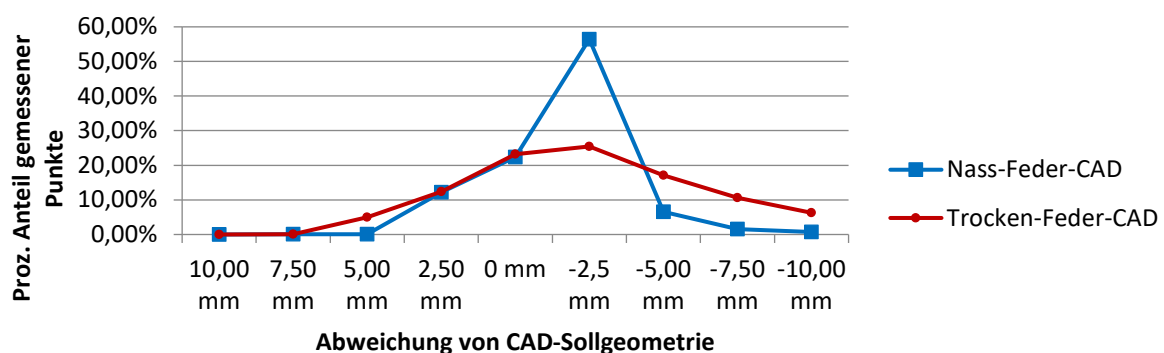


Abbildung 41: **Feder-Geometrie:** Vergleich der Schnittpräzision von trocken (rot) und feucht (blau) nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- (CAD) und Istgeometrie

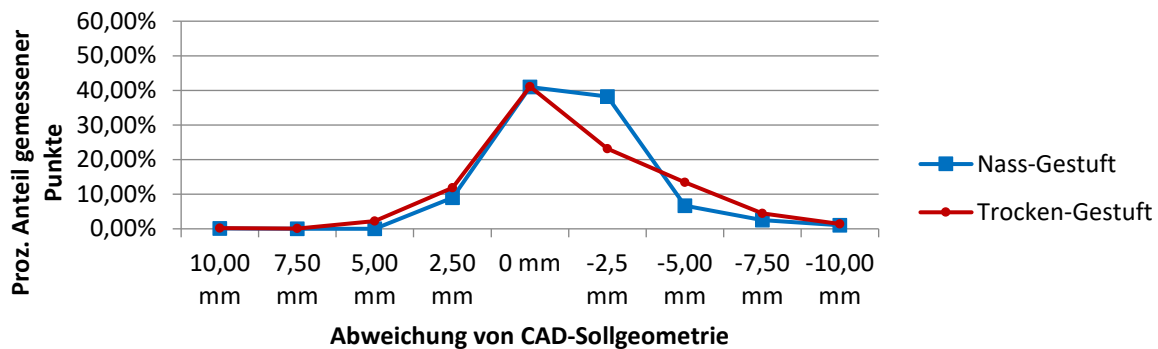


Abbildung 42: **Z-Geometrie:** Vergleich der Schnittpräzision von trocken (rot) und feucht (blau) nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- (CAD) und Istgeometrie

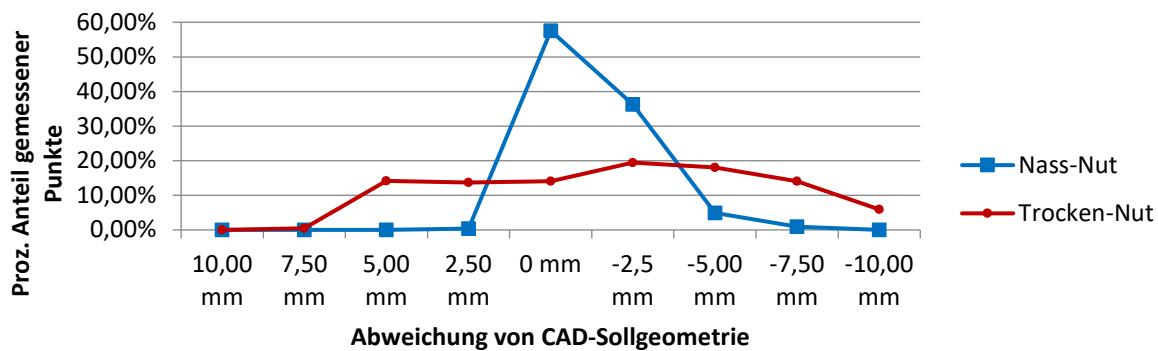


Abbildung 43: **Nut-Geometrie:** Vergleich der Schnittpräzision von trocken (rot) und feucht (blau) nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- (CAD) und Istgeometrie

Die Anwendung des CNC gesteuerten Kreissägeschnittverfahrens (KSV) ohne Wasserkühlung führt zu einer hohen Schnittqualität, wenn der Prozess direkt nach der Herstellung des Stampflehmkörpers hergestellt wird, das Material also noch feucht ist. Wird der Schnitt im trockenen Zustand durchgeführt, kommt es zu größeren Ausbrüchen, welche die Präzision und Oberflächenqualität der Schnittflächen negativ beeinflussen (Abbildung 44). Die digital gesteuerte CNC-Fertigung trägt dabei zu einer hohen erreichbaren geometrischen Präzision bei, welche potenziell ausreichend für die Herstellung von Trockenstoßverbindungen ist, hier sind tiefergehende Untersuchungen zur Kraftübertragung in einer Stampflehm-Stampflehm Trockenstoßverbindung und dem Auftreten von Spannungsspitzen bei geringem Elastizitätsmodul erforderlich.

Die verwendeten Werkzeuge sind grundsätzlich geeignet, Stampflehm subtraktiv zu bearbeiten, die favorisierte Bearbeitung im feuchten Materialzustand sollte sich positiv auf den Materialverschleiß auswirken, welcher ein kritischer Punkt hinsichtlich der massenhaften Fertigung bleibt und hinsichtlich der ökonomischen Bewertung beachtet werden sollte.

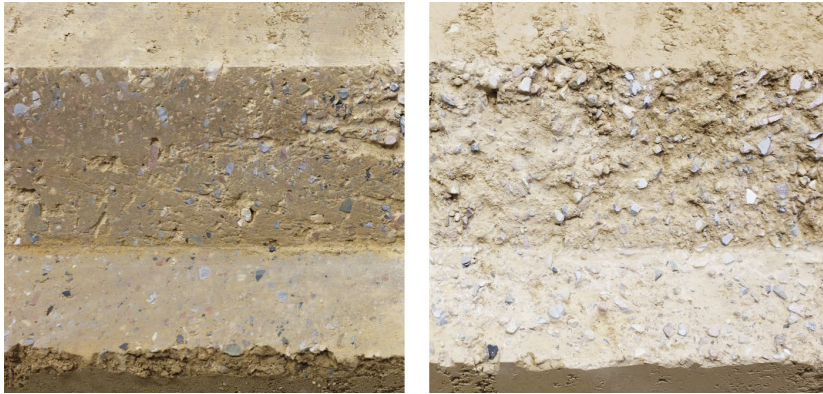
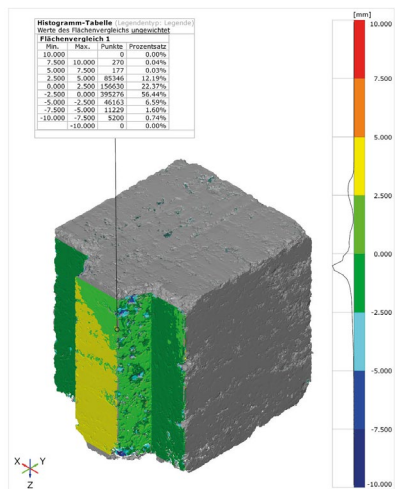


Abbildung 44: Vergleich der Schnittflächen von erdfeucht (links) und trocken (rechts) nachbearbeitetem Stampflehm

Messung **erdfeucht** nachbearbeiteter Probekörper



Messung **trocken** nachbearbeiteter Probekörper

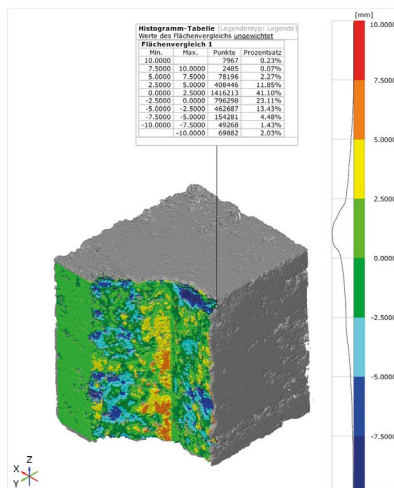
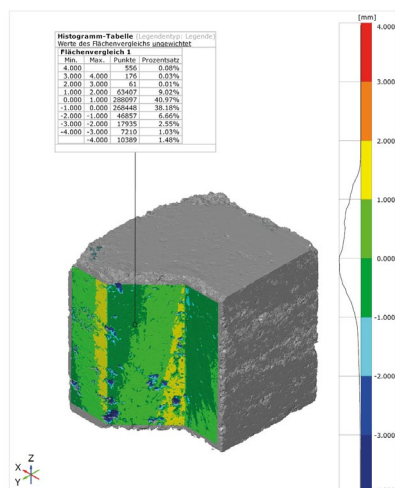
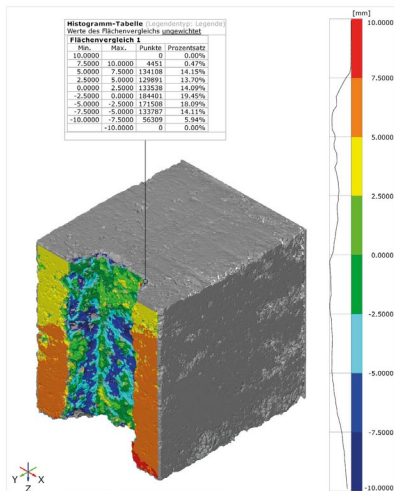
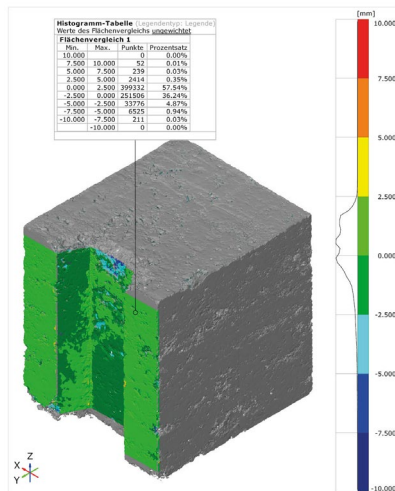
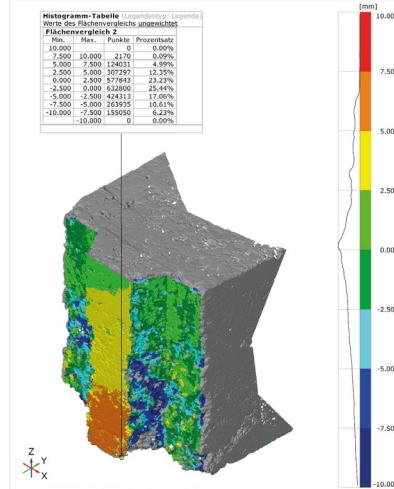
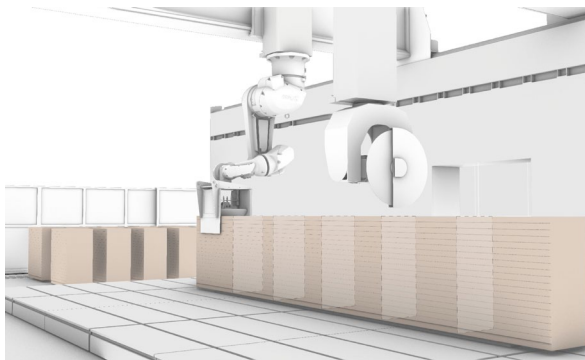


Abbildung 45: Messung der Schnittpräzision von trocken und erdfeucht nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- und Istgeometrie (Vergleich CAD Daten mit Punktwolke generiert mittels optischem Messverfahren)

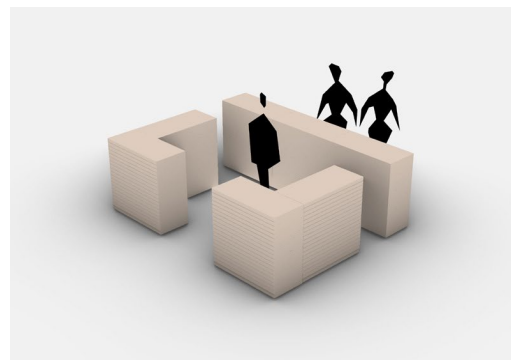
3.6 Robotische Stampflehmbar (Beitrag zum Zukunft Bau Pop-Up Campus 2022)

Für den Zukunft Bau Pop-Up Campus in Aachen wurde eine Stampflehm-Bar auf Basis der im Forschungsprojekt entwickelten Technologie in robotergestützter Fertigungstechnik hergestellt.

Erklärtes Ziel des Projekts ist die Weiterentwicklung der robotischen Stampflehmtechnik und die Erweiterung der Produktion von Einzelelementen hin zu einer rationalisierten Herstellungsmethode. Dabei steht nunmehr die Effizienz der Produktion im Vordergrund: Die Herstellung übergroßer Elemente in einem durchlaufenden Produktionsverfahren und anschließendem Zuschneiden auf Fertigteilgröße (Abbildung 46 a) bedeutet einen weiteren Schritt in Richtung bauwirtschaftlicher Effizienz der robotischen Stampflehmtechnik. Die Herstellung der wandartigen Elemente und Nutzung als Theken-Elemente auf dem Pop-Up Campus (Abbildung 46 b, Abbildung 47) dient dazu, die Herstellungsmethode inklusive aller relevanter Prozessschritte in anschaulicher- und im Kontext des Pop-Up Campus gut nutzbarer Weise zu erforschen. Dabei spielen insbesondere das Zerteilen der übergroßen Wandelemente, sowie die Beschaffenheit der Bauteilunterlage und das Handling der Elemente eine übergeordnete Rolle.



(a)



(b)

Abbildung 46: Schematische Darstellung: Schneiden übergroßer Elemente in transportgerechte Bauteile (a) und Anordnungsmöglichkeit (b)

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die direkt mit dem Pop Up Campus im Zusammenhang stehenden, durchgeführten Arbeitsschritte:

3.6.1 Voruntersuchungen zur Zerteilung wandartiger Elemente

Es wurden Untersuchungen anhand von Schneidversuchen auf voller Bauteilstärke zum Segmentieren von Stampflehmelementen am Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) der TU Braunschweig durchgeführt. Für das Zerteilen der Elemente sind grundsätzlich verschiedene Verfahren denkbar, die auch in der Stein- bzw. Betonverarbeitung angewendet werden. Hier sind vor Allem das Schneiden und Fräsen mittels CNC gesteuerter Diamantkreissäge und Flächenfräser (Verfahren A, Abbildung 45 a,b), sowie das Diamantseilsäge-Verfahren (Verfahren B, Abbildung 47 c) zu nennen.

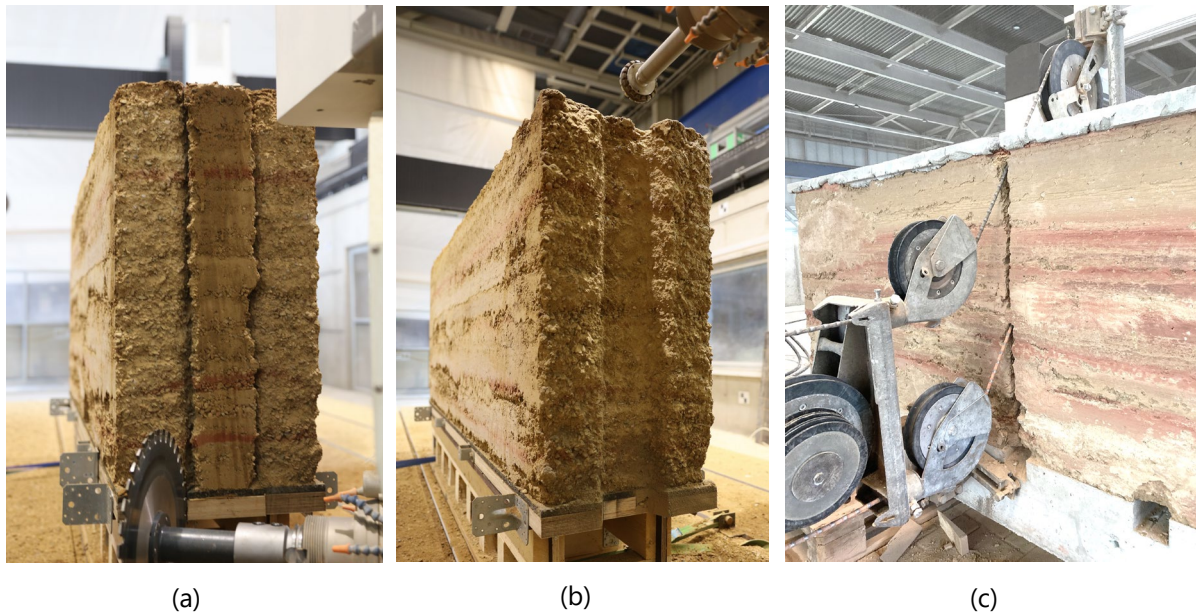


Abbildung 47: Schneiden von Stampflehm mittels CNC gesteuerter Diamantkreissäge (a), Diamant-Flächenfräser (b) und mittels Diamantseilsäge-Verfahren (c)

Anhand von Vorversuchen zeigte sich, dass Verfahren A gut geeignet ist, um präzise Geometrien (z.B. für die Herstellung von Geometrien für Trockenstoßverbindungen) herzustellen, solange das Bauteil eine ausreichende Restfeuchte aufweist. Nach vollständiger Trocknung des Bauteils führt die Anwendung des Verfahrens zu einer deutlich reduzierten Präzision (s. Kapitel 3.5). Deshalb und aufgrund eines erhöhten Materialverschleiß und erschwerter Logistik durch die Begrenzte Eintauchtiefe (u.a.) ist Verfahren A nur bedingt geeignet hinsichtlich des Zerteilens von vorgetrockneten Bauteilen auf gesamter Stärker.

Verfahren B weist im Vergleich durch die Seilgeometrie eine kleinere Kontaktfläche auf, wodurch die Reibung und die Tendenz, größere Aggregate auszubrechen reduziert werden kann. Zusätzlich bietet der verhältnismäßig große Teil des Seils, der sich außerhalb der Schnittgeometrie befindet die Möglichkeit, das Seil gezielt, extern zu kühlen ohne Wasser in die Schnittfläche einzubringen. Die Verwendung von Diamantseilsägen in der subtraktiven, robotischen Fertigung wurde von Fernando et al. [Fer2017] beschrieben. Aus diesen Gründen ist Verfahren B für die Herstellung von gradlinigen, orthogonal zur Bauteiloberfläche verlaufenden Schnitt-Geometrien potenziell gut geeignet.

3.6.2 Zerschneiden übergroßer Elemente in einzelne Segmente

Das Wandelement wurde in einer Länge von 2,50m mit dem robotischen Stampflehmverfahren an der TU Braunschweig hergestellt. In das wiederverwendbare Fundament aus Stahlbeton wurden Holzkeile integriert, die nach Herstellung der Stampflehmelemente herausgeschlagen wurden um die Elemente nach dem Schnitt ohne Probleme von der Unterlage abnehmen zu können. Für die Herstellung der Stampflehmelemente wurde ein feiner Grubenlehm benutzt mit einem Größtkorn von 8 mm.

Das Bauteil wurde in Segmente von 1,25 m Länge mittels Diamantseil-Säge-Verfahren zerteilt (Abbildung 47 b). Das Zerteilen von Stampflehm mit dem genannten Verfahren weist einige essentielle Unterschiede zum Schneiden von Stahlbeton auf, wofür das Verfahren ursprünglich entwickelt wurde. Im Stahlbetonbau wird das Seil je nach Verfahren auf einer Seite durch Umlenkrollen gespannt und ist somit auf den Gegendruck durch das zu zerteilende Werkstück angewiesen, gibt das Material nach, verliert das Seil die Spannung und die Antriebsrolle verliert die Haftung zum Seil, was zu einem Stillstand des Systems führt. Stampflehm (Elastizitätsmodul ca. 600 N/mm^2) ist im Vergleich zu Beton (E-Modul über 25.000 N/mm^2) ein vergleichsweise „weicher“ Baustoff, zudem kommt, dass Stampflehm verglichen mit Beton eine geringe Abriebfestigkeit aufweist, was dazu führt, dass schon eine geringe

Geschwindigkeit zu einer hohen Abrasion führt. Das Nachspannen des Seils muss also im Vergleich viel schneller geschehen, als es beim Zerteilen von Betonbauteilen der Fall wäre, um den Anpressdruck aufrecht zu erhalten. Eine weitgehend materialunabhängige Spannung des Seils kann durch beidseitige Spannung erreicht werden.

3.6.3 Fügeprinzipien

Durch die CNC gesteuerte Nachbearbeitung von Stampflehm können präzise Fügegeometrien hergestellt werden (s. Kapitel 3.5), sodass Systeme bestehend aus Nut- und Federgeometrien realisierbar sind. Dabei können unterschiedliche Materialien miteinander kombiniert werden und Materialwechsel ohne weitere Verbindungsmittel durchgeführt werden.

In der Konzeptionierung der Verbindung der aufliegenden Platte wurde die Verbindung eines Stampflehmbauteils mit einer Holzplatte mittels Nut-Feder-Verbindung konzeptionell anhand von Modellversuchen im 1:1 Bauteilmaßstab überprüft. Abbildung 48 a zeigt das Konzept, sowie Modelle im 1:1 Maßstab (Abbildung 48 b und c): Eine Holzplatte mit Feder auf der Unterseite wird passgenau auf ein Stampflehm-Element mit entsprechender Nut aufgesetzt, sodass die Bewegung in Querrichtung verhindert wird. Durch das Fügeprinzip können Stampflehm-Bauteile horizontal über bauteilübergreifende plattenartige Holzverbinder trocken miteinander verbunden werden.

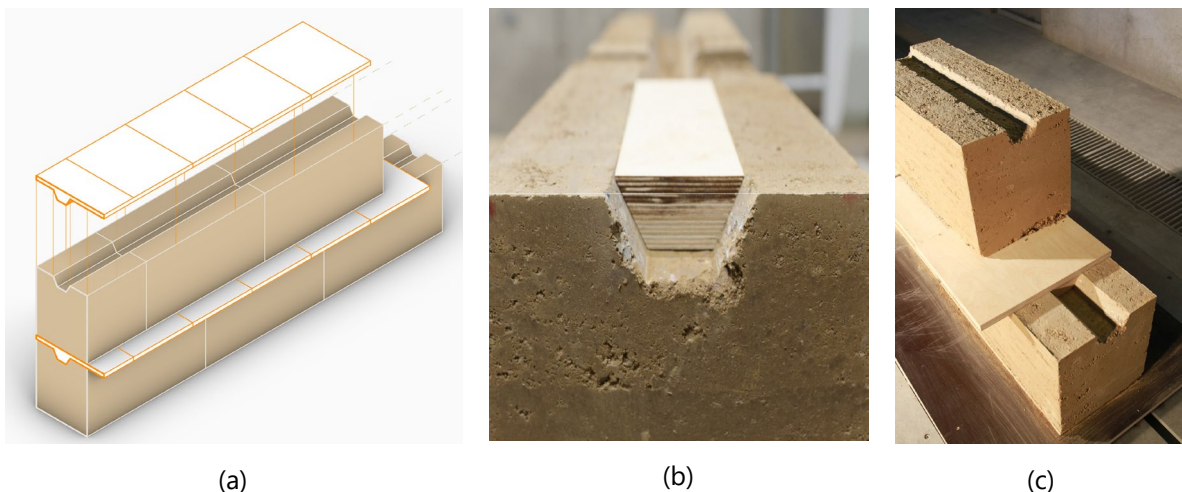


Abbildung 48: Verbindung zwischen Holzplatte und Stampflehmsegment: Axonometrische Konzeptdarstellung (a), Detailaufnahme Stampflehm-Nut und Holz-Feder (b), 1:1 Konzeptmodell (c); Abbildungen: Valentin Bernhardt

Im weiteren Verlauf der Vorversuche wurde die Verwendung recycelter Platten aus 3D-gedrucktem Beton untersucht. Die plattenförmigen Versuchskörper stammen aus Bauteilversuchen im Zuge der Erforschung des Shotcrete-3D-Printing-Prozesses. Der Vorteil in der Verwendung von recyceltem Beton als Thekenoberfläche wurde in der Abwaschbarkeit und Wetterbeständigkeit, sollte die Theke der Witterung ausgesetzt sein gesehen. Im Zuge der Vorarbeiten für den Pop-Up Campus stellte sich eine getrennte Anordnung der Bar-Elemente aufgrund der örtlichen Gegebenheiten auf dem Pop-Up Campus als favorisiert heraus, weshalb keine direkte Verbindung der Elemente notwendig war.

Eine sortenreine Trennbarkeit der Materialien sollte gewährleistet werden, weshalb die Verbindung allein durch geometrische Fügung und das Eigengewicht hergestellt wurde. Dafür wurden die Platten am DBFL subtraktiv bearbeitet und auf der jeweiligen Unterseite passgenaue Formen ausgefräst, sodass sich eine

Verzahnung zwischen der jeweiligen Platte und dem Stampflehmbauteil ergibt. So entsteht ein umlaufender Rand, welcher den oberen Teil des Stampflehmelements verdeckt, die Platten sind somit nicht, wie die Ansicht suggeriert massiv, vielmehr hohl, sodass sie wie Deckel den Abschluss der Stampflehmelemente bilden.



Abbildung 49: Stampflehmelemente hergestellt in robotischer Fertigungsweise

Die beiden Theken-Elemente (Abbildung 49) wurden nach Herstellung zum Pop-Up Campus nach Aachen transportiert und dort aufgebaut, die Herstellung der Stampflehmelemente erfolgte am DBFL der TU Braunschweig als Bauteilversuch innerhalb des Forschungsprojekts (s. Kapitel 3.2.5). Die Herstellung der Bar-Elemente simuliert die Vorfertigung von Stampflehmelementen unter Laborbedingungen, von der Herstellung der Elemente bis zum Zerteilen und der logistischen Abfertigung wurde der Gesamtprozess erstmalig vollständig durchgeführt, was weitreichende Erkenntnisse zu den einzelnen Prozessschritten brachte und so einen wichtigen Beitrag hinsichtlich der industriellen Anwendung der robotischen Stampflehmtechnik darstellt.

3.7 Wirtschaftliche Aspekte

Der Anteil von Lehmprodukten im Vergleich zur gesamten Baustoffproduktion ist verschwindend gering. Horst Schröder [Sch2018] attestiert dem Lehmbau jedoch einen stabil wachsenden Markt in den letzten 25 Jahren bei kaum wachsendem jährlichem Gesamtbauvolumen. Der Umsatzzuwachs kann laut Schröder also nur über eine Umverteilung der Marktanteile erreicht werden. Dem spielen ein neues allgemeines ökologisches Bewusstsein und politisch forcierte Klimaschutzprogramme (Emissionshandel, Europäische Förderprogramme zur „Dekarbonisierung in der Industrie“, etc.) positiv in die Karten. Bei den traditionellen Lehmbaufirmen fehlen vielfach die finanziellen Mittel, um große Investitionen in moderne Anlagen zu tätigen und finanzstarke Baustoffhersteller anderer Bereiche erkennen den geringen Marktanteil des Lehmbaus (noch) nicht als lohnenswert für Investitionen in den Bereich. Künftige Mehrkosten bei der Herstellung von CO₂-intensiven Baustoffen in Kombination mit politischen Förderprogrammen zur Reduzierung von produktionsbedingten Emissionen bieten Potenziale zur Steigerung der Attraktivität des „Lehmmarktes“ für Produzenten von herkömmlichen Baustoffen.

Hoher individueller Planungsaufwand und ein enormer manueller Arbeitsaufwand lassen die Kosten im Bereich des Stampflehmbaus explodieren womit Stampflehm zu einem sehr exklusiven Baustoff wird, der vorrangig in öffentlichen Prestigeprojekten oder im hochpreisigen Einfamilienhausbau Anwendung

findet. Die zur Verfügung stehenden Daten für die Bewertung wirtschaftlicher Aspekte aus anerkannten Quellen beziehen sich zu einem Großteil auf die in-situ-Verarbeitung von Stampflehm. Laut Ziegert [Zie2021] kostet die Herstellung einer 30 cm starken Wand aus Stampflehm mit Sichtoberfläche zwischen 371,24 €/m² und 1091,24 €/m². Im Vergleich wird die Sichtbetonwand gleicher Dicke mit 176,57 €/m² angegeben.

Die industrielle Produktion von Lehmbaustoffen kann hier regulierend auf die enormen Baukosten einwirken und so den Stampflehmbau für weniger hochpreisige Bauaufgaben verfügbar machen. In einem industriellen Szenario können 20 Meter Stampflehm in einem Stück gefertigt, und hinterher präzise in Einzelteile geschnitten werden. Bei einer realistischen Fertigungsgeschwindigkeit von 5 cm/Sekunde, einer Lagenhöhe von 2 cm und einer Verzögerung von 20 Sekunden pro Lage für das Umschalten der Motoren kann das großformatige Bauteil ($l \times h \times b = 20\text{m} \times 1\text{m} \times 0,30\text{m}$) in 5,8h hergestellt werden. Das bedeutet eine Fertigungsgeschwindigkeit von rund 1 m³/h in einer eingestellten industriellen Produktionsanlage. Hinzu kommt der Arbeitsaufwand für das Schneiden (3,17h) und die Logistik (3,0h). Insgesamt beträgt in dem Szenario der Zeitaufwand also 12 Stunden für die Fertigung von 20 m² Stampflehm. Für die Personal- bzw. Maschinenkosten wird davon ausgegangen, dass die maschinelle Fertigung von einer Fachkraft durchgehend (Personalkosten 48€/h) betreut werden muss. Die Maschinenstunde wird auf Grundlage der Maschinenstunden am Digital Fabrication Laboratory mit 20 €/h angenommen. Aufgrund der Vergleichbarkeit werden die Materialkosten mit 115 €/t angenommen (dies entspricht den Materialkosten von Stampflehm in Big Bags), hier ist zu sagen, dass ein industriell agierendes Lehmbauunternehmen vorzugsweise eigene Lehmgruben besitzt und die Stampflehmmischung vor Ort herstellt. Die Materialkosten für 13,2 t Stampflehm belaufen sich also auf 1.518 €.

Die Gesamtkosten der Fertigung ergeben sich aus den folgenden Positionen:

Facharbeiter	48 €/h; 12h	576,- €
Maschinenstunden	20 €/h; 12h	240,- €
Rohmaterial	115 €/t; 13,2t	1.518,- €
Gesamt:		2.334,- €

In Bezug auf die Produktionsmenge von 6m³ ergeben sich Produktionskosten von 129,54,-€/m³ bzw. 389,00,-€/m³. Wenn die industriellen Produktionskosten nun den eingangs erwähnten Kosten der in-situ Herstellung gegenübergestellt werden, ergibt sich eine Kostendifferenz der industriellen, robotischen Herstellung von -65% der reinen Produktionskosten im Vergleich zum günstigsten Fall der in-situ Herstellung. Es muss angemerkt werden, dass es sich bei der Kalkulation um allgemeine Richtwerte handelt, die lediglich eine Tendenz abbilden können. Aufgrund kaum realistisch einschätzbarer Werte sind weder Investitions-, Abschreibungs-, noch Logistikkosten (Werk-Baustelle) aufgeführt.

3.8 Öffentlichkeitsarbeit und Ergebnisverwertung

Während der Projektlaufzeit wurden verschiedene Fachvorträge gehalten und Veröffentlichungen in Form von Videos und Artikeln in Fachzeitschriften veröffentlicht. Dazu zählen die Veröffentlichung eines Artikels zur robotergestützten Fabrikation von Stampflehmelementen in der Deutschen Bauzeitschrift (DBZ), Fachvorträge vor Studierenden des „Natural Building Lab“ der TU Berlin (Prof. Eike Roswag) und Studierenden des Digital Building Fabrication Studio (DBFS) der TU Braunschweig. Das Forschungsprojekt wurde außerdem in das Finale der diesjährigen DGNB Sustainability Challenge

gewählt, für die Teilnahme an dem Award wurden mehrere Kurzvorträge gehalten, sowie ein Video produziert, welches auf der Internetpräsenz des DGNB, sowie auf Youtube und Instagram veröffentlicht wurde. Hinzu kommen Präsentationen im „Research Network for Advancing Architecture, Engineering and Construction“ (AdvanceAEC) sowie Workshops und Seminaren.

Mit dem vorliegenden Forschungsbericht werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf den Internetseiten der Forschungsinitiative Zukunft Bau (www.forschungsinitiative.de) und des Fraunhofer IRB (www.baufachinformation.de) der interessierten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Es gibt ein vom Projektträger Jülich gefördertes Anschlussprojekt an das vorliegende Forschungsprojekt mit dem Titel „Mobiler, robotischer Stampflehm: Vom Labor zur Baustellenfertigung“. In welchem die Möglichkeiten einer Baustellenfertigung mit Verwendung von lokalem Material untersucht und entwickelt werden. Das Projekt ist Teil des WIR! Bündnisses und „Golehm“ – einer Initiative für Lehm- und nachhaltige Kreislaufwirtschaft im mitteldeutschen Raum.

4 Literaturverzeichnis

- [Sta2017] Statistisches Bundesamt, „Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Umweltschutzmaßnahmen“, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017. [Online] Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Publikationen/Umweltnutzung-Wirtschaft/umweltnutzung-und-wirtschaft-tabelle-5850007187006-teil-4.pdf?__blob=publicationFile&v=5. Zugriff am: 20. Mai 2021.
- [Bun2019] Bund Deutscher Architekten BDA, Hg., „Das Haus der Erde: Positionen für eine klimagerechte Architektur in Stadt und Land“, Berlin, 2019. [Online] Verfügbar unter: https://bda-bund.de/wp-content/uploads/2019/04/Das_Haus_der_Erde_.pdf. Zugriff am: 20. Mai 2021.
- [Jaq2008] P. A. Jaquin, C. E. Augarde und C. M. Gerrard, „Chronological Description of the Spatial Development of Rammed Earth Techniques“, *International Journal of Architectural Heritage*, Jg. 2, Nr. 4, S. 377–400, 2008.
- [Web2017] M. Webster-Mannison, „Thurgoona Campus“ in *Materials for a Healthy, Ecological and Sustainable Built Environment*, Elsevier, 2017, S. 287–308.
- [Dan2018] H. Danso, „Suitability of Soil for Earth Construction as Building Material“, 2018.
- [Min2013] G. Minke, *Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture*. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013.
- [Min2000] Minke, G.: *Earth Construction Handbook. The building Material Earth in Modern Architecture*. WIT Press, Southampton, UK, 2000.
- [Pie1997] F. Pierce, „The concrete jungle overheats“, *New Scientist*, issue 2091, Jul. 1997. [Online] Verfügbar unter: <http://www.newscientist.com/article/mg15520912.200->. Zugriff am: 20. Mai 2021.
- [Ped2014] P. Peduzzi, „Sand, rarer than one thinks“, *UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS)*, 2014.
- [Man2003] V. Maniatidis und P. Walker, „A Review of Rammed Earth Construction: for DTi Partners in Innovation Project ‘Developing Rammed Earth for UK Housing’“, University of Bath, Bath, 2003.
- [Kea1996] J. Keable: *Rammed Earth Structures: A code of Practice*. London, England: Intermediate Technology Publications, 1996.
- [Vol2009] F. Volhard, U. Röhlen, Hg.: *Lehmbau Regeln: Begriffe – Baustoffe – Bauteile*, 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [Klo2019] H. Kloft, J. Oechsler, C. Delille, J. Gossler und F. Loccarini: *Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm*, in Heft 7/8/2019, *Deutsche Bauzeitschrift: Regionales Bauen*, Bauverlag, Hg., Gütersloh, S. 54-59, 2019.
- [Sch2012] H. Schroeder: *Modern earth building codes, standards and normative development*. In: *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, S. 72-109, 2012.

-
- [Mid1987] G.F. Middleton, L.M. Schneider: Earth-wall Construction. National Building Technology Centre, 1987.
- [Ávi2020] Ávila, F., Puertas, E., & Gallego, R.: Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: A review. *Construction and Building Materials*, 121435, 2020.
- [Bui2014] Bui, T.-T., Bui, Q.-B., Limam, A., Maximilien, S.: Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications, *Construction and Building Materials*, Volume 51, Pages 295-302, 2014.
- [Sch2018] H. Schröder: *Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen*, 3. Aufl. Weimar: Springer Vieweg, 2018.
- [Zie2021] C. Ziegert: *Lehmbau für Architekten und Ingenieure: Stampflehmbau*, Weimar. 2021
- [Fer2017] S. Fernando, D. Reinhardt, S. Weir: Waterjet and wire-cutting workflows in stereotomic practice. In: *Protocols, Flows and Glitches*, Proceedings of the 22nd International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia. Hong Kong, China: CAADRIA, 2017

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kleinmaßstäbliche Voruntersuchungen zur robotischen Fertigung von Stampflehmteilen mittels aktiv geführter Gleitschalung und pneumatischer Verdichtung	6
Abbildung 2: Elektronische Rüttelplatte, entwickelt am FEB der Universität Kassel [Min2013]	11
Abbildung 3: Verdichtungsgerät 1 mit Unwuchtmotor Eviro A10-5.4-2 und veränderlichen Gewichten	11
Abbildung 4: Verdichtungsgerät 2 mit Unwuchtmotor Eviro A30-18,2-2 und pneumatischen Randverdichtern	11
Abbildung 5: Verdichtungsbild des Stampflehms. (a) Seitenansicht von drei verdichteten Lagen; (b) Oberflächiges Verdichtungsbild; (c) Close-Up des seitlichen Verdichtungsbilds.....	13
Abbildung 6: Seitenansicht der Gleitschalung und Verdichtungsgerät	14
Abbildung 7: Gleitschalung mit zu öffnender Schalungsseite und integrierter Stirnseitenschalung	15
Abbildung 8: Zwei Konzepte für das Schalen der Bauteil-Stirnseiten. (a) Aktive, integrierte Stirnseitenschalung; (b) Statisch montierte Stirnseitenschalung	15
Abbildung 9: Aktive Stirnseitenschalung. Die Schalungstore können aktiv in Z-Richtung (+/-) bewegt werden und erlauben so das Schalen der Stirnseiten am Bauteilende	16
Abbildung 10: Materialkorb zur CNC-gesteuerten Beschickung. (a) Materialkorb in Warteposition; (b) Materialkorb während Beschickung; (c) Eine beschickte Lage vor dem Verdichtungsprozess	16
Abbildung 11: Beschickung einer Lage: Passiver Materialkorb an aktivem CNC-Portal	17
Abbildung 12: Fertigungsprozess im Bauteilversuch.....	17
Abbildung 13: Bauteilversuch im 1:1 Bauteilmaßstab.....	17
Abbildung 14: Kooperativer Prozess für die Materialbeschickung und Materialverdichtung.....	19
Abbildung 15: Robotischer Endeffektor bestehend aus aktiver Gleitschalung und Verdichtungsgerät (a); Stampflehm-Bauteil 250 x 45 x 100 cm (b).....	20
Abbildung 16: Oberflächenbeschaffenheit und Lagenhöhe von manuell- und robotisch verdichtetem Stampflehm	20
Abbildung 17: Statische Schalung zum Erstellen von Probekörpern	21
Abbildung 18: Der Probekörper wird von einer CNC gesteuerten Kreissäge in Probewürfel (20x20x20 cm) zerschnitten	22
Abbildung 19: Das Resultat des Schneideversuchs: Stampflehmprobewürfel mit Kantenlängen von 20 cm	22
Abbildung 20: Druckfestigkeitstests am IBMB, Probewürfel vor dem Drucktest	25
Abbildung 21: Druckfestigkeitstests am IBMB, Probewürfel nach dem Drucktest	25
Abbildung 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Händisch verdichtete Referenz-Probewürfel	28
Abbildung 23: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Vergleich verschiedener Verhältnisse Lagenhöhe/Größtkorn (Versuchsreihe 2: 1:1,36; Versuchsreihe 4: 1:6,25; Versuchsreihe 5: 1:3,75)	28
Abbildung 24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Versuchsreihe 4.....	28
Abbildung 25: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Versuchsreihe 5.....	28

Abbildung 26: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Vergleich der Versuchsreihen.....	29
Abbildung 27: Übersicht der beteiligten Systeme und Kommunikation im Beschickungsprozess.....	30
Abbildung 28: Übersicht der beteiligten Systeme im Verdichtungsprozess.....	31
Abbildung 29: RS-485 USB Adapter	32
Abbildung 30: Integrierte RS-485-Kommunikation mit Modbus-RTU Protokoll am Frequenzumrichter.....	32
Abbildung 31: Benutzeroberfläche der entwickelten Software	33
Abbildung 32: Fügestrategien auf Grundlage des Nut-Feder-Systems. (links) mit Spundung (rechts) mit Feder	34
Abbildung 33: Schnittgeometrien; Versuchsreihe zur subtraktiven Nachbearbeitung von Stampflehm	34
Abbildung 34: Subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm mittels CNC-gesteuerter Diamantkreissäge (DKS).....	35
Abbildung 35: Subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm mittels Diamant Flächenfräser mit Ø 91mm	35
Abbildung 36: Subtraktive Nachbearbeitung von Stampflehm mittels Diamant Fingerfräser mit Ø 22mm	35
Abbildung 37: Brechen von Material im Zuge eines Unterschnitts	35
Abbildung 38: Subtraktiv nachbearbeitete Probekörper erdfeucht (a,b,c) und trocken (d,e,f) bearbeitet	36
Abbildung 39: Messung der Schnittpräzision von erdfeucht nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- und Istgeometrie (Vergleich CAD Daten mit Punktwolke generiert mittels optischem Messverfahren).....	37
Abbildung 40: Messung der Schnittpräzision von trocken nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- und Istgeometrie (Vergleich CAD Daten mit Punktwolke generiert mittels optischem Messverfahren).....	38
Abbildung 41: Feder-Geometrie: Vergleich der Schnittpräzision von trocken (rot) und feucht (blau) nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- (CAD) und Istgeometrie	38
Abbildung 42: Z-Geometrie: Vergleich der Schnittpräzision von trocken (rot) und feucht (blau) nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- (CAD) und Istgeometrie	39
Abbildung 43: Nut-Geometrie: Vergleich der Schnittpräzision von trocken (rot) und feucht (blau) nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- (CAD) und Istgeometrie	39
Abbildung 44: Vergleich der Schnittflächen von erdfeucht (links) und trocken (rechts) nachbearbeitetem Stampflehm	40
Abbildung 45: Messung der Schnittpräzision von trocken und erdfeucht nachbearbeiteten Stampflehmelementen mittels Vergleich zwischen Soll- und Istgeometrie (Vergleich CAD Daten mit Punktwolke generiert mittels optischem Messverfahren)	41
Abbildung 46: Schematische Darstellung: Schneiden übergroßer Elemente in transportgerechte Bauteile (a) und Anordnungsmöglichkeit (b)	42
Abbildung 47: Schneiden von Stampflehm mittels CNC gesteuerter Diamantkreissäge (a), Diamant-Flächenfräser (b) und mittels Diamantseilsäge-Verfahren (c)	43

Abbildung 48: Verbindung zwischen Holzplatte und Stampflehmsegment: Axonometrische Konzeptdarstellung (a), Detailaufnahme Stampflehm-Nut und Holz-Feder (b), 1:1 Konzeptmodell (c); Abbildungen: Valentin Bernhardt	44
Abbildung 49: Stampflehmelemente hergestellt in robotischer Fertigungsweise.....	45

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialkennwerte des Rohmaterials.....	8
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Verwendung von pneumatischen Stampfern sowie einer Rüttelplatte für die Verdichtung von Stampflehm in Kombination mit einer Gleitschalung.....	10
Tabelle 3: Evaluation Verdichtungseigenschaften des Verdichtungsgerät 1	12
Tabelle 4: Technische Daten der verwendeten Unwucht-Motoren	13
Tabelle 5: Versuchsreihe zu verschiedenen Subtraktionsparametern.....	23
Tabelle 6: Einstellen der Fliehkraft des Unwuchtmotors und resultierende Fliehkraft (Quelle: Eviro)	25
Tabelle 7: Verdichtungsparameter der durchgeführten Versuchsreihen. RP=Rüttelplatte, PS=Pneumatischer Stampfer, M=Manuelle Verdichtung	26
Tabelle 8: Verdichtungsparameter der Versuchsreihen.....	26
Tabelle 9: Prüfergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen	27
Tabelle 10: Im Prozess verwendete Steursignale	32

7 Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Kloft, Harald (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Gosslar, Joshua (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Fernández-Barba, Daniel (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Weitere Mitwirkende

Oechsler, Johannes (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Delille, Charlotte (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Müller, Christoph (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Meshkini, Annahita (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Stümmler, Anja (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Sonntag, Benedikt (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Ciftci, Can (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)

Bernhardi, Valentin (Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig)