Hochschule Konstanz
Fakultät Bauingenieurwesen

Marktbedarf, technologische Entwicklung, Stand der Technik nachhaltiger Baumethoden unter Verwendung neuer exponentieller Technologien der Vierten Industriellen Revolution

Bachelorthesis

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Verfasser:	Christopher Jonathan Huhn
Matrikelnummer:	[redacted]
Studiengang:	Bauingenieurwesen
Anschrift:	[redacted]

Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. Michael Bühler, MBA, PMP, P.Eng.
Hochschule:	HTWG – Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung
Fakultät:	Bauingenieurwesen
Anschrift:	Alfred-Wachtel-Straße 8
	78462 Konstanz

ausgegeben am:	01.08.2021
eingereicht am:	31.10.2021

Inhalt

Der Inhalt dieser Arbeit befasst sich mit der Erläuterung von Technologien der Industrie 4.0. Diese Technologie soll in Verbindung mit einem Stampfprozess die altbewährte Stampflehmbauweise wieder mehr ins Leben rufen. Dabei soll in dieser Arbeit über die technischen Funktionalitäten, die relevanten Parameter sowie über den Stand der Technik aufgeklärt werden. Darüber hinaus wird in einer Markabschätzung das Potential des Stampflehms als nachhaltige Baumethode und Ersatz für anderweitige Baumethoden untersucht. Hierbei werden die Vor- und Nachteile nochmals aufgezeigt, um eine bessere Beurteilung möglich zu machen. Die Meinungen und Erfahrungen von Experten sind in dieser Arbeit aufbauend miteingeflossen.

Abstract

The content of this thesis deals with the explanation of technologies of Industry 4.0. In connection with a ramming process and this new technology is intended to bring the well-tried and tested rammed earth construction back to life. This thesis would explain the technical functionalities, the relevant parameters and the state of the art. In addition, the potential of rammed earth as a sustainable construction method and a substitute for other construction methods is being examined in a market assessment. The advantages and disadvantages were shown again in order to make a better assessment possible. The opinions and experiences of experts have been incorporated into this work.

Inhaltsverzeichnis

INHALT I

INHALTSVERZEICHNIS II

ABBILDUNGSVERZEICHNIS IV

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS VI

1. EINLEITUNG. 7

1.1 PROBLEMSTELLUNG 7

1.2 AKTUALITÄT DES THEMAS 9

1.3 ZIELSETZUNG 10

2. TECHNOLOGISCHE ENTWICKLUNG 11

2.1 ALLGEMEIN 11

2.2 TECHNOLOGIEN DER INDUSTRIELLEN REVOLUTION (INDUSTRIE 4.0) 14

2.2.1 Konnektivität & Kommunikation 14

2.2.2 Daten, Intelligenz und Analytik 16

2.2.3 Fortgeschrittene Fertigung 18

2.2.4 Mensch-Maschine Interaktion 19

2.3 STAMPFLEHMBAU 20

2.3.1 Historische Einblicke 20

2.3.2 Vorbemerkung 22

2.3.3 Physikalische Eigenschaften 23

2.3.4 Fertigung von Stampflehmbauwände 25

2.4 DIE IDEE 28

3. ANGESTREBTE TECHNISCHE FUNKTIONALITÄTEN & RELEVANTE PARAMETER 29

3.1 VERDICHTUNG VON BINDIGEN BÖDEN 29

3.1.1 Allgemein 29

3.1.2 Bodenarten 29

3.1.3 Verdichtungsverfahren 30

3.1.4 Verdichtungswilligkeit des Materials 32

3.2 AUTOMATISIERUNG ROBOTIK 34

3.2.1 Allgemein 34

3.2.2 Robotersysteme und Bauformen 34

3.2.3 Aufbau, Steuerung und Programmierung 36

4. FÜHRENDE KONKURRENZPRODUKTE/-VERFAHREN 40

4.1 STAND DER TECHNIK 40

4.1.1 Alnatura Campus 40

4.1.2 Schwimmbad in Toro (Spanien) 44

4.1.3 Kräuterzentrum Ricola 46

4.2 TECHNIK 1 „FORMEARTH“ 49

4.3 TECHNIK 2 URSCHELL WALLS BUILDING MACHINE 52

4.4 TECHNIK 3 FERTIGTEILE 55

5. MARKTABSCHÄTZUNG 56

5.1 MARKTPOTENTIAL 56

5.2 MARKTVERÄNDERUNG 58

5.3 NACHTEILE 58

5.3.1 Witterungsbeständigkeit 58

5.3.2 Kosten 58

5.3.3 Mangelnde Anerkennung 59

5.4 VORTEILE 60

5.4.1 Dämmend und Wärmespeichernd 60

5.4.2 Brandschutz 60

5.4.3 Luftfeuchtigkeit, Schadstoffe und Gesundheit 61

5.4.4 Nachhaltigkeit 61

5.5 ZWISCHENFAZIT 62

6. POTENTIELLE UNTERNEHMEN 63

6.1 VORSTELLUNG VOGT BAUGERÄTE GMBH 63

6.2 VORSTELLUNG RAVI BAU- UND MIETGERÄTE GMBH 64

6.3 WEITERE UNTERNEHMEN 65

7. FAZIT 66

LITERATURVERZEICHNIS 68

ANHANG 74

ERKLÄRUNG 83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1-1: Globale CO2-Emmissions-Szenerien [2] ... 7
Abbildung 1.1-2: Erzeugerpreisindizes Baumaterialien 2021 [5] ... 8
Abbildung 1.2-1: Automatisierung im Bauwesen[7] ... 9
Abbildung 2.1-1: Zeitstrahl Industrie 1.0 bis Industrie 4.0 [11] ... 11
Abbildung 2.1-2: Arbeitsproduktivität Baugewerbe [14] ... 12
Abbildung 2.1-3: Digitalisierung [15] ... 13
Abbildung 2.2-1: Technologie der Industrie 4.0 [17] ... 14
Abbildung 2.2-2: Big Data Analytics [27] ... 17
Abbildung 2.3-1: Historische Stampflehmtechnik [31] ... 21
Abbildung 2.3-2: Recyclingkreislauf Lehmbau [30] ... 22
Abbildung 3.1-1: Statisches Verdichtungsverfahren [38] ... 30
Abbildung 3.1-2: Lastverteilung [36] ... 30
Abbildung 3.1-3: Prinzip der Vibrationsverdichtung [41] ... 31
Abbildung 3.1-4: Kornformen Böden [37, S. 14] ... 32
Abbildung 3.2-1: Aufbau Roboter [47] ... 36
Abbildung 3.2-2: Achsen Knickarmroboter [48] ... 36
Abbildung 3.2-3: Roboter-Bearbeitungszonen [49] ... 37
Abbildung 3.2-4: Prinzip Roboter-Steuerung [49] ... 38
Abbildung 4.1-1: Alnatura Campus [56] ... 40
Abbildung 4.1-2: Konstruktion Alnatura Campus[57] ... 41
Abbildung 4.1-3: Verdichtungsprinzip Stampflehm [57] ... 42
Abbildung 4.1-4: Stampflehmblöcke[61] ... 42
Abbildung 4.1-5: Fassadenansicht Stampflehm [62] ... 43
Abbildung 4.1-6: 3D-Modell Schwimmbad Torro [65] ... 44
Abbildung 4.1-7: Schnittansicht Schwimmbad [66] ... 45
Abbildung 4.1-8: Innenbereich Schwimmbad [65] ... 45
Abbildung 4.1-9: Kräuterzentrum Ricola [69] ... 46
Abbildung 4.1-10: Baustelle Kräuterzentrum [70] ... 47
Abbildung 4.1-11: Konstruktionskonzept Stampflehmwand [71] ... 47
Abbildung 4.1-12: Außenwand Stampflehmblock [72] ... 48
Abbildung 4.2-1: 3D-Modell Formearth 1 [73] ... 49
Abbildung 4.2-2: 3D-Modell Formearth 2 [73] ... 50
Abbildung 4.2-3: Prototyp Formearth [75] ... 51
Abbildung 4.3-1: Urschell William [76] ... 52
Abbildung 4.3-2: Lebensmittelschneidmaschine Urschel Labortories [77] ... 52
Abbildung 4.3-3: „Urschel Wall Machine“ 1 [79] ... 53

Abbildung 4.3-4: „Urschel Wall Machine“ 2 [79] 54
Abbildung 4.3-5: Detailzeichnung Wall Machine [78] 54
Abbildung 4.4-1: Fertigungshalle Stampflehmblöcke [80] 55
Abbildung 5.1-1: Baufertigstellungen – in Deutschland 2002- 2020 [81] 56
Abbildung 5.3-1: Preis Baustoffe in € pro Quadratmeter [85] 59
Abbildung 5.4-1: Wärmeleitfähigkeit Baustoffe Fertigungshalle [88] 60

Abkürzungsverzeichnis

Es sind nur jene Abkürzungen aufgeführt, die spezifischer Natur sind und in der Arbeit verwendet werden.

3D	Dreidimensional
ABB	Asea Brown Boveri
AR	Argumented Reality
CAD	Computer Aided
CNC	Computerized Numerical Control
CO2	Kohlenstoffdioxid
CP	Continuous Path
DIN	Deutsches Institut für Normung
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
IIA	Institute of Internal Auditors
IOT	Internet of Things
IT	Informationstechnik
UNO	United Nations Organization
v. Chr.	vor Christus/Christo
VR	Virtual Reality

1. Einleitung.

1.1 Problemstellung

Seit dem Übereinkommen von Paris im Dezember 2015 sollte sich die Weltwirtschaft eigentlich klimafreundlicher entwickeln. Doch laut dem Emission Gap Report 2020 der UNO bewegen wir uns eher mit den derzeitigen CO2-Reduktionen auf eine globale Erwärmung von 3,5 Grad Celsius im Jahr 2100 zu. Das von 195 Parteien beschlossene Ziel in dem Abkommen war und ist heute noch, bis zum Jahr 2030 die globale Erderwärmung auf 1,5 Grad einzugrenzen. [1]

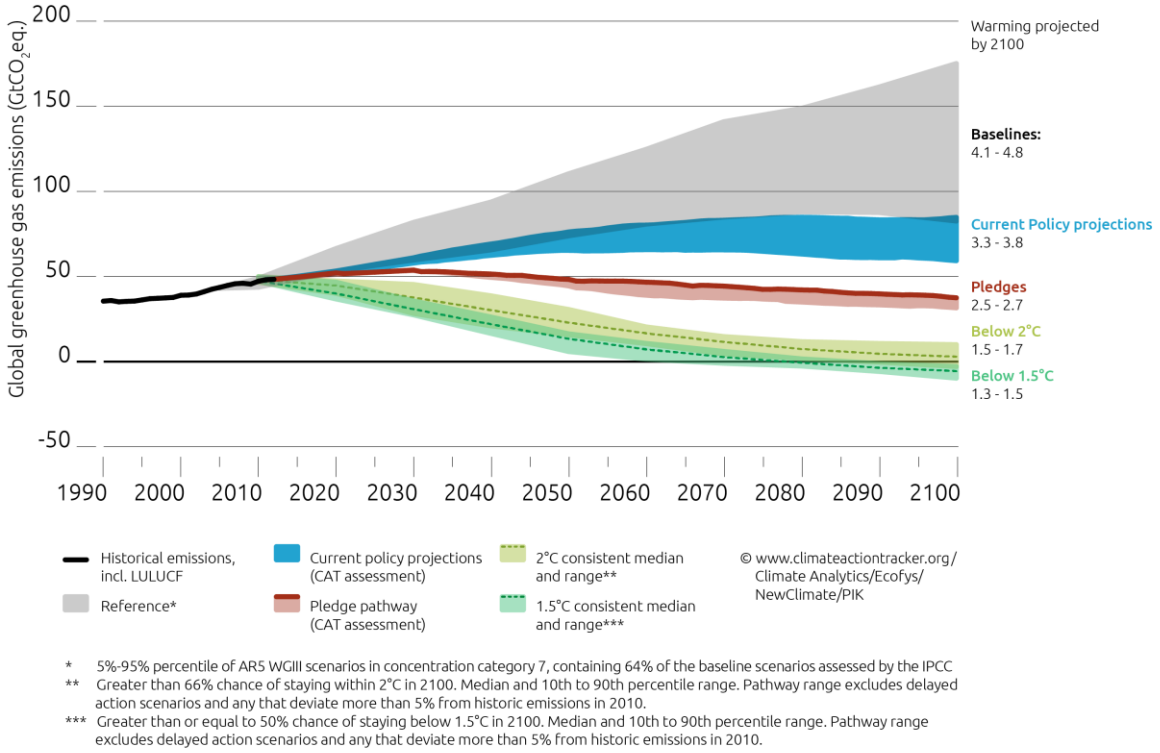

Abbildung 1.1-1: Globale CO2-Emmissions-Szenerien [2]

Der Fokus liegt derzeit auf der Klimakrise, es wird immer mehr über die steigenden Kohlendioxidemissionen berichtet, in Beiträgen wird zunehmend über das Artensterben geschrieben, und in den letzten Jahren sind stetig mehr Naturkatastrophen zu bewältigen. Es wird zwar dagegen etwas unternommen, aber das Einkaufen in Bio-Lebensmittelläden, der geringere Fleischkonsum, das Urlaubmachen ohne die Reise mit dem Flugzeug und das plastikfreie Einkaufen sind nicht ausreichend für eine Bekämpfung des enormen CO2-Ausstoßes. Dies sind zwar wichtige Schritte, um die Klimaziele der Europäischen Union zu erreichen, aber es gibt noch enorme Potenziale, um große Mengen Kohlendioxid einzusparen, insbesondere in der Bauwirtschaft. Denn auf den Bausektor entfallen rund 50% der weltweiten Kohlendioxidemissionen. Allein die Zementindustrie verursacht 8% der weltweiten Treibhausgase [3]. Zudem gibt es bereits Engpässe bei der Versorgung mit Rohstoffen wie

Kies und Sand, den Grundbestandteilen von Beton. Außerdem verschließt sich der atmungsaktive Boden zunehmend durch großangelegte Bauvorhaben. Hierdurch kann Regenwasser nicht besonders gut versickern, was bei Starkregen zu Überschwemmungen führen kann. Ein Verdunsten des Wassers auf dem verschlossenen Boden ist nicht möglich, was wiederum nicht die kühlende Wirkung der sommerlichen Verdunstung mit sich bringen kann. Des Weiteren ist eine Versorgung des Bodens mit Luft und Wasser ausgeschlossen, was eine negative Bodenfauna hervorruft. Aufgrund der ökologischen Auswirkungen steht die Baubranche derzeit unter Spannung. Zusätzlich kommt es in der Covid-19-Pandemie 2021 zu stark steigenden Materialpreisen sowie Versorgungsengpässen. [4]

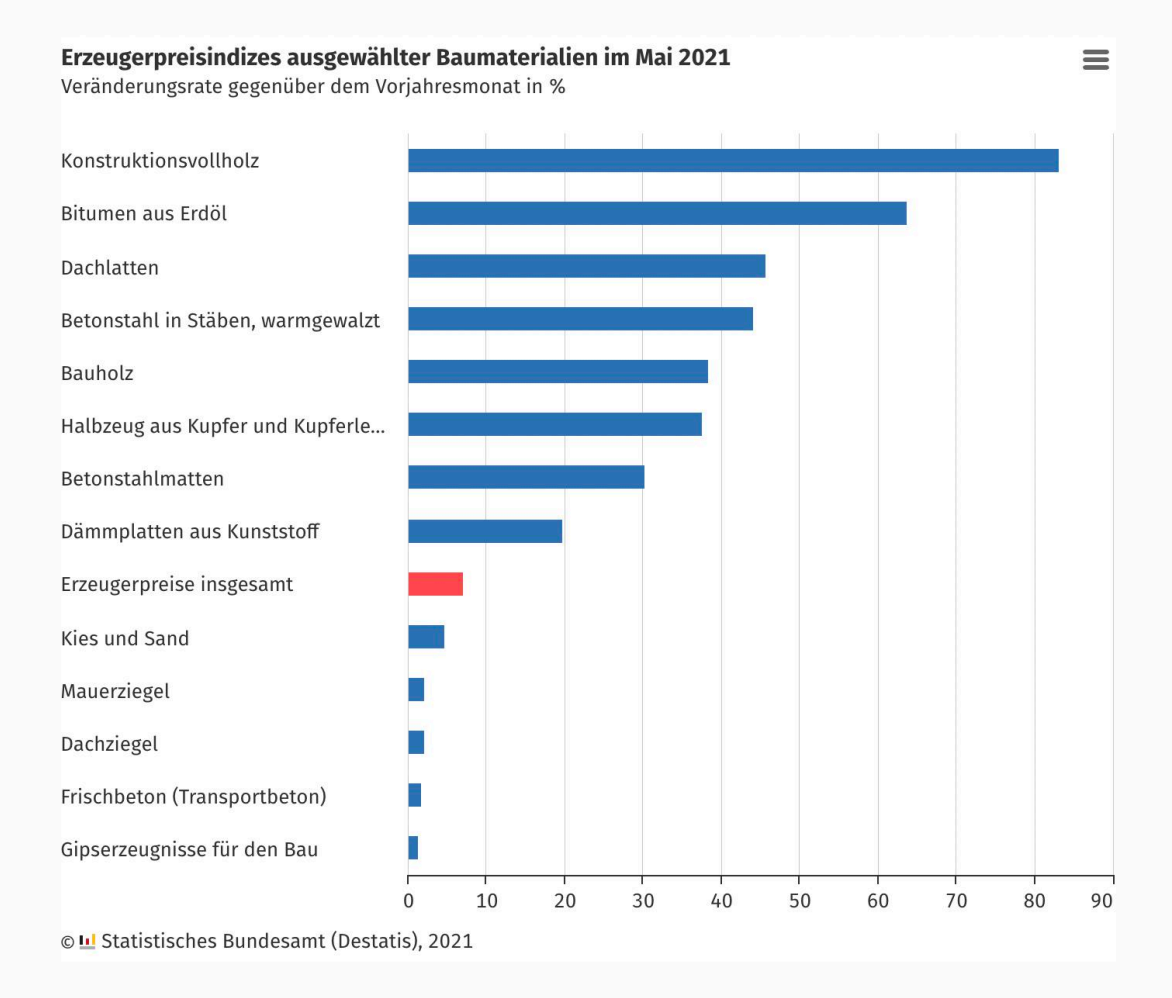

Abbildung 1.1-2: Erzeugerpreisindizes Baumaterialien 2021 [5]

1.2 Aktualität des Themas

Zweifellos müssen, um im Bau die Produktivität zu erhöhen, die Arbeitsschritte noch umfangreicher als bisher automatisiert werden. Der Schwerpunkt liegt vor allem auf den Herstellkosten, wobei es darum geht, diese auf das Minimum zu senken und gleichzeitig die Baustellenarbeiten zeitlich zu verkürzen und die Effizienz sowie Qualität zu steigern. Doch die Umsetzung scheint nur langsam voranzugehen. Im Gegensatz zur Autoindustrie, in der die meisten Tätigkeiten vollständig von Robotern übernommen werden, verweilt die Baubranche derzeit auf dem Abstellgleis. So weist ABB-Robotik-Chef Sami Atiya auf Folgendes hin: „In Sachen Automatisierung sehen sich viele Kunden in der Baubranche heute da, wo die Autobauer vor 50 Jahren waren“ [6]. Ganz klar ist, dass das Bauwesen vor dem Beginn eines Automatisierungs-Booms steht. Der Grund hierfür ist, dass nach Atiya die Nachfrage nach bezahlbaren Wohnraum hoch ist und zeitgleich allein in Europa bis zu 200.000 Stellen im Bauwesen offen sind [6]. Eine von ABB in Auftrag gegebene Studie erbrachte folgende Ergebnisse: 91 Prozent der befragten Bauunternehmen aus Europa, USA und China, rechnen in den nächsten 10 Jahren mit einem Mangel an Fachkräften. Außerdem wollen 81 Prozent von den 1900 befragten Unternehmen vermehrt auf die Automatisierung sowie auf Robotik setzen. Der ABB-Robotik Chef ist sich ohne jeden Zweifel sicher, dass die Baubranche einen Automatisierungs-Boom durchleben wird. „Wer mit geschulten Automatisierungs-Augen über eine Baustelle geht, sieht das enorme Effizienzpotenzial“, so Sami Atiya [6].

Abbildung 1.3-1: Automatisierung im Bauwesen[7]

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, über die technologische Entwicklung von neuen exponentiellen Technologien der vierten industriellen Revolution aufzuklären. Außerdem wird geprüft, ob eine altbewährte Stampflehmtechnik zu einer neuartigen nachhaltigen Baumethode führen kann. Es stellt sich die Frage, wie eine solche Technik, den heutigen Standards gerecht werden kann. Hierbei wird Schritt für Schritt aufgezeigt, welche Methoden und Technologien bereits aus unserem Geschäftsalltag nicht wegzudenken sind und welche sich dabei für einen automatisierten Herstellungsprozess von Stampflehmwänden eignen würden. Darüber hinaus werden relevanten Parameter, die in der Stampflehmtechnik sowie in der Automatisierung nötigt sind, untersucht. Ein Teil dieser Arbeit besteht darin, den Stand der Technik beim Stampflehmbau aufzuzeigen, indem Vorzeigeprojekte, die zum größten Teil mit Stampflehm erstellt worden sind, analysiert werden. Ein genauer Einblick in führende Konkurrenzprodukte soll in Kapitel 4 gegeben werden. Es stellt sich weiterhin die Frage, ob Rammed Earth, sprich Stampflehm, eine nachhaltige Baumethode mit großem Marktpotential sein kann. In Kapitel 5 soll diese Frage mit einer Marktabschätzung untersucht werden. Dabei soll mit Hilfe von Vergleichen, Fakten, Statistiken, Annahmen, sowie dem Aufzeigen der Vor- und Nachteile des Stampflehmbaus eine bestmögliche Abschätzung des Marktpotentials durchgeführt werden. Ebenfalls soll anhand von Experteninterviews das Marktpotential von Lehmbau analysiert werden. Die Ergebnisse aus den Interviews werden den aufgestellten Thesen und Annahme widersprechen oder diese stützen. Schlussendlich soll mit den gesammelten Erkenntnissen aus dieser Arbeit, der Grundbaustein für ein zukünftiges Forschungsprojekt gelegt werden. Darüber hinaus werden potentielle Firmen gesucht, die teilweise die Technik mit in dieses Forschungsprojekt einbringen können und gleichzeitig an einer Zusammenarbeit interessiert sind.

2. Technologische Entwicklung

2.1 Allgemein

„Die erste Massenproduktion durch Maschinen und damit die **Industrie 1.0** startete circa im Jahr 1800. Die ersten Maschinen, wie z. B. Webstühle, wurden durch menschliche Kraft betrieben. Mechanische Produktionsanlagen wurden errichtet und Maschinen durch Wasser- und Dampfkraft angetrieben“[8]. In dieser Zeit erkannte die Gesellschaft früh, dass die industrielle Entwicklung positive Aussichten auf einen Beruf in den Industriehallen mit sich brachte.

Den Beginn der zweiten industriellen Revolution (**Industrie 2.0**) läutete die Elektrizität als treibende Kraft ein. Durch die ersten Automobilen im frühen 20. Jahrhundert automatisierte sich die Produktion in den Hallen permanent weiter. Mit der Einführung der Motoren in den Industriehallen konnte die Produktion am Fließband in Rekordzeiten durchgeführt werden [9].

„Der deutsche Bauingenieur Konrad Ernst Otto Zuse entwickelte mit dem Z3 im Jahr 1941 den ersten funktionsfähigen Computer der Welt – er war programmgesteuert, frei programmierbar und vollautomatisch“ [10]. Die dritte industrielle Revolution (**Industrie 3.0**) begann schließlich in den 1970er Jahren. Der Fokus lag hier auf der weiteren Automatisierung durch Elektronik und IT. Nach der Einführung von zu riesigen Rechenmaschinen fand eine Optimierung hin zu kompakteren Personal-Computern für Büro und Haushalt statt, was gleichzeitig einen neuen Industriezweig ins Leben rief.

Zurzeit befinden wir uns mitten in der vierten industriellen Revolution. Der Fokus liegt in dieser Zeit in der progressiven Digitalisierung und der Implementierung cyber-physischer Systeme. Seit geraumer Zeit wird von Produktionen vom Aufbau eines Lagerbestands abgesehen und nur auf Anfrage oder wahrhaftiges Verlangen produziert. Es werden stetig mehr Just-in-Time-Strategien umgesetzt. Fortschritte machen sich sowohl durch schneller werdende Fertigung als auch im Bereich des Umwelt- und Arbeitsschutzes bemerkbar. „**Industrie 4.0** lautet der Begriff für die moderne Technologie und Produktion im Zeitalter der digitalen Revolution“. [12]

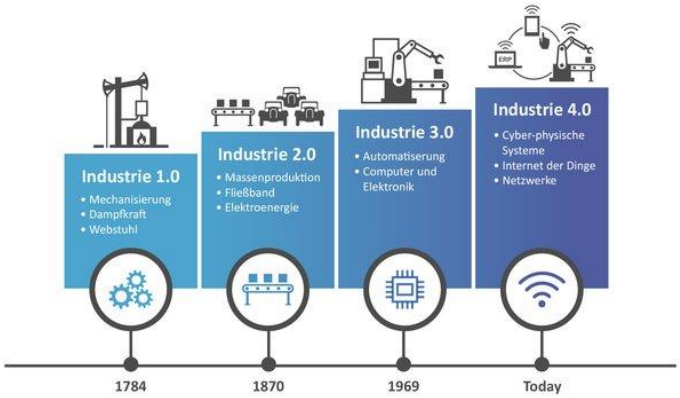

Abbildung 2.1-1: Zeitstrahl Industrie 1.0 bis Industrie 4.0 [11]

- **Entwicklung Baubranche**

Vor 30 Jahren sah die Bauwelt noch ganz anders aus. Veränderungen im Zuge der Jahrtausendwende wirkten sich positiv auf den Digitalisierungsgrad, die Baustofftechnologie und die gesamte Arbeitskultur aus. Der Blick in die Vergangenheit zeigt, dass die Baubranche ein auf und ab durchlebt. Schaut man sich die Produktivität der Bauwirtschaft an, so ist sie seit 1991 nicht gestiegen (Abb. 2.1-2). Obwohl sie hinsichtlich der Gesamtbauinvestitionen und des Arbeitsmarktes derzeit gut aufgestellt ist, entwickelt sie sich dennoch schwach. Dies zeigt deutlich, dass die Verbesserung der Bauwirtschaft und der Bauproduktivität angesichts der begrenzten Humanressourcen in den nächsten Jahren zu einem der wichtigsten Faktoren für die Verbesserung der Baukapazität sorgen kann. Die Industrialisierung des Bauwesens ist unabdingbar. Das 20. Jahrhundert bringt Arbeits-maschinen mit immer besser werdenden Technologien mit sich sowie auch die industrielle Fertigung, was die Kurve leicht ansteigen ließ [13]. Die Gesellschaft hat sich buchstäblich in den letzten Jahren enorm weiterentwickelt.

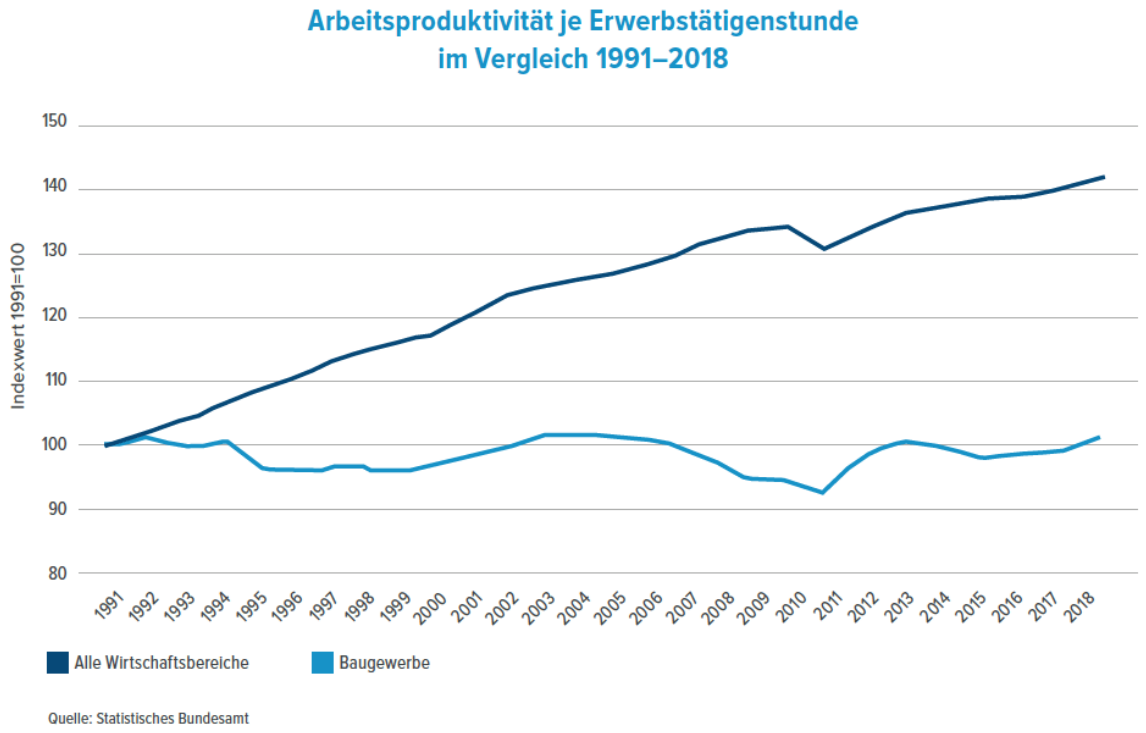

Abbildung 2.1-2: Arbeitsproduktivität Baugewerbe [14]

Ein Fortschritt folgt auf den nächsten und das Potential ist noch lange nicht ausgeschöpft. Zum anderen ist der Ehrgeiz der Menschheit zu groß, die Dinge noch besser machen zu wollen, als sie bisher schon sind. Der Hauptmotor unserer aktuellen Generation ist und bleibt das Internet. Die Digitalisierung ist aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken.

Abbildung 2.1-3: Digitalisierung [15]

2.2 Technologien der Industriellen Revolution (Industrie 4.0)

Für den Begriff Industrie 4.0 gibt es verschiedenste Erläuterungen, denn die Entstehung dieses Begriffs liegt noch nicht lange zurück und er steht weiterhin in seiner Entfaltung. Das Ziel der Industrie 4.0 ist es, Dienstleistungen, Produktionsprozesse und Produkte mit modernsten und hochentwickelten Technologien kontinuierlich zu optimieren. [16, S. 6]

Abbildung 2.2-1: Technologie der Industrie 4.0 [17]

2.2.1 Konnektivität & Kommunikation

- **IoT**

Das Internet der Dinge (kurz IoT, engl. **Internet of Things**) beschreibt klar identifizierbare physische „Dinge“ oder Verbindungen zwischen Objekten und dem Internet oder ähnlichen virtuellen Strukturen, in denen Menschen ergänzt oder ersetzt werden. [18, S. 5]

Jedes reale IoT-Objekt hat ein virtuelles Gegenstück. Außerdem kann es allen Beteiligten des Netzwerks Auskunft über seinen eigenen Zustand oder den Zustand seiner Umgebung geben. Jedem Mitglied des Netzwerks wird eine eindeutige Kennung zugewiesen. Daher ermöglicht IoT nicht nur die Mensch-zu-Mensch-Kommunikation, sondern auch die Mensch-zu-Objekt- und die Objekt-zu-Objekt-Kommunikation. Demnach haben intelligente Dinge das Potenzial, sich selbst zu organisieren und Daten auszutauschen. Menschliche Interaktionen sind nicht mehr vonnöten. [19]

Das IoT ermöglicht es Benutzern, bei bestimmten Ereignissen benachrichtigt zu werden, beispielsweise, wenn die Raumtemperatur einen bestimmten Wert unterschreitet oder der Druck bei Verwendung einer elektrischen Zahnbürste zu stark ist. Aber auch intelligente IoT-Sensoren können eigenständig garantieren, dass beispielsweise Rollläden ohne menschliches Eingreifen die Fenster automatisch verdunkeln. Die Vorteile des Internets of Things sind die Optimierung der Ressourcennutzung, Kostensenkung, Steigerung der Mitarbeiterproduktivität, Erhöhung der Arbeitseffizienz, Optimierung von Lieferketten, Steigerung der Kundenbindung und Erhöhung der Kundenzufriedenheit [18, S. 7].

- **Cloud Computing**

Mit Cloud oder Cloud Computing ist, die Bereitstellung von Speicherplatz, Rechenleistung oder Anwendungssoftware als Service auf einer Internetplattform gemeint. Diese Infrastrukturen werden hauptsächlich durch den Zugriff mit Programmen oder dem Webbrowser auf dem jeweiligen Gerät verwendet. Unter Cloud Computing wird die Zurverfügungstellung und Benutzung von Rechen-infrastruktur, wie Speicherplatz, Rechenleistung und Software, im Internet verstanden. Das Konzept dahinter ist, diese IT-Infrastrukturen in einem Computernetzwerk bereitzustellen, sodass das Installieren auf einem lokalen Computer nicht vonnöten ist. Jede IT-Dienstleistung wird lediglich über Client-Software, technische Schnittstellen und Protokolle bereitgestellt und genutzt, in der Regel nur über einen Webbrowser. Die Prinzipien des Cloud Computing zielen hauptsächlich auf erhebliche Arbeits- und Kosteneinsparungen ab. Beim Cloud-Computing wird zwischen drei verschiedenen Arten unterschieden: Infrastructure as a Service (IaaS), Platform as a Service (PaaS) und Soft-ware as a Service (SaaS). IaaS beinhaltet im Wesentlichen die Zurverfügungstellung von technischer Infrastruktur, wie beispielsweise Rechenleistung, Netzwerk oder Speicherplatz. Die Anpassung dieser Dienste an die jeweiligen Bedürfnisse eines Nutzers kann stets jederzeit erfolgen. PaaS liefert den Usern eine Plattform zur Entwicklung und Bereitstellung persönlicher Softwareanwendungen. Diese Art von Cloud-Service bietet Flexibilität im Programmier- und Entwicklungsbereich. SaaS, hinter dem die bekannte On-Demand-Software steckt, repräsentiert die höchste Stufe des Cloud Computing.[20]

2.2.2 Daten, Intelligenz und Analytik

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

[redacted]

Abbildung 2.2-2: Big Data Analytics [27]

2.2.3 Fortgeschrittene Fertigung

- **Fertigungstechnologie**

Die additive Fertigung, umgangssprachlich auch als 3D-Fertigung oder generative Fertigung bezeichnet, gewinnt in der Industrie immer mehr an Bedeutung. Diese Fertigungsverfahren werden insbesondere im Prototypenbau, bei hochindividuellen Bauteilen oder Bauteilen mit komplexen Geometrien eingesetzt. Aber auch bei der Herstellung von Endprodukten nimmt der Einsatz der additiven Fertigung zu. Beim additiven Fertigungsprozess werden Bauteile durch Hinzufügen von Materialien erstellt. Der generative Fertigungsprozess zeichnet sich dadurch aus, dass der Fertigungsprozess ohne Werkzeuge und ohne Formen auf Basis von 3D-CAD-Daten auskommen kann. Im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren erhöht dies die Fertigungsflexibilität. Mit verschiedenen additiven Fertigungsverfahren lassen sich unterschiedliche Werkstoffe verarbeiten, wie zum Beispiel Metalle, Kunstharze, Kunststoffe und Keramiken. Bei der additiven Fertigung werden Bauteile mithilfe von 3D-CAD-Daten erstellt. Bei einigen Verfahren werden die zu fertigen-den Teile direkt in alle drei Raumrichtungen gefertigt. Im Normalfall erfolgt die Herstellung Schicht für Schicht, indem zunächst eine Ebene von Bauteilen erstellt wird. Das dreidimensionale Bauteil entsteht durch Hinzufügen weiterer Schichten in der dritten Raumrichtung. Bevor die nächste Schicht aufgetragen wird, sorgt der Prozess des Aufschmelzens oder chemischen Härtens für den Zusammenhalt des Materials. Mit einem 3D-Fertigungsprozess lassen sich geometrische Formen erstellen werden, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren nicht erstellt werden können oder einen hohen Aufwand erfordern. Ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung besteht darin, dass der Herstellungsprozess automatisiert ist. Der Herstellungsprozess erfordert keine Mitarbeiter, die die Maschine bedienen. Lediglich das Vorbereiten der Maschine und das Entnehmen von Bauteilen sowie eine eventuelle Nachbearbeitung müssen manuell erfolgen. [28]

2.2.4 Mensch-Maschine Interaktion

- **Augmented und Virtual Reality**

Technologien rund um Virtual und Augmented Reality (AR/VR) werden für die Fertigung immer attraktiver. Content-Erstellung und verfügbare Hardware sind vielfältiger denn je. VR und AR haben direkten Einfluss auf Produktentwicklung, Produktions- und Logistikprozessplanung, Wartungs- und Supportprozesse sowie Mitarbeiterschulungen als Produkt- oder Servicemarketing. Das macht jeden Bereich effizienter, wobei zugleich Kosten optimiert und die Qualität verbessert werden können. Per Definition ist Virtual Reality (VR) eine computergenerierte Darstellung der Echtzeit-Welt, während die reale Welt verborgen ist. Mit Augmented Reality (AR) können Nutzer die reale Welt durch mobile Geräte oder Datenbrillen sehen. Darüber hinaus werden digitale Informationen inklusiven Hologrammen angezeigt, was zunehmend durch Objekterkennung und künstliche Intelligenz geschieht. Die Kombination aus IoT-Technologie, Robotik und dem Bild eines digitalen Zwillings ermöglicht neue Geschäftsmodelle in nahezu allen Unternehmensbereichen. AR wird zunehmend für Wartung und Support verwendet. Damit verkürzen sich die Zeiten zur Problemlösung, die Ausfallzeiten werden reduziert, die Produktivität gesteigert und gleichzeitig die Qualität des Kundenservice verbessert. Über das Remote Assistance- und Support-System können Experten gleichzeitig auf die Ansicht der Mitarbeiter schalten und sie proaktiv bei Problemen unterstützen. [29]

2.3 Stampflehmbau

2.3.1 Historische Einblicke

Als sehr bedeutender Baustoff wird Lehm seit Jahrtausenden weltweit verwendet, insbesondere an heißen und trockenen Orten. Catal Höyük ist eine in der heutigen Türkei ausgegrabene Siedlung. Die Ausgrabungsfunde werden in die Zeit zwischen 7500 und 5700 v. Chr. datiert. Die Siedlung gilt als erste ausgegrabene, feste Hauskonstruktion aus Lehmbaustoffen der Welt. Die Konstruktion umfasst eine Außenwand aus Lehmziegeln mit tragender Funktion und eine innenliegende Holzkonsole, die das Dach trägt. Das Dach ist mit Schilf und einer Lehmschicht zum Schutz vor Witterungseinflüssen abgedichtet. Catal Höyük ist kein Dorf, aber auch keine Stadt. Die Häuser in der Siedlung sind so nah aneinandergebaut, dass sie nur über eine Leiter vom Dach aus erreichbar sind. Im ganzen Haus gibt es nur einen Raum mit unterschiedlichen Nutzungsbereichen. Diese Bauweise wird als agglutinierende Struktur bezeichnet.

Die urbane Geschichte der Menschheit beginnt ca. 7000 v. Chr. an und wird mit den Städten wie Uruk und Babylon in Verbindung gebracht. Gründe für die Urbanität sind optimale Bedingungen wie nähreicher Boden sowie genügend Feuchtigkeit mit geringer Schwankung des Klimas. Ausschlaggebend war jedoch eher die Verfügbarkeit von Wasser; daher waren der Nahe Osten, China, Indien, Mexiko, Mittelamerika und Südamerika sehr attraktiv. Nachweise von Lehmkonstruktionen mit tragender Funktion ebenso aus China stammende Skelettbauweisen mit Lehm lassen darauf schließen, dass diese archäologischen Ausgrabungen mehrere tausend Jahre alt sind. Stampflehm kam außerdem bei lokalem Vorhandensein bei großen Teilen der Chinesischen Mauer zum Einsatz.

Die ersten festen Konstruktionen von Häusern ließen sich im Südwesten von Asien archäologisch nachweisen. Sakrale Bauten aus vorgefertigten Lehmziegeln von der Größe der ägyptischen Pyramiden befinden sich noch heute im Irak, im Iran und in Afghanistan. In der Abbildung 2.3-1 ist die Technologie der Stampflehmbauweise zu sehen. Diese wurde in China 1320 v. Chr. von Fu Yueh erfunden.

Dementsprechend wurde Lehm Jahrtausende lang effektiv als Baumaterial genutzt, und zwar auffallend oft in niederschlagsarmen Regionen. Schibam, eine Stadt im Jemen, auch als „Chicago der Wüste“ bekannt, ist ein Vorzeigebeispiel für den Lehm als Baustoff. Gebäude, die komplett aus Lehm und mit bis zu acht Stockwerken ausgestattet sind, überlebten bereits mehrere Jahrhunderte und bestehen nach wie vor noch [30, S. 2–9].

Abbildung 2.3-1: Historische Stampflehmtechnik [31]

2.3.2 Vorbemerkung

Lehm ist das Produkt der Verwitterung von festem Gestein. Der oberste Bereich unserer Erdkruste besteht teilweise aus lehmhaltigem Material. Verwitterungslehme gelten als Lehme, die an ihrer Position zurückgeblieben sind. Außerdem gibt es Lehme, die eine neue Position durch Wind, Wasser oder Eis erhielten. Diese Lehme werden als Auelehm, Lößlehm und Geschiebelehme bezeichnet. Lehm ist eine Mischung aus Sand, Schluff und Ton, wobei die drei Komponenten in fast gleichen Anteilen vorhanden sind. Der Ton übernimmt dabei die wichtigste Aufgabe, denn die Tonminerale verbinden den Sand und den Schluff miteinander.

Die Anforderungen an einen nachhaltigen Baustoff ergeben sich aus der Gewinnung der ressourcen- und energieschonenden Weiterverarbeitung. Außerdem ist es von großer Bedeutung, dass der Baustoff regenerativ und insbesondere langfristig verfügbar ist. Ein nachhaltiger Baustoff darf keineswegs gesundheitsschädigende Auswirkungen auf den Menschen und die Natur haben. Die Wiederverwendbarkeit des Baustoffs spielt eine große Rolle. Recyclinglehm kann bis in den Gewinnungsprozess zurückgeführt werden. Infolgedessen schließt sich der Stoffkreislauf; dies ist gleichzeitig die Vorgabe für ökologischen Bauen. Die Schließung des Kreises hat die Vermeidung von Abfall und positive Auswirkungen auf die Umwelt zur Folge [30, S. 22–23].

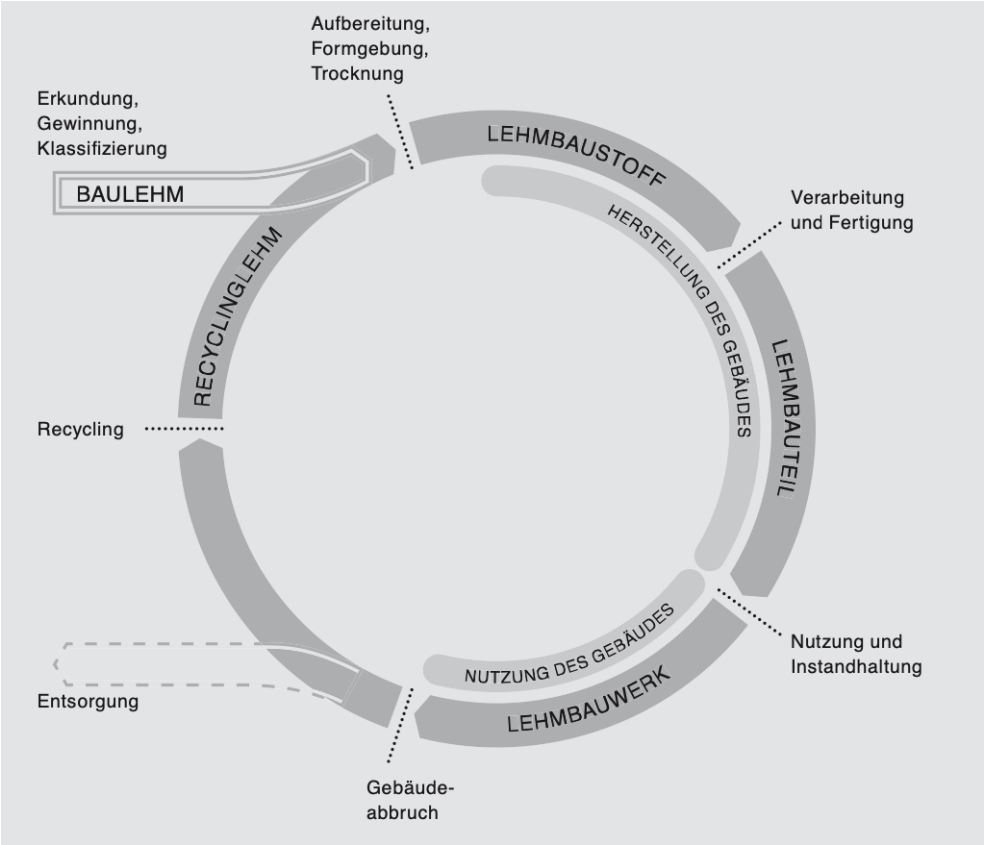

Abbildung 2.3-2: Recyclingkreislauf Lehmbau [30]

2.3.3 Physikalische Eigenschaften

- **Rohdichte**

Stampflehm weist eine Rohdichte von 1700-2400 kg/m3 auf, sofern Lehm mit geringem Tonanteil aber hohem Schotteranteil verdichtet wird. Geringere Rohdichten können jedoch bei Lehm mit Leichtzuschlägen vorkommen. Die Prüfung der Dichte wird in einem Prüfungslabor an einem Lehmwürfel durchgeführt [31, S. 212 A1].

- **Druckfestigkeit und E-Modul**

Für tragende Wände aus Stampflehm ist eine Druckfestigkeit von mindestens 2 N/mm2 definiert. Zugleich werden bei einer Druckfestigkeit von etwa 1,5 bis 2 N/mm2 die Anforderungen an die Abriebfestigkeit erreicht. Demnach kann eine Druckfestigkeit von 2 N/mm2 als Richtwert für die ideale Substanz angesehen werden. Für nichttragenden Wänden aus Stampflehm liegen keine Vorgaben bezüglich der Druckfestigkeit vor. Bei der Prüfung der Druckfestigkeit werden mindestens drei Probewürfel, mit einer Kantenlänge von 200 mm untersucht. Die Druckfestigkeitsprüfung des Stampflehms ähnelt sehr der Prüfung der Druckfestigkeit von Beton. Die Trocknung des Probekörpers zu beschleunigen, ist strengstens untersagt. Die Prüfung findet nach 6 Wochen statt, ungefähr zum Zeitpunkt, zu dem die Ausgleichfeuchte erreicht wurde. [31, S. 212 A2]

Bezüglich des Elastizitätsmoduls von tragenden Stampflehmmischungen sind in den Lehmbau- Regeln keine Mindestanforderungen festgelegt. Ein Elastizitätsmodul von 750 N/mm2 bei Lehmsteinen ist vergleichbar mit Stampflehm, der eine tragende Funktion übernimmt. Bei Stampflehmmischungen mit einer Druckfestigkeit von 2 N/mm2 ist die Vorgabe an das Elastizitätsmodul jedoch ausreichend erfüllt. [31, S. 213 A2]

- **Schwindmaß**

Die Anforderung an das Schwindmaß von Stampflehm darf nicht mehr als 2% sein. Für sichtbare Bauteile die monolithisch sind, darf der Wert von 0,5% nicht überschritten werden.

Messungen zum Schwindmaß werden an einem gestampften Probekörper mit den Maßen 60 cm lang, 10 cm breit und ungefähr 5 cm hoch durchgeführt. Für die spätere Kontrolle werden Messmarken in den Körper eingeritzt. Beim Erstellen des Probekörpers durch Stampfen wird darauf geachtet, dass keine Schwindbehinderungen durch Haftung an der Schalung auftreten, indem Folie in die Pressform eingelegt wird. Das Trocknen des Probekörpers darf nur unter regulärer Raumtemperatur stattfinden.

Abschließend wird das Endschwindmaß gemessen. Eine Prüfung der Charge wird stets für alle Baustellemischungen bei etwa 10 m3 und bei Mischungen von Werk aus ungefähr alle 50 m3 des Baustoffes durchgeführt. Die Angaben des Herstellers werden in Prozent geführt. [31, S. 212 A2]

- **Brandverhalten**

Die Erfüllung der Anforderungen gegen Brandbefall ist jederzeit gewährleistet. Aufgrund eines hohen mineralischen Anteils in diversen Stampflehmmischungen werden diese in die Brandschutzklasse A1 eingeteilt. Es wird also kein Beitrag zum Brand geleistet. [31, S. 214 A3]

- **Frost- und Feuchteverhalten**

Die Beständigkeit gegenüber Frost und Feuchtigkeit ist bei Stampflehm nicht gegeben. Aufgrund des ungeeigneten Klimas und des Nichteinhaltens der Lehmbauregeln ist von der Verwendung historisch ausgeführter Stampflehmbauteile derzeit in Deutschland abzuraten. Jedoch sind Stampflehmbauteile nach heutiger Ausführungsweise stets resistenter. Allerdings kann wegen verschiedensten Beanspruchungen die Widerstandsfähigkeit von Stampflehm unterschiedlich ausfallen. Abhängig hiervon ist der Anteil und die Art von vorhandenen Tonmineralen sowie auch der Beimengung von Fasern. Je höher der Faser- und Fettgehalt ist, desto resistenter ist der Stampflehm gegen Einwirkungen. Die Auswirkungen von Frostabsprengungen am Stampflehm sind höher als die Auswirkungen infolge Schlagregens. Eine hydrophobierende oder verfestigende Oberflächenbehandlung ergibt auf lange Sicht keinen ausreichenden Schutz. Eine Beurteilung des Verhaltens unter Frost- und Feuchtigkeit im Außenbereich ist bisher noch nicht durchgeführt worden. Vorstellbar ist aber, dass insoweit künftig eine Festlegung der Anwendungsbereiche stattfindet. [31, S. 213–214].

2.3.4 Fertigung von Stampflehmbauwände

- **Material**

Bevor die Ausführung von Stampflehmbauwänden begonnen werden kann, ist eine Kontrolle des Baustoffs empfehlenswert. Aufgrund von Lager- und Transportprozessen besteht die Möglichkeit, dass Veränderungen der Homogenität und Feuchtigkeit der Stampflehmmischung auftreten können. Es ist nicht ratsam, davon auszugehen, dass ein fertig gemischter Baustoff ohne zusätzliche Arbeitsschritte verarbeitet werden kann. Grundsätzlich sind ein Nach-feuchten mit Wasser und ein synchrones Vermischen mit Hilfe eines Zwangsmischers oder einer einfachen Schaufel empfehlenswert. Zugleich wird hierdurch die Homogenität der Stampflehmmischung aufrechterhalten.

Der perfekte Feuchtegehalt im Stampflehm lässt sich durch manuelles Testen herausfinden. Hierfür wird das Material in der Hand zusammengedrückt. Hält dieses gut zusammen und lässt es sich nicht plastisch verformen, so kann davon ausgegangen werden, dass diese Mischung ideal als Baustoff verarbeitet werden kann. Der Einbau von Stampflehm erfordert einen bestimmten Feuchtgehalt. Außerdem sind die hierfür erforderlichen Toleranzen minimal. Durch seitliches Abweichen des Lehms bei zu hohem Feuchtegehalt bleibt der Verdichtungseffekt aus. Gleichzeitig macht sich ein Verkleben des Lehms am Verdichtungswerk-zeug bemerkbar. Bei einem zu trockenen Stampflehm kann es durchaus vorkommen, dass sich eine Verdichtung teils als schwierig und ungenügend herausstellt, da keine Bindung ein-gegangen werden kann. [31, S. 215]

- **Schalung**

Aufgrund des hohen Materialgewichts von Stampflehm ist ein festes Fundament, beispiels-weise aus Beton, die Grundvoraussetzung für eine langanhaltende Stabilität. Für die Schalung eignen sich Holzplatten oder Schalungssysteme, die üblicherweise im Betonbau verwendet werden. Der Druck der beim Stampfen des Lehms auf die Schalung verursacht wird, ist nicht zu vernachlässigen. Das Schalungssystem muss einen Schaldruck von mindestens 60 kN/m2 haben. Von hoher Bedeutung ist die Verankerung der Schalung im Boden, da ansonsten beim Verdichten ein Hochschieben der Schalung vorkommen kann. Bei Verwendung von Kletterschalung ist darauf zu achten, dass ein ausreichender hoher Wandabschnitt eingeschalt bleibt. Das Entfernen der Schalung im unteren fertiggestellten Bereich hängt von der Festigkeit und Trocknungen des Materials ab. Die Überlappung der Abschnitte ist von Vorteil. Eine hohe Anzahl an Schalungsankern wirkt sich negativ auf die Ästhetik der fertigen Oberfläche aus. Außerdem können Behinderungen beim Stampfen auftreten. Für eine ansprechende Ästhetik der Oberfläche kann eine dünne Furnierschichtholzplatten auf der Innenseite der Schalung sorgen. Von der Verwendung einer schon in Gebrauch gewesenen

Betonschalung ist abzuraten, da kaum sichtbare Reste von Zement oder Öl die fertige Oberfläche unschön aussehen lassen. Um das Trennen der fertiggestellten Wand von der Schalung zu vereinfachen, kann auf Trennmittel mit pflanzlichen Ölen zurückgegriffen werden. [31, S. 215–216]

- **Stampfgeräte Einbringen + verdichten**

Das Einbringen des Lehms in die Schalung kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Das Befüllen per Eimer und Schaufel wäre eine Möglichkeit, allerdings wird dies auf Dauer zu einer körperlichen Tortur. Mit Hilfe eines Betonsilos hat sich das Einfüllen von größeren Mengen als geeignet erwiesen. Die Gleichmäßigkeit beim Einfüllen des Lehms in die Schalung ist von großer Bedeutung, da es ansonsten zur Entmischung kommen kann. Außerdem sind große Fallhöhen des Materials zu vermeiden, um einen vorzeitigen Verdichtungsprozess auszuschließen. Der Verdichtungsprozess kann nach einer gleichmäßigen Verteilung mit einem Rechen beginnen. In der heutigen Zeit wird das händische Verdichten aufgrund von Unwirtschaftlichkeit und extremer Beanspruchung nicht weiter ausgeführt. An dieser Stelle kommen Stampfer zum Einsatz. Hierbei hat sich herausgestellt, dass sich mit einem 12 Kilogramm schweren Stampfer, der eine Platte mit einer Grundfläche von 120 mm x 120 mm besitzt, sehenswerte Ergebnisse erzielen lassen. Größtenteils wird mit pneumatischen Handstampfern verdichtet. Große Verdichtungsgeräte, die im Tiefbau eingesetzt werden, sind hierbei ungeeignet, da diese Geräte einen zu hohen Druck auf die Schalung ausüben. Die Höhe einer frisch eingefüllten Lehmlage beträgt zwischen 10 und 15 cm. Diese wird auf ungefähr 8 cm gestampft, was wiederum an der fertigen Stampflehmwand zu einer horizontalen Struktur führt. Bei Sichtbauteilen ist eine Nachbehandlung der Oberfläche empfehlenswert. Für bestmögliche Ergebnisse sollte jede Fläche gleichmäßig und mehrfach gestampft werden. Bei keiner weiteren Verdichtung und einer dichten und glatten Oberfläche ist der Verdichtungsprozess der Stampflehmschicht soweit abgeschlossen und es kann mit der nächsten Lage begonnen werden. Die Verdichtung ist in mehreren Arbeitsgängen durchzuführen. Zunächst wird mit einer leichten Vorverdichtung begonnen. Daraufhin ist eine Hauptverdichtung das Kernstück des Verdichtungsprozesses. Abschließend kann mit einer Nachverdichtung der Arbeitsdurchgang dieser Schichtlage beendet werden. Um Probleme in den Wandecken zu vermeiden, ist die Verdichtung von der Mitte aus zu beginnen und langsam an die Ecke anzutasten. Inzwischen wird an diesem Verdichtungsprozess viel entwickelt, teils wurden bereits Maschinen hergestellt, die die Verdichtungen voll- oder halbautomatisch durchführen können. Die Motivation für diese Entwicklung liegt einerseits in der Einsparung von Zeit und Energie sowie in den damit verbundenen Kosten, andererseits bietet sie auch ein Fertigungsverfahren für die Massenproduktion. [21, S. 218–219]

- **Ausschalen und Nachbearbeiten**

Bei einer Schlankheit von bis zu 10 = h/d kann die Erstellung der Stampflehmwand in einem Arbeitsgang durchgeführt werden, d.h. es findet zuerst die Ausführung der Verdichtung und anschließend das Ausschalen statt. Ab einer Schlankheit von 6 kann die Schalung abgenommen werden, jedoch muss eine Konstruktion gegen Knicken aufgestellt werden, bis die Trocknung abgeschlossen ist. Bei Unsicherheiten bezüglich der Lastenabtragung empfiehlt es sich, Rat bei einem Ingenieur einzuholen. Durch die langsame Trocknung ist die Stampflehmwand nach der Fertigstellung noch einige Zeit lang nicht vollständig tragfähig. Bei Wänden, die keine Lasten abtragen ist eine Konstruktion zur Stützung nicht vonnöten. Fehl-stellen wie Risse oder Abplatzungen sind nach dem Ausschalen auszubessern. Nacharbeiten wie das Abfegen oder Behandeln der Oberfläche können die Haftung von späteren Putzbelägen verbessern. [31, S. 220]

- **Trocknung**

Das Schwinden der Stampflehmwand tritt mit dem Trocknungsprozess ein. Mit Schwinden ist eine Volumenverminderung gemeint. Im Trocknungsprozess verliert der Lehm an Wasser, wodurch Risse oder Verformungen entstehen können. Ein Lehm mit hohem Wassergehalt weist einen starken Schwindungsprozess auf. Das erstellte Lehmbauteil sollte nicht einer direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein. Minimale Risse, die während des Trocknungs-prozesses aufkommen, können durch Druck auf die Rissufer behoben werden. Das Schützen der Stampflehmwand, vor Niederschlägen ist bei Sichtbauteilen während der Bau- und Trocknungszeit unabdingbar. Eine Stampflehmwand darf während des Trocknungsprozesses nie Frost ausgesetzt sein, da es ansonsten zu einer Volumenvergrößerung des Porenwassers kommen kann, was wiederum zu Abplatzungen führt. Sobald der Kern der Stampflehmwand weitgehend ausgetrocknet ist, besteht kein Frostrisiko mehr. [31, S. 221]

2.4 Die Idee

Da die Baubranche einen großen Teil zum des Energie- und Ressourcenverbrauch beiträgt, ist es nötig, diesen Anteil zu reduzieren [32]. Bei der Erzeugung von einer Tonne Zement kommt es zu einem CO2-Ausstoß von 590 Kilogramm. Das Bauwesen ist für 54 Prozent des Abfallaufkommens verantwortlich [33]. Angesichts dieser Tatsachen ist ein Umdenken zwingend erforderlich. Der Fokus sollte auf einem Bauen mit natürlichen Ressourcen liegen. Gleichzeitig ist der Energieverbrauch zu reduzieren. Die Inspiration ist es, eine „nachhaltige Baumethode“ bei gleichzeitiger Verwendung von neuen Technologien zu entwickeln. Hierbei spielt der Lehm eine wichtige Rolle, er ist ein nachhaltiger und umweltfreundlicher Baustoff. Findet eine Verdichtung von Lehm zu einer Stampflehmwand statt, kann diese tragenden Funktionen übernehmen. Um der heutigen Zeit gerecht zu werden, ist die Umsetzung eines automatisierten Fertigungsprozesses einer solchen Stampflehmwand vorteilhaft. Die Idee, die traditionelle Stampflehmtechnik zu automatisieren, beruht auf einer Kombination aus manuellem Stampfen und Schalungsklettern in einem robotergestützten Fertigungsprozess.

3. Angestrebte technische Funktionalitäten & relevante Parameter

3.1 Verdichtung von bindigen Böden

3.1.1 Allgemein

Der Zweck der Bodenverdichtung besteht darin, mit Luft und Wasser gefüllte Bodenporen zu verkleinern oder vollständig zu schließen. Die Steigerung der Dichte verbessert die Tragfähigkeit des Bodens und verhindert Verformungen und nachfolgende Setzungen. Die Basis nahezu sämtlicher Bauwerke, insbesondere im Tiefbau, führt auf eine präzise und kontrollierte Verdichtung zurück. Dabei spielte die richtige Wahl des Verdichtungsgerätes eine wichtige Rolle. Vor der korrekten Wahl des Gerätes, sollten die Zusammensetzung des Bodens sowie die Bodenart bekannt sein. Die verschiedenen Verdichtungsverfahren bei unterschiedlichen Bodenarten sind zu berücksichtigen.

3.1.2 Bodenarten

Böden lassen sich hinsichtlich ihrer Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Substanz in verschiedene Bodenarten unterteilen. Der Anteil der Korngrößen bestimmt die Bodenart. Die drei Bodenarten sind Sand (S), Schluff (U) und Ton (T). Ein Boden kann von all diesen drei Arten Anteile enthalten, jedoch bestimmt der größte Anteil die Bodenart. Die Bestimmung der Korngrößenverteilung wird nach DIN18123 mit einer Siebanalyse bei Sand und Kies oder bei Böden mit kleinsten Körnern mit einer Schlämmanalyse durchgeführt [34]. Eine Körnungslinie, auch Sieblinie genannt, wird mit dem Ergebnis aus einer dieser Analysen geschaffen. Diese Linie gibt dabei Auskunft über den prozentualen Anteil der Korngruppe sowie über die Verdichtbarkeit von Böden. Aus der Steigung dieser Sieblinie können Erkenntnisse über die Ungleichförmigkeit beziehungsweise Gleichförmigkeit des Bodens gewonnen werden [35]. Bei Böden kann zusätzlich in bindige und in nichtbindige Böden unterschieden werden. Ein bindiger Boden besitzt einen hohen Anteil an Schluff und Ton. Schluff wird umgangssprachlich auch als Lehm bezeichnet. Über einen langen Zeitraum verformt sich unter Druckbelastung der bindige Boden stark. In trockenem Zustand kann ein bindiger Boden einen guten Baugrund bilden. Bei Kontakt mit Wasser hingegen wird dieses absorbiert und der Boden verliert an Tragfähigkeit. Dementsprechend besteht eine hohe Empfindlichkeit gegen Frost. Die enthaltenen Tonmineralien neigen dazu, sich auszudehnen oder zusammenzuziehen. Bindige Böden besitzen ebenso einen Schlämmkornanteil von mehr als 15 Prozent [36, S. 189].

Ein nichtbindiger Boden enthält einen geringen Anteil an Feinkörnern. Diese Art von Boden besteht aus Sand und Kies mit unterschiedlich großen Körnern sowie in unterschiedlichsten Mischungsverhältnissen. Nichtbindige Böden sind relativ unempfindlich gegenüber ihrer Tragfähigkeit, auch wenn sie mit Wasser in Kontakt kommen. Bei nichtbindigen Böden treten in der Regel keine Frostschäden

auf, da die Volumenänderung des Wassers durch die Hohlräume im Korngefüge aufgenommen werden kann. Nichtbindige Böden sind Steine, Kies und Sand mit einer Mindestkorngröße von 0,063 mm. Die Kornklassifizierung kann sehr eng sein, wie beispielsweise bei einem Dünensand, oder sie kann weit gestuft sein, wie zum Beispiel bei einer Mischung aus Sand und Kies. [36, S. 190]

3.1.3 Verdichtungsverfahren

3.1.3.1 Statisches Verdichtungsverfahren

Statische Verdichtung geschieht durch die Kompression des Bodens mit Hilfe einer Last. Ein Fahrzeug zum Beispiel eine vibrationsfreie Straßenwalze fährt auf der zu verdichtenden Fläche und verdichtet diese im oberen Bereich durch ihr Eigengewicht beim Glätten der Fläche. Die Verdichtungsleistung hängt hauptsächlich vom Gewicht der Maschine ab. [37]

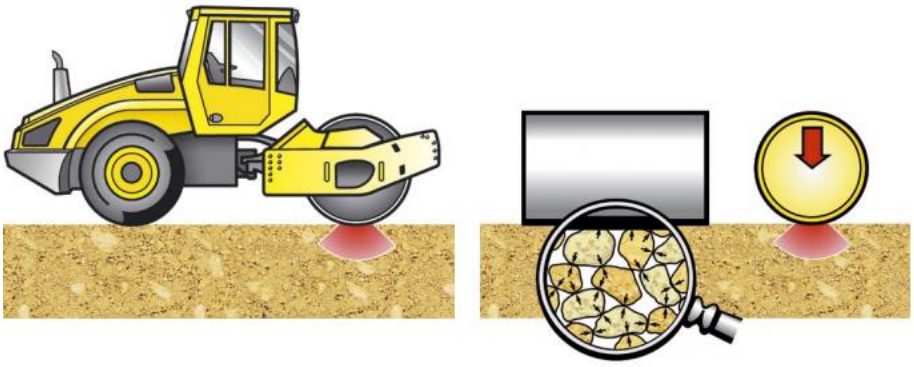

Abbildung 3.1-1: Statisches Verdichtungsverfahren [38]

Die statische Linienlast errechnet sich aus der Achslast der Walze geteilt durch die Bandagenbreite.

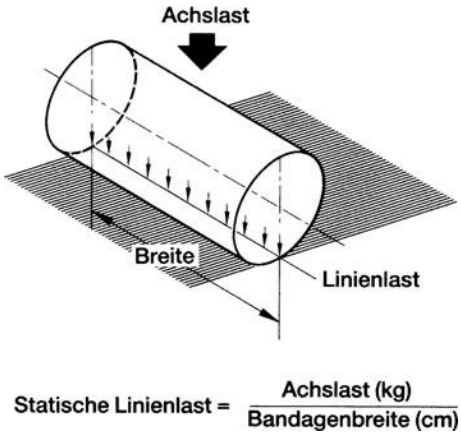

Abbildung 3.1-2: Lastverteilung [36]

3.1.3.2 Dynamische Verdichtungsverfahren

Beim dynamischen Verdichtungsverfahren wird Leistung durch das Eigengewicht und Vibration erreicht. Durch Stampfen oder Rütteln wird das verdichtete Material beziehungsweise die Asphaltmischung so der Vibration ausgesetzt, dass die Hohlräume durch die Umlagerung und Belastung des Korns auf ein Minimum reduziert werden. [39]

3.1.3.3 Dynamische Stampfverdichtungsverfahren

Der Kompressionswirkungsgrad beim Stampfen hängt von der Schlagzahl, der Hubhöhe, der Größe des Schwinggewichts und der Größe der Stampfplatte ab. Beim Stampfen liegt die Schlagzahl während der Verdichtung im Bereich von 500 bis 850 Schlägen pro Minute. Dabei verringert sich die Haftreibung zwischen den Partikeln, was wiederum die Tragfähigkeit sowie die Verdichtung erhöht. [37, S. 11]

3.1.3.4 Dynamische Vibrationsverdichtungsverfahren

Bei der Vibrationsverdichtung ist die von der rotierenden Unwucht erzeugte Fliehkraft viel größer als das Eigengewicht der Bodenplatte oder der Walze. Bei jeder Rotation der Unwucht hebt sich der Vibrationskörper an und fällt wieder mit seiner Aufprallenergie auf den Boden. Zusätzlich wird eine Fliehkraft erzeugt. Die kinetische Energie wirkt durch den Schwingkörper umgehend auf den Boden. Das zu verdichtende Material ist Vibrationen und Stampfen ausgesetzt. Durch Vibrationskompression lassen sich jedoch größere Tiefenwirkungen erzielen. Die durch die hohe Schlagzahl erzeugte Druckwelle dringt tief in den Boden ein und führt zu einer besseren Verdichtungsleistung. [40]

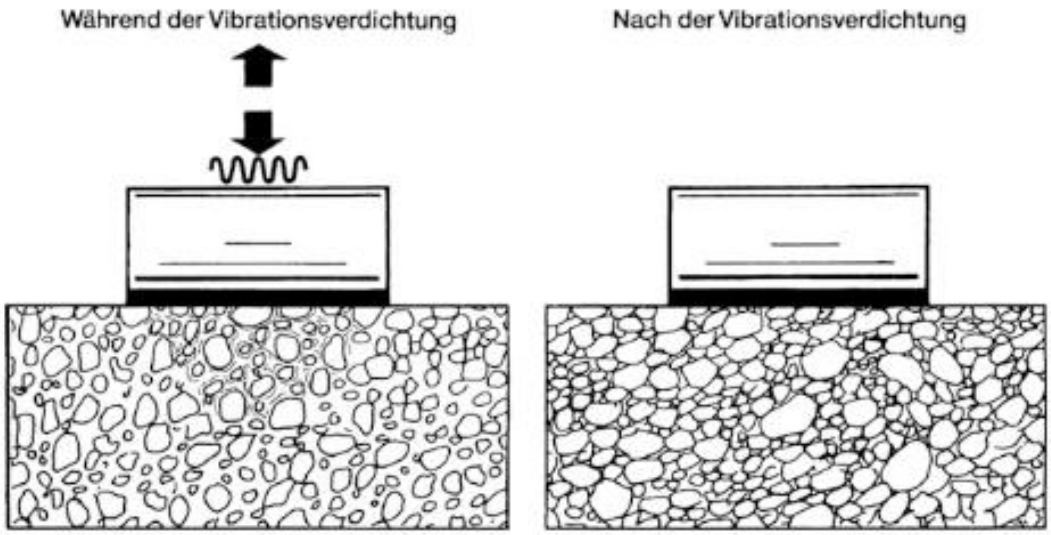

Abbildung 3.1-3: Prinzip der Vibrationsverdichtung [41]

3.1.4 Verdichtungswilligkeit des Materials

Der Grad der Bodenverdichtung hängt nicht nur von den eingesetzten Maschinen oder der darauf wirkenden Kraft ab, sondern mehrere weitere Faktoren beeinflussen die Verdichtungswilligkeit des Materials.

3.1.4.1 Rauheit und Form des Korns

Material mit glatter und runder Kornform lässt sich ideal verdichten. Im Gegensatz zu Böden mit scharfkantigen Körnern ist der Verdichtungsprozess mühsamer, allerdings ist dieser Boden belastbarer. Beispiele für Material mit einer geringen Rauheit sind Sand und Kies. Splitt und Schotter weisen dagegen eine große Rauigkeit und kantige Kornformen auf. [42]

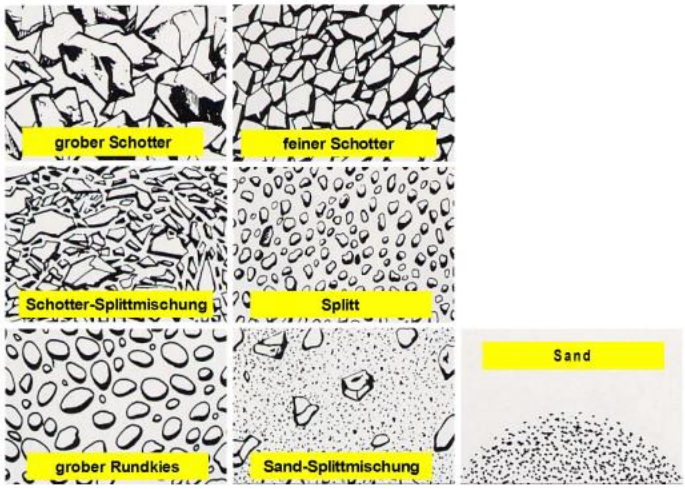

Abbildung 3.1-4: Kornformen Böden [37, S. 14]

3.1.4.2 Mischung der Korngrößen

Bei nicht bindigen Böden mit gleichmäßiger Kornform, wie bei Dünensand, ist eine Verdichtung kaum bis schwer durchführbar. Der Grund hierfür ist, dass bei zu gleichmäßiger Kornform keine kleinen Körner vorhanden sind, die die Hohlräume schließen und eine Verdichtung ermöglichen. Mischböden mit unterschiedlicher Kornform lassen sich jedoch hervorragend verdichten. [40]

3.1.4.3 Wassergehalt des Verdichtungsmaterials

Bei optimalem Wassergehalt legt sich das Wasser wie eine Schicht auf die einzelnen Körner, wirkt als Gleitmittel, reduziert die Reibung und fördert die Verdichtung. Bei zu hohem Wassergehalt füllen sich die Hohlräume zwischen den Körnern mit Wasser, was wiederum eine ideale Verdichtung verhindert. [38]

3.1.4.4 Bodenart

Bindiger Boden ist aufgrund seiner feinen Partikelgröße und des relativ hohen Wassergehalts schwer zu verdichten. Hier lässt sich der Boden nur durch Stampfen oder Kneten in Kombination mit Vibration verdichten. Andererseits sind nichtbindige und gemischtkörnige Böden leicht zu verdichten. [36, S. 168]

3.2 Automatisierung Robotik

3.2.1 Allgemein

Automatisierung ist der vollständige oder teilweise Ersatz von manueller oder menschlicher Handarbeit. Es handelt sich mit anderen Worten um Aktivitäten, die Roboter und Programme ohne menschliches Zutun oder Kontrolle automatisch übernehmen und steuern können. Dieser Prozess wird auch als “Maschinisierung“ bezeichnet [43]. Automatisierungssysteme können nun selbstständig Aufgaben oder Probleme von kontinuierlicher oder variabler Art und Weise lösen. Diese Funktion ermöglicht es den Mitarbeitern, mehr Zeit für andere Tätigkeiten zu verwenden, die Produktionszeit zu reduzieren, die Kosten zu minimieren und die Produktivitätsflexibilität zu maximieren. Arbeiter können schwere oder monotone körperliche Tätigkeiten reduzieren, neue Produktionsprozesse etablieren und zusätzliche Aufgaben hinzufügen. Die Verwirklichung erfordert komplexe Software und modernste Technologie, gesonderte Schulungen sind erforderlich, um vorhandenes Personal einzuweisen, welches das System bedienen und verstehen muss. Die Gründe für die Einführung von Automatisierung mit Robotern sind die Entlastung von Personal, das schwere körperliche Tätigkeit durchführt, die gleichzeitige Einsparung der Personalkosten, die Erhöhung der Produktionsmenge, die Verbesserung und die Vergleichmäßigung der Fertigungsqualität sowie die Vermeidung von Arbeitsunfällen. [44]

3.2.2 Robotersysteme und Bauformen

Die in verschiedensten Varianten von diversen Herstellern angebotenen Industrieroboter werden in der Regel als standardisierte Grundgeräte gekauft und mit anwendungsspezifischen Tools an die jeweilige Tätigkeit angepasst. Diese Roboter lassen sich anhand ihrer Kinematik voneinander unterscheiden. Die meisten Roboter, die derzeit in Verwendung sind, sind sogenannte seriellen Roboter [45]. Typische serielle Roboter sind Vertikal-Knickarm-Roboter, SCARA-Roboter und Portalroboter. Die meisten Knickarmroboter werden mit sechs Achsen produziert. Der häufigste Vertreter der seriellen Kinematik ist der Knickarmroboter. Herkömmliche Knickarmroboter haben drei Grunddrehachsen, jedoch mindestens eine, hauptsächlich aber drei kurbelbare Drehachsen. Die Überlegenheit dieser Kinematik liegt in ihrer platzsparenden Weise und ihrer vielfältigen Einsetzbarkeit. SCARA ist die Abkürzung für "Selective Compliance Assembly Robot Arm"[46, S. 18]. Bei einem SCARA Roboter handelt es sich um eine Roboterart mit vier Achsen. Diese stellen eine besondere Variante des Knickroboter dar. Von diesen vier Achsen bewegen sich zwei Achsen horizontal, eine Achse vertikal und die letzte Achse führt eine Drehbewegung aus. Aufgrund ihrer exzellenten und zügigen Bewegungsabläufe werden SCARA Roboter größtenteils für Bestückungsprozesse eingesetzt. Der Portalroboter ist aufgrund seiner Konstruktion langstreckentransportfähig und besitzt min-

destens 3 Achsen. Entsprechend seiner Beanspruchung ist ein Portalroboter aus Stahl oder Leichtmetall gefertigt. Die Traglast des Roboters ist abhängig von der Länge der Achsen. Es gibt 3 verschiedene Arten des Portalroboters, den Linienportalroboter, den Auslegerportalroboter und den Flächenportalroboter. Der Linienportalroboter ist die einfachste Ausführung. Hier befinden sich alle Punkte die angesteuert werden müssen, auf einer Linie. Ein Schlitten auf der Achse führt die horizontalen Bewegungen aus. Der Portalarm ist für die Vertikalbewegung zuständig. Der Auslegerportalroboter besitzt eine weitere Bewegung, die orthogonal zu Portallängsachse verläuft. Wenn senkrechte oder waagerechte weite Entfernungen abgedeckt werden müssen, kommen somit Flächenportalroboter zum Einsatz [45]. Die parallelen Roboter, die eine deutlich andere Bauart als die seriellen Roboter aufweisen, werden auch als „Portys“ bezeichnet. Den Namen Parallelroboter erhielt der Roboter aufgrund seiner von mehreren Gelenkketten gleichzeitig angesteuerten Bewegung, die parallel ausgeführt wird. Parallelantriebe haben den Vorteil, dass sie weniger Einzelfehler verursachen und somit präzisere Roboterkonfigurationen als herkömmliche Industrieroboter ermöglichen. Der am meisten verbreitete Parallelroboter ist der „Delta-Roboter“[46, S. 19]. Dieser besitzt eine Stabkinematik und erhielt seinen Namen aufgrund der 3 Stäbe, die wie bei dem griechischen Buchstaben Delta zu einem Dreieck geformt sind. Aufgrund seiner Leichtigkeit und Schnelligkeit, kommt der Delta-Roboter beim Verpacken in Fabriken zum Einsatz. Eine spezielle Bauart des Parallelroboters ist der etwas flexiblere Seilroboter. Die Vorteile von diesem Roboter sind zum einen der größere mögliche Arbeitsraum sowie der einfache Aufbau der Mechanik des Roboters. [46, S. 19]

3.2.3 Aufbau, Steuerung und Programmierung

Der Effektor oder auch die Hand ist der vordere Teil, in dem das Werkzeug eingespannt ist, mit dem die Arbeiten ausgeführt werden (1). Der Manipulator oder auch Roboterarm ist der größte Teil des Roboters und damit der Teil, mit dem die wesentliche Bewegung des Roboters ausgeführt wird (2). Die Schwinge ist das Verbindungstück des Roboterarms mit dem Karussell, sie übernimmt die Bewegungen von Achse 2 und 3 (3). Das Karussell ist die runde Plattform zwischen der Schwinge und dem Grundgestell. Sie übernimmt die Bewegung der Achse 1 und kann somit den gesamten Roboter im Kreis drehen (4). Das Grundgestell ist die Basis des Roboters und trägt somit das komplette Gewicht. Diverse Elektroinstallationen können an dem Grundgestellt befestigt sein (5). [45]

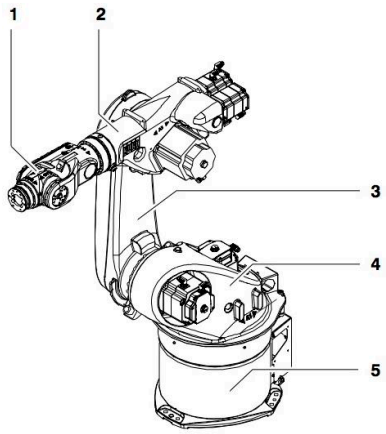

Abbildung 3.2-1: Aufbau Roboter [47]

Dieser Roboter besitzt 6 Achsen wie in Abbildung 3.2-2 zu sehen ist.

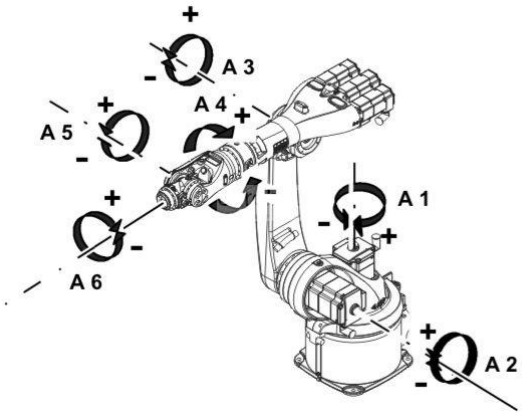

Abbildung 3.2-2: Achsen Knickarmroboter [48]

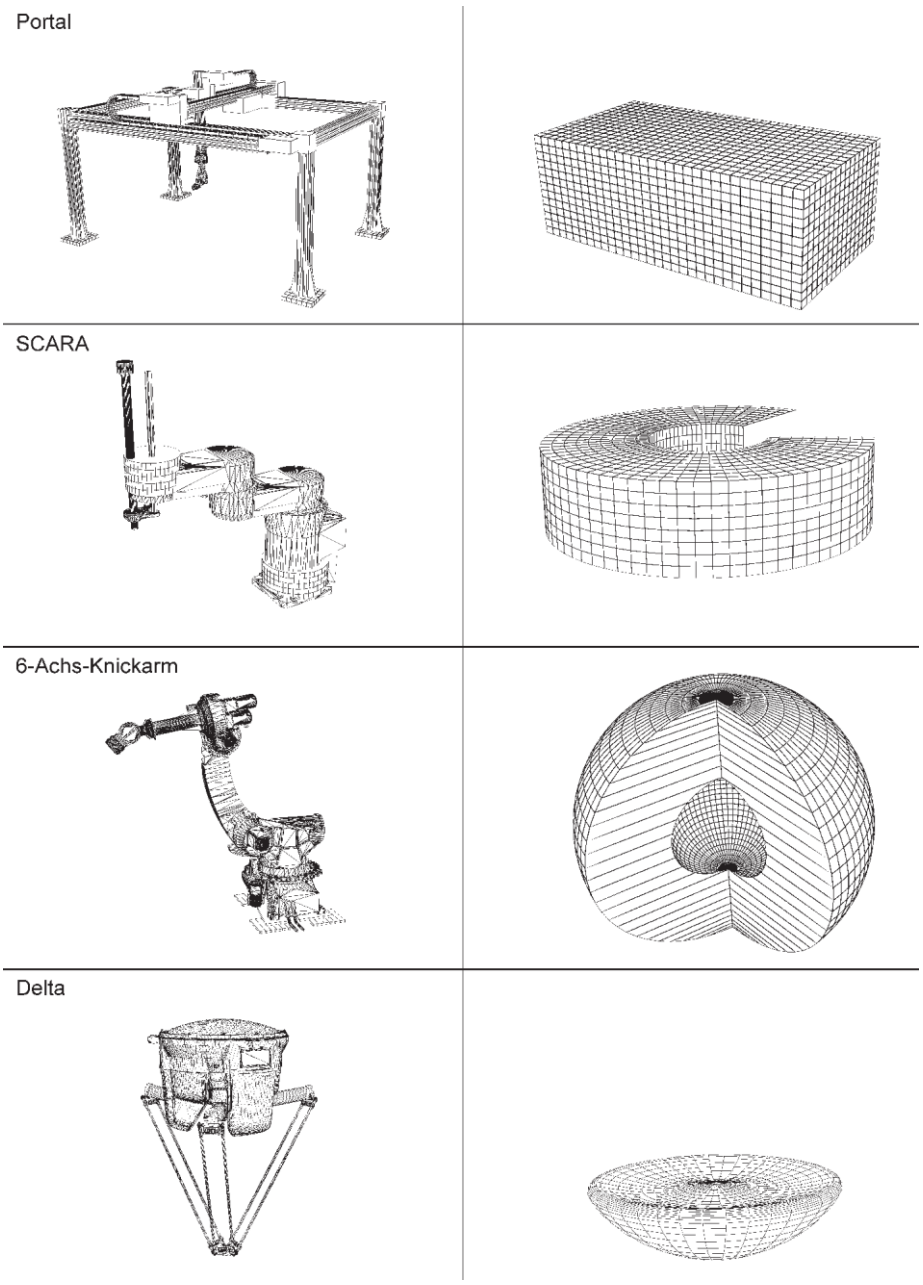

Abbildung 3.2-3: Roboter-Bearbeitungszonen [49]

Die Aufgaben einer Robotersteuerung besteht darin, die Mechanik des Roboters so anzusteuern, dass diese die Bearbeitungstätigkeit korrekt ausführen kann. Dafür werden in der Regel eine separate Roboterschalttechnik und ein Programmierhandgerät verwendet.

Abbildung 3.2-4: Prinzip Roboter-Steuerung [49]

Die Steuerungsarten werden nach Bewegungsverhalten und Art der Bewegungsprogrammierung unterschieden.

Die Punktsteuerung oder PTP-Steuerung (PTP: Point to Point) ist bei Robotern und Werkzeugmaschinen die simple, preisgünstigste und schnellste Steuerungsart. Sie ist eine Form der CNC-Steuerung (CNC: computerized numerical control), bei der der Start- und Endpunkt der Bewegung festgelegt werden kann, was wiederum den Vorteil mit sich bringt, dass der Zielpunkt exakt angefahren werden kann. Die Geschwindigkeit wird während der Achsbewegung nicht angepasst. Somit erfolgt keine Interpolation zwischen den Achsen. Die Punktsteuerung kommt beim Be- und Entladen von Gütern, beim Punktschweißen, beim Stanzen und beim Bohren zum Einsatz. [50]

Die Bahnsteuerung, abgekürzt CP und im Englischen auch als Continuous Path bezeichnet, ist eine Steuerungsart, die einen mathematischen definierten Bewegungsablauf ermöglicht. Der Motion Controll Interpolator berechnet die Werte auf der programmierten Raumkurve entsprechend der vorgegebenen Bahnfunktion, wie einen Kreis, eine Linie oder einen Polynomzug, und gibt die Werte an die Achssteuerung weiter. Die meisten Anwendungsgebiete der Bahnsteuerung sind Laserschneiden, Bahnschweißen und Aufbringen von Kleberaupen, denn die Bahnsteuerung hat den Vorteil, dass der Bewegungsablauf exakt eingehalten wird. [51, S. 8]

Bei der Vielpunktsteuerung, auch Multi Point Steuerung (MP-Steuerung) genannt, wird eine große Anzahl an Punkten auf einer Strecke festgelegt. Diese Steuerung wird vor allem im sogenannten Playback-Verfahren genutzt. Bei diesem Verfahren wird der abgeschaltete Roboterarm direkt vom Programmierer durch die vorgesehene Bahn geführt. Der Roboter speichert die exakten Positionen und bildet diese Bewegung mehrmals nach. [52]

Zur Programmierung der Robotersteuerung können Online-Programmierung oder Offline-Programmierung verwendet werden. Die Robotersteuerung ist sehr komplex und kann sogar andere Tools integrieren [53, S. 408].

ONLINE

Eine Online-Programmierung wird unmittelbar am Roboter oder mit einer Verbindung durchgeführt. Folgende Verfahren werden online programmiert.

Bei der Teach-In-Programmierung führt der zuständige Programmierer den Industrieroboter durch das Bedienfeld in die richtige Position. Der Arbeitsablauf wird solange wiederholt, bis der Roboter einen vollständigen Arbeitszyklus abgeschlossen hat. Die Bewegung zwischen Punkten wird angefahren und anhand von Parametern aufgezeichnet. Die Geschwindigkeit und Beschleunigung werden dementsprechend angepasst. Bei einigen Robotern ist es auch möglich, die erforderliche Genauigkeit anzugeben [53, S. 408].

Bei einem Playback-Verfahren führt der Programmierer den Roboterarm im ausgeschalteten Zustand händisch durch den Arbeitszyklus. Dieser wird vom Roboter gespeichert und die zuvor gelernten Bewegungen anschließend nachsimuliert [53, S. 409].

Eine Variante der Teach-In-Programmierung ist die grafische Benutzeroberfläche. Diese beschreibt die tatsächliche Arbeitsumgebung und reduziert zugleich den Programmieraufwand. [52]

OFFLINE

Im Gegensatz zu einer Online-Programmierung ist die Offline-Programmierung unabhängig vom Roboter. Die Programmierung kann mit einem nicht in Verbindung stehenden Computer durchgeführt werden, womit es zu keinem Stillstand der Maschine kommt. [54]

Zu Offline Programmierung gehört die Textuelle Programmierung. Hierbei wird die Programmierung des Arbeitszyklus in einer für sich eigene Sprache niedergeschrieben. Daher lässt sich der Programmiertext gut verändern und gleichzeitig schriftlich festhalten. [52]

CAD (CAD: Computer-Aided Design) ist ein Konstruktionszeichnungs- und Simulationsprogramm. Dieses wird im Ingenieurswesen und in der Architektur vermehrt eingesetzt. Der Programmierer legt hierbei den Bewegungszyklus in 3D fest, wobei die Umgebung und die Tools bereits abgebildet sind. Hiermit können Unfälle, die den Roboter enorm beschädigen, vermieden werden, da der Roboter zu diesem Zeitpunkt nur in der Simulation existiert. Im Vergleich zu einer Teaching Programmierung, ist eine CAD-Programmierung langsamer und schwieriger. [55]

4. Führende Konkurrenzprodukte/-verfahren

4.1 Stand der Technik

Zunächst werden drei Bauprojekte, bei denen Teile der Konstruktion aus Stampflehm bestehen, separat betrachtet und miteinander verglichen. Diese Analyse soll zeigen, dass die Umsetzung von Gebäuden, welche mit einer Stampflehmbauweise erstellt worden sind, in Europa immer mehr an Bedeutung gewinnt.

4.1.1 Alnatura Campus

Abbildung 4.1-1: Alnatura Campus [56]

Die Planung des Alnatura Campus Projekt hat das Stuttgarter Architekturbüro haascookzemmrich STUDIO2050 für den Bio-Lebensmittelhändler Alnatura übernommen. Der Alnatura Campus wurde in den Jahren 2016 und 2017 fertiggestellt und wird nun als Firmensitz für 500 Mitarbeiter der Firma Alnatura genutzt [57]. Die Stahlbetonskelettkonstruktion ist das hauptsächliche Tragwerksystem des Gebäudes. Die Konstruktion ist eine Hybridkonstruktion bestehend aus Stahlbetonstützen, Stampflehmwänden an der Nord- und Südseite, zwei Pfosten-Riegel-Glasfassaden und einem Dachtragwerk aus Holzbindern. Das Holzsatteldach ist mit einem asymmetrischen Dachfirst gebaut, wobei zwei nicht miteinander verbundene Systeme aus Holzbindern auf Stahlbetonstützen stehen. Die Firma Lehm Ton Erde Baukunst GmbH führte den Bauprozess unter der Leitung von Martin Rauch aus. Die Wände wurden hier komplett maschinell vorgefertigt, jedoch wurden eine 17 cm starke Kerndämmung sowie die Rohre einer Wandheizung gleich mit eingestampft [58]. Die Dicke der Stampflehmwand mit einem Sicherheitszuschlag von 6 cm beträgt insgesamt 69 cm. Um Zeit und Geld zu sparen, wurde zunächst ein 30 Meter langes Großbauteil erstellt, dann die Schalung entfernt und anschließend in kleinere Blöcke geschnitten. Jeder vorgefertigte 1 x 3,5 m Stampflehmblock wiegt ca. 4,5 Tonnen. Konstruktiv besteht ein Block aus drei Elementen: einer 38 cm dicken äußeren Stampflehmschale, einer 14 cm dicken Innenschale und einer 17 cm dicken Kerndämmschicht aus recycel-

tem Schaumglaskies [59]. Die beiden äußeren Tonschalen sind durch eine Dämmschicht mittels eines Geogitters miteinander verbunden. Bis zu 70 % des Aushubmaterials der Großbaustelle Stuttgart 21 wurden zum Mischen von Materialien verwendet, um eine bräunlich-gelbe Farbe zu erhalten. Als Bindemittel wurde Lehm aus einer Ziegelei sowie aus Lavaschotter zur Verbesserung der Dämmwirkung verwendet [60, S. 90].

Abbildung 4.1-2: Konstruktion Alnatura Campus [57]

Abbildung 4.1-3: Verdichtungsprinzip Stampflehm [57]

Abbildung 4.1-4: Stampflehmblöcke [61]

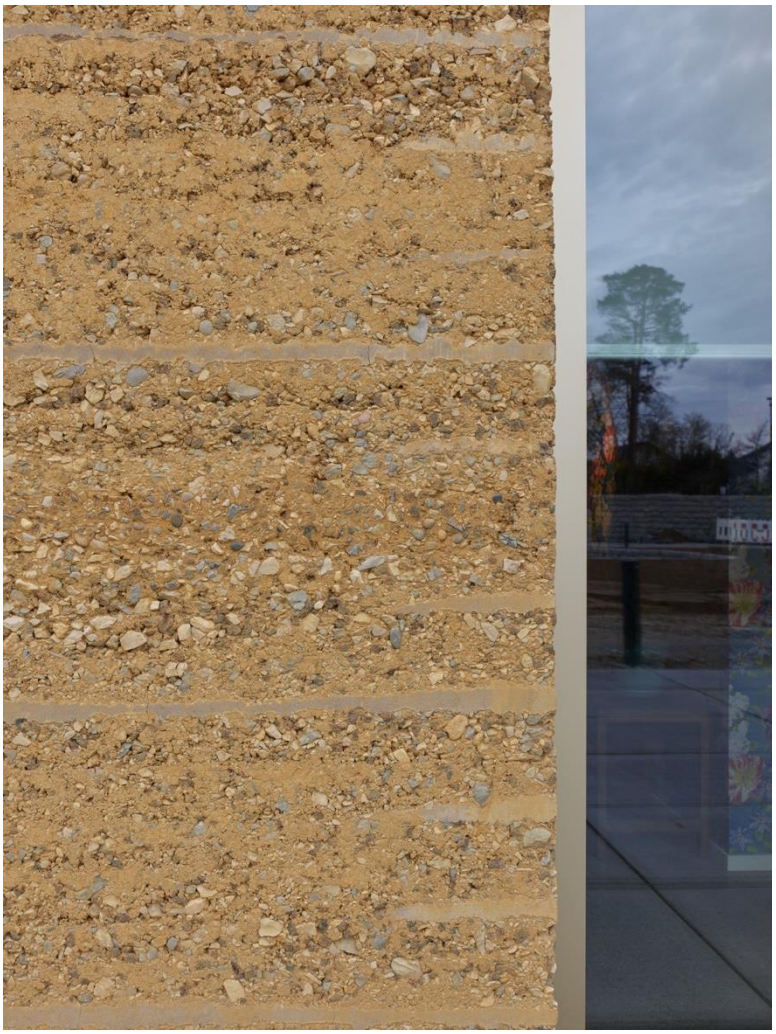

Abbildung 4.1-5: Fassadenansicht Stampflehm [62]

4.1.2 Schwimmbad in Toro (Spanien)

Im Jahr 2010 wurde in Spanien nordwestlich von Madrid das Projekt in Toro im Rahmen eines Wettbewerbs entworfen. Die Architektur des Schwimmbads bezieht sich auf die Geschichte der Stadt und die Merkmale monumentaler Gebäude. Aus diesem Grund wurde beschlossen die Wände aus Stampflehm zu erstellen. 60 cm dicke Stampfwände erstrecken sich in diesem Gebäude teils bis zum ersten Geschoss sowie auch bis in das zweite Geschoss. Die Hauptlängswände wurden wegen einer Raumhöhe von 6,40 m mit zylindrischen Stahlrohren kombiniert, um das Tragsystem zu verstärken und 36 m Spannweite zu ermöglichen [63]. Die nicht vorgefertigte Wand ohne Dämmung übernimmt hierbei die tragende Funktion. Die Wand wurde in situ auf der Baustelle gestampft. Um Erosion zu verhindern, wurde die Oberfläche der Stampflehmwand innen und außen mit Siloxan additiv behandelt. Darüber hinaus fanden Zusätze wie Kalk, Sand und Zement Verwendung, um eine höhere Festigkeit zu erzielen [64].

Abbildung 4.1-6: 3D-Modell Schwimmbad Torro [65]

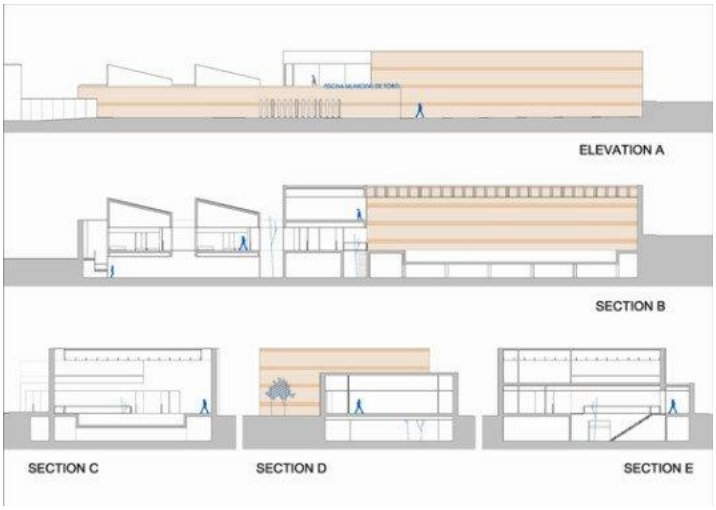

Abbildung 4.1-7: Schnittansicht Schwimmbad [66]

Abbildung 4.1-8: Innenbereich Schwimmbad [65]

4.1.3 Kräuterzentrum Ricola

Das Projekt Ricola Kräuterzentrum ist bisher das größte Lehmbaugebäude Europas und das erste Beispiel für den großflächigen Einsatz von mit einem hochmechanisierten Verfahren vorgefertigten Stampflehmwänden. Die für die Wände verwendeten Materialien stammen direkt von der Baustelle und wurden zusätzlich mit anderen Steinmaterialien in und aus der Umgebung im Umkreis von 8 km integriert. Die Stampflehmwand ist selbsttragend und benötigt nur wenige importierte Materialien zur Erhöhung der Standfestigkeit. Die gesamte Konstruktion besteht aus 70 vorgefertigten Stahlbetonstützen und 666 Stampflehmblöcken[67]. Die Wände sind 45 cm dick und mit Betonfertigteilen verbunden. Es geht also da-bei um einen komplett mechanisierten Bauprozess für ein hybrides Gebäude mit 111 x 28,9 m Fläche und 10,8 m hohen Wänden. Der Dachüberstand beträgt 50 cm, was im Vergleich zu 10,8 m Wandhöhe sehr gering ist. Martin Rauch hat somit eine andere Wetterschutzmethode entwickelt. In die vorgefertigte Stampflehmwand ist eine 2,5 cm hohe Trasskalkmörtelschicht integriert. Diese wurde mit einer Tiefe von 10 bis 15 cm alle etwa 60 cm miteingestampft [68, S. 1 A6]. Die Trasskalkmörtelschichten brechen den Fluss des Schlagregens auf der Außenfassade, was zu einer sehr geringen Erosion führt. Die Festigkeit der Mauer ließ sich nur durch das Verdichten von Steinen (bis 30 mm Durchmesser) im Materialgemisch erreichen, da keine zusätzlichen Stabilisatoren verbaut worden sind [68, S. 1 A8].

Abbildung 4.1-9: Kräuterzentrum Ricola [69]

Abbildung 4.1-10: Baustelle Kräuterzentrum [70]

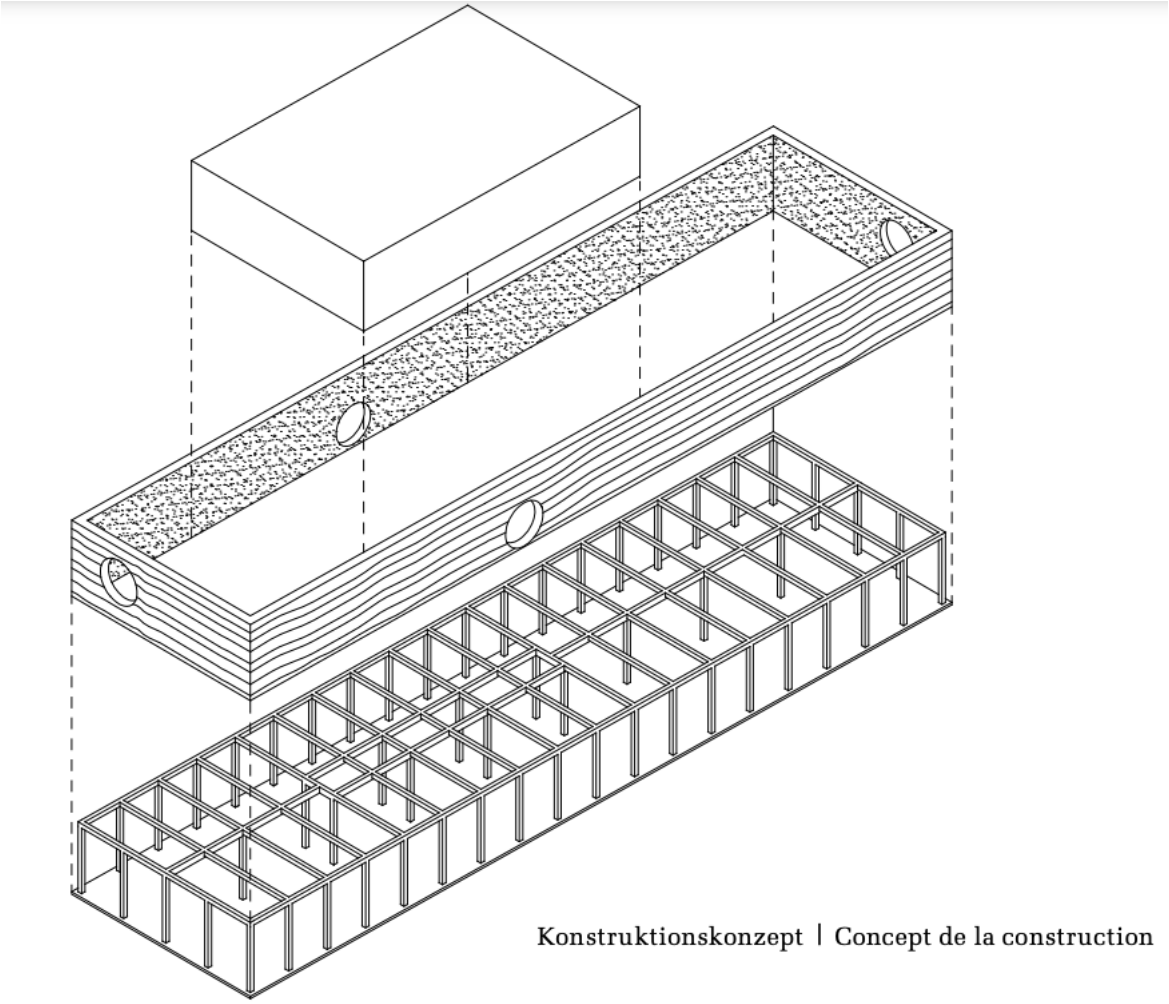

Abbildung 4.1-11: Konstruktionskonzept Stampflehmwand [71]

Abbildung 4.1-12: Außenwand Stampflehmblock [72]

4.2 Technik 1 „Formearth“

Während seines Studiums im Bereich Geographie bemerkte David Freeman in Australien, dass Stampflehm ein große Entwicklungsmöglichkeit als nachhaltigen Baumethode besitzt. Mit der Absicht die Bauindustrie zur mehr Nachhaltigkeit zu bringen, gründete Freeman das Unternehmen „Formearth“, welches sich auf Stampflehmtechnologien spezialisiert. Das Unternehmen ist zurzeit mit der Entwicklung einer Maschine, die ohne menschliches Zutun eine Stampflehmwand erstellt, beschäftigt. Die Maschine arbeitet mit einer nach oben fahrenden Rahmenschalung, die dem Prinzip einer Gleitschalung ähnelt [73]. Das Beschicken mit Baustoff folgt automatisch, indem ein Drahtseil immer mehr auf Zug gespannt wird und somit Baustoff hinzufügt. Anschließend folgt eine Verdichtung mit Hilfe eines Stampfgerätes, welches ebenso im Tiefbau seine Verwendung findet. Die ideale Verdichtung des Materials wird mithilfe von Sensoren genauestens überprüft. In knapp 50 Minuten kann mittels dieser Maschine eine drei Meter hohe und zwei Meter breite Stampflehmwand erstellt werden. Für die Erstellung einer solchen Wand benötigt es gerade einmal nur 3 kWh Strom. Zum Vergleich: Eine Kilowattstunde (kWh) kostet durchschnittlich in Deutschland 32 Cent. [74]

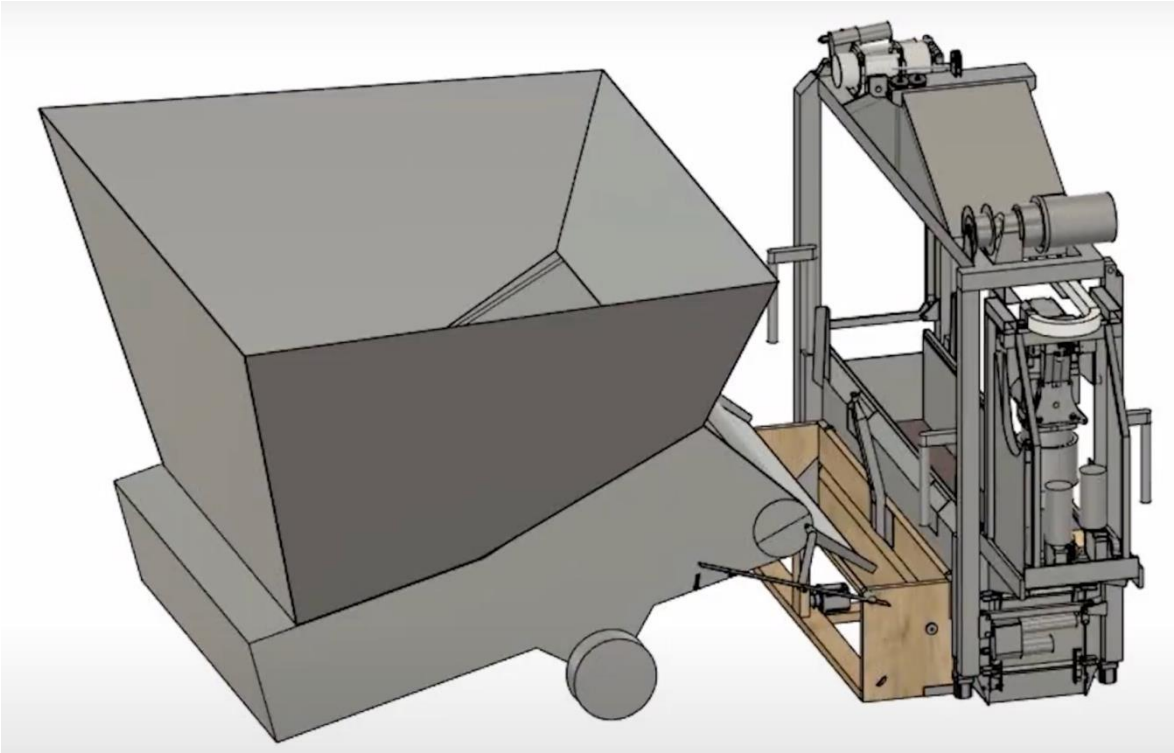

Abbildung 4.2-1: 3D-Modell Formearth 1 [73]

Abbildung 4.2-2: 3D-Modell Formearth 2 [73]

Abbildung 4.2-3: Prototyp Formearth [75]

4.3 Technik 2 Urschell Walls Building Machine

Der 1880 geborene Amerikaner Urschell William entwickelten in den späten 30er Jahren des 20. Jahrhunderts ein Fertigungsverfahren unter der Verwendung der Stampflehmbauweise. 1910 gründete der Amerikaner in Chesterton, Indiana (USA), das Unternehmen Urschell Laboratories. Das Unternehmen stellt bis heute noch industrielle Schneidmaschinen für Lebensmittel her. Der Name seiner entwickelten Fertigungsmaschine lautet „WALL BUILDING MACHINE“.

Abbildung 4.3-1: Urschell William [76]

Abbildung 4.3-2: Lebensmittelschneidmaschine Urschel Labortories [77]

Diese Maschine macht mit Hilfe der Auslegerstruktur eine Kreisbewegung, zerlegt das Bodenmaterial automatisch in Streifen und verdichtet es mit drei Stampfern. Der Radius und die Höhe der zu erstellenden Wand lassen sich mittels des Auslegers problemlos verstellen [78]. Außerdem kann der Anstellwinkel am Ausleger eingestellt werden, sodass die Maschine gewissermaßen ein kuppelförmiges Dach bilden kann. Bei der Erstellung einer Wandöffnung für eine Türe oder Fenster wurde an dieser Position die Maschine ausgestellt oder das Füllmaterial ausgelassen. Betonbewehrungen wurden nur in Ausnahmefällen eingelegt, also an jenen Orten, an denen es Bedenken bezüglich der Statik gab. Beispiele dafür sind größere Toröffnungen oder Anschlussbereiche zum Dach. Die Maschine stoppt automatisch, wenn der Trichter kein weiteres Material erhält, welches durch die 3 Stampfer eigentlich zur Verdichtung gebracht werden soll. Die Beschickung der Maschine folgt händisch. Aufgrund der kreisförmigen Bewegung wird hierdurch eine Oberfläche produziert, die besonders glatt und porenfrei ist. Die Verbindung der einzelnen Schichten aus Stampflehm wurde durch eine Nut verbessert. In die Fläche der Nut wurde eine Bewehrung, die auf Zug beansprucht wird, eingelegt. Eine Schutzmaßnahme gegen Erosion und Oberflächenwasser stellt eine Abtropfkante an der Außenseite der Wand dar. [71, S. 57]

Abbildung 4.3-3: „Urschel Wall Machine“ 1 [79]

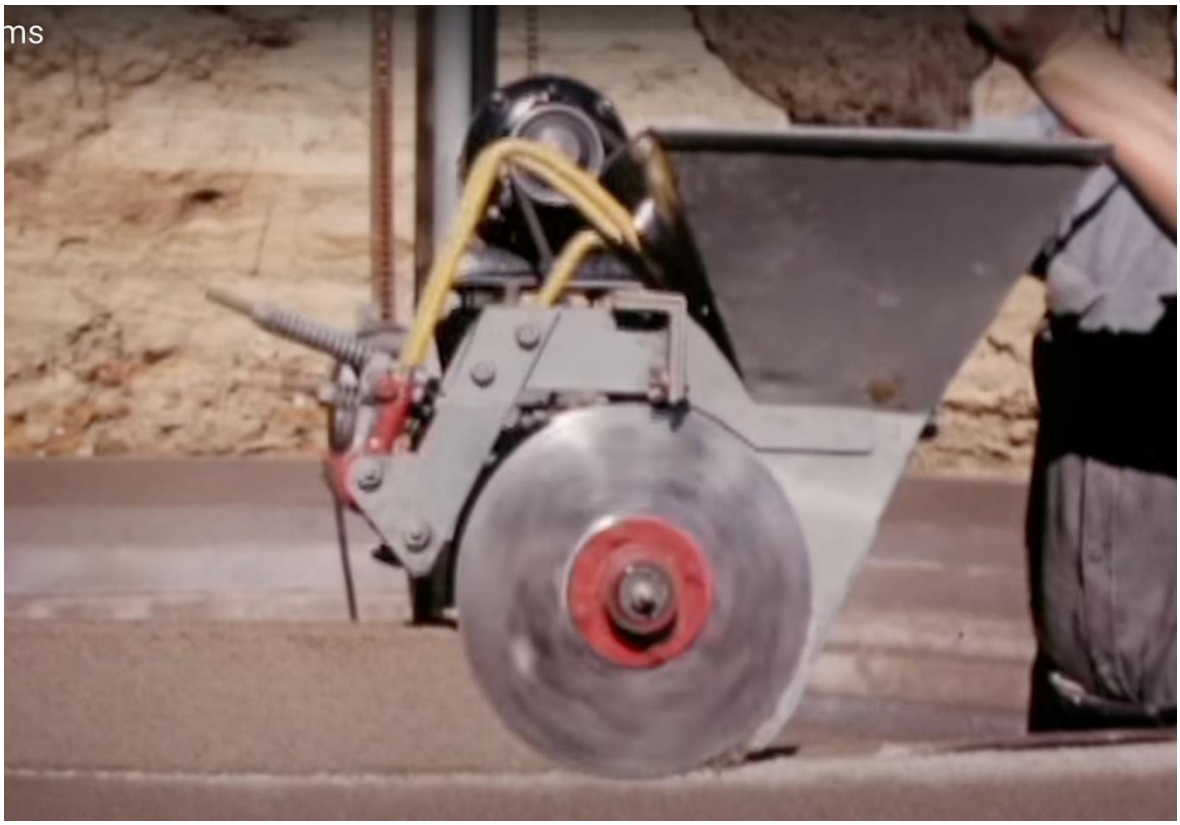

Abbildung 4.3-4: „Urschel Wall Machine“ 2 [79]

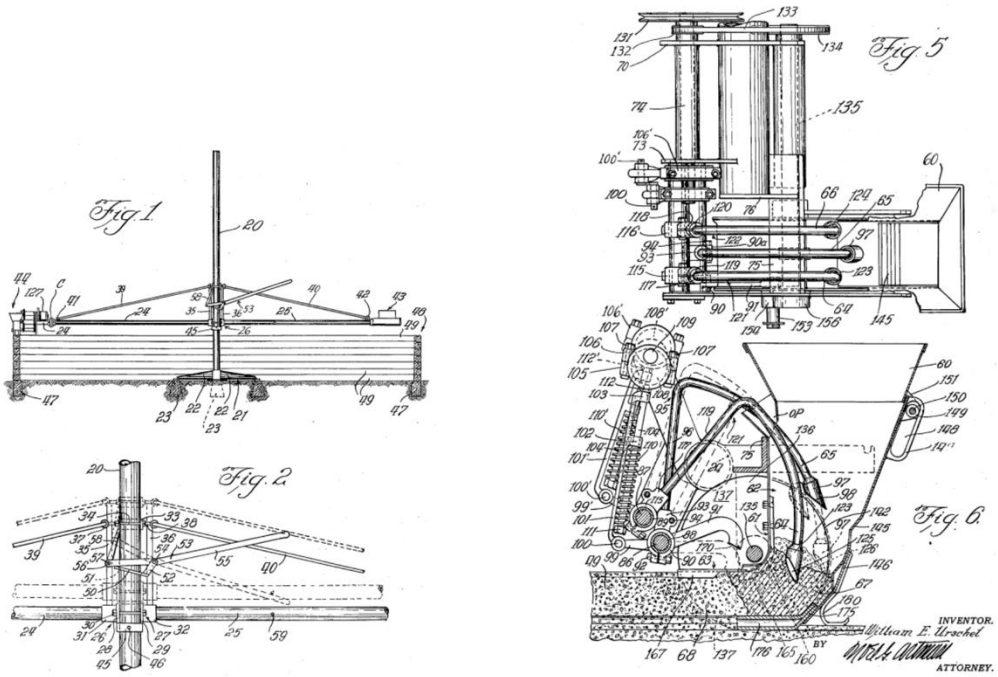

Abbildung 4.3-5: Detailzeichnung Wall Machine [78]

4.4 Technik 3 Fertigteile

Im Stampflehmbau werden immer häufiger vorgefertigte Teile verwendet. Durch die Herstellung von vorgefertigten Bauteilen findet keine Beeinträchtigung der Produktion durch Witterungseinflüsse statt und der Zeitaufwand lässt sich stark reduzieren. Vorgefertigte Teile können je nach Belieben oder auch gewünschtem detailliertem Design gefertigt werden und bieten einen hohen Grad an Individualität. Während des Trocknungsprozesses lagern die bis zu sieben Tonnen schweren Bauteile in einer Fertigungshalle, wodurch der langwierige Trocknungsprozess auf der Baustelle komplett vermieden werden kann. Das macht den Bauablauf planbarer und verbessert den Arbeitsablauf enorm. Ein großer Vorteil der monolithischen Wand sind die genuteten Trennnähte, die verputzt und leicht zu modifizieren sind [71, S. 61]. Ein Fertigteil Hersteller ist das bekannte Unternehmen Lehm Ton Erde Baukunst GmbH des Architekten Martin Rauch mit Sitz in Österreich. Nicht nur Außenwände, sondern auch Innenwände lassen sich in Form von Fertigteilen erstellen. Der Herstellungsprozess in Fertighallen unterscheidet sich von einer Erstellung auf der Baustelle nicht extrem. Jedoch kann in einer Fertigungshalle eine deutliche größere Menge produziert werden.

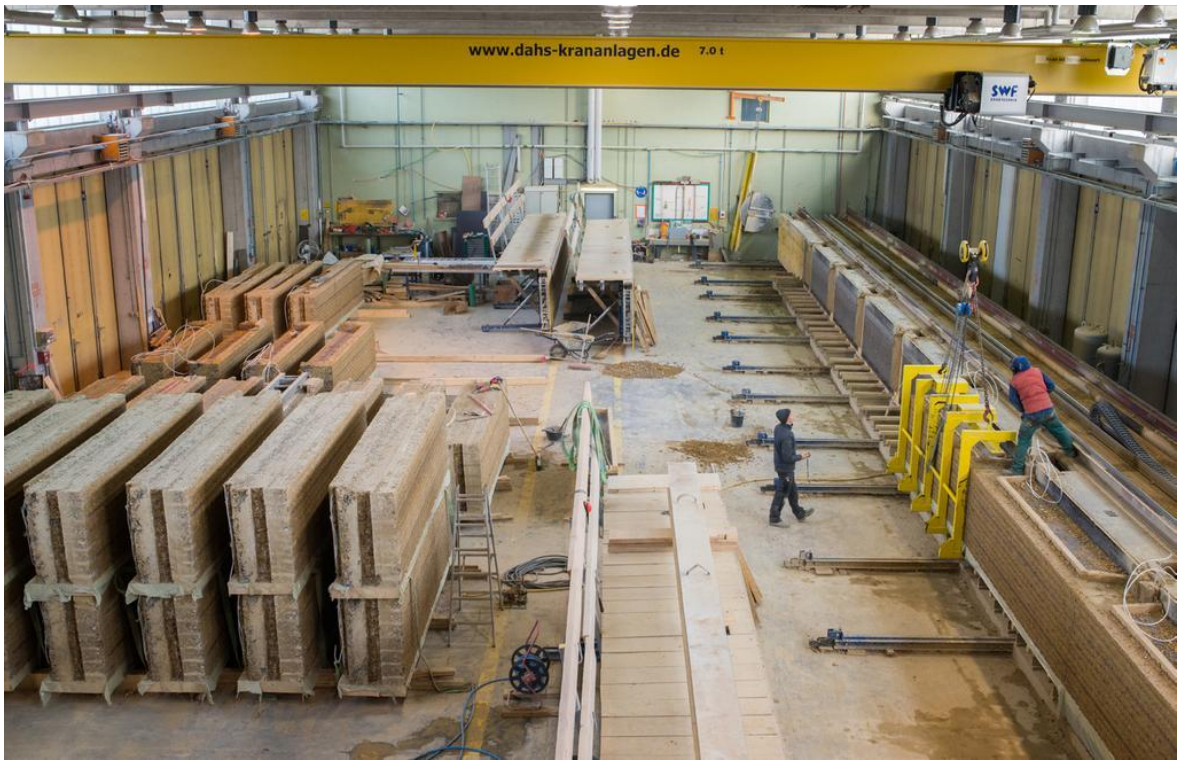

Abbildung 4.4-1: Fertigungshalle Stampflehmblöcke [80]

5. Marktabschätzung

5.1 Marktpotential

Um den zukünftigen Markt für diese nachhaltige Baumethode, also für Gebäude mit Stampflehmbauweise besser einschätzen zu können, sind ein Herunterbrechen und Aufzeigen des Potentials sowie der Vor- und Nachteile einer solchen Baumethode notwendig.

Beginnen lässt sich mit einer Statistik des Statistischen Bundesamts, auf der Folgendes zu sehen ist:

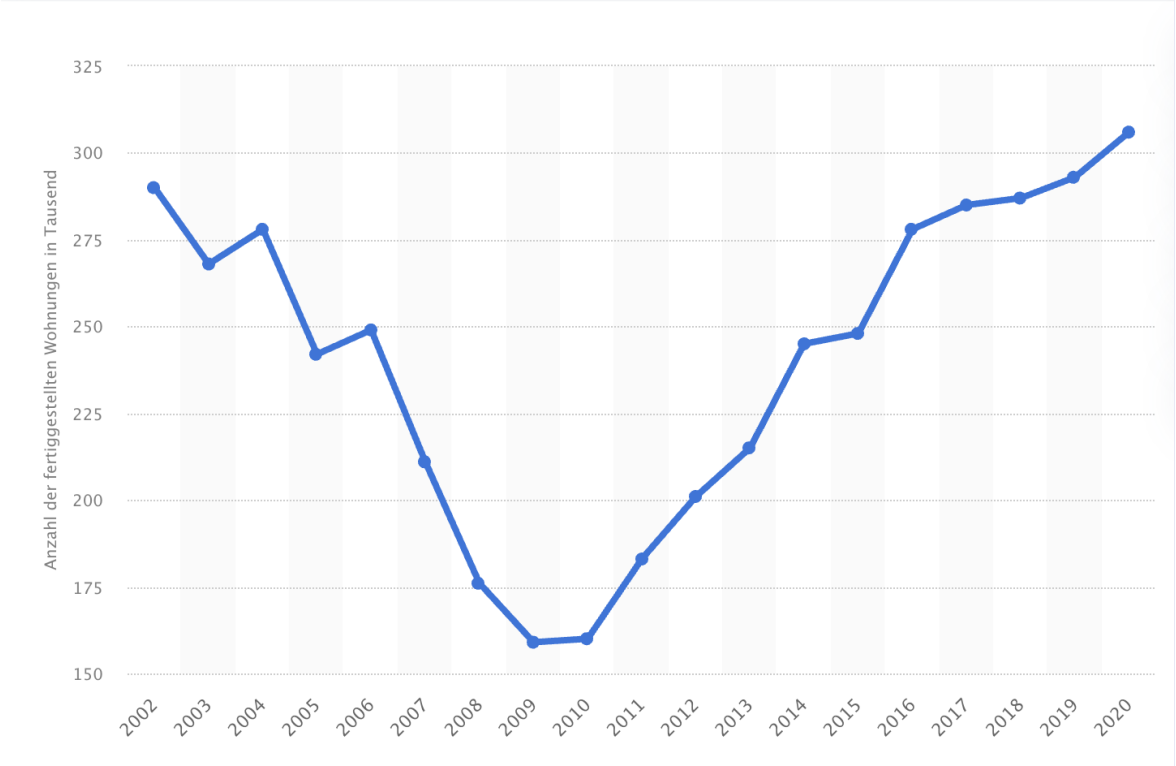

Abbildung 5.1-1: Baufertigstellungen – in Deutschland 2002- 2020 [81]

Im Jahr 2020 beträgt die Zahl der fertiggestellten Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland rund 306.000. In den letzten 20 Jahren, während der weltweiten Finanzkrise ist die Zahl der Baufertigstellungen deutlich zurückgegangen. Seit 2010 ist die Zahl der fertiggestellten Wohnungen jedoch wieder gestiegen. Daraus lässt sich schließen, dass es für die nächsten zwei bis drei Jahre einen weiteren Anstieg der Baufertigstellungen geben wird.

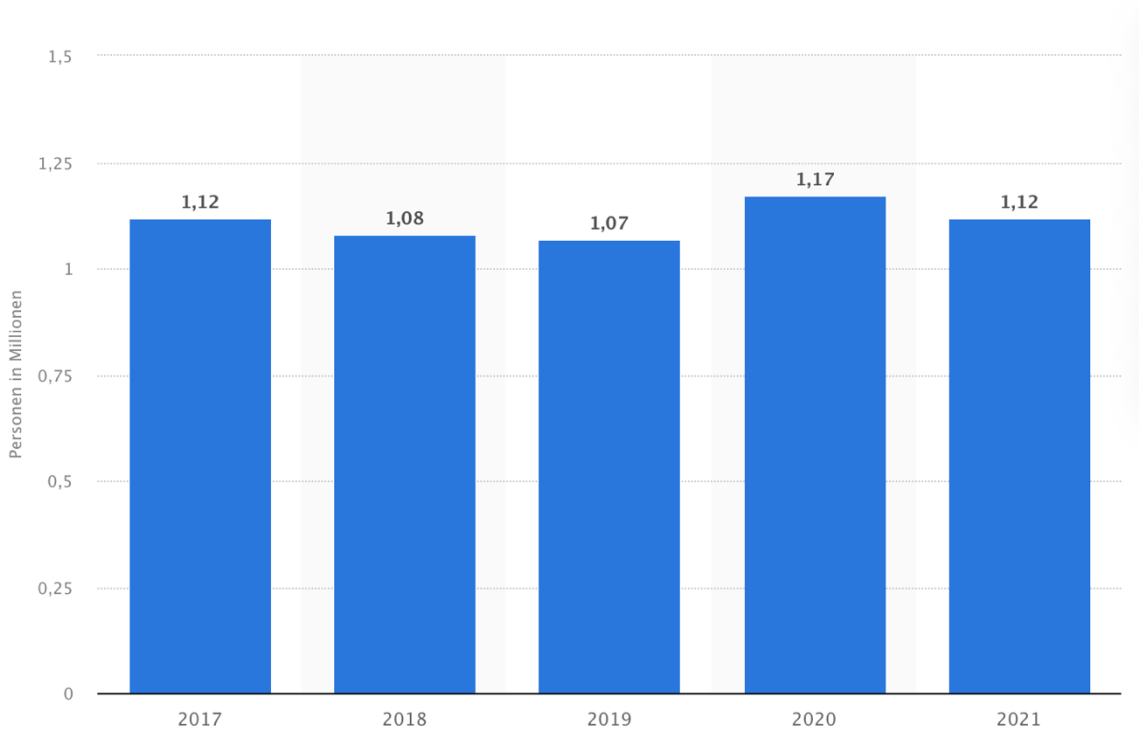

Abbildung 5.1-2: Geplanter Hausbau in Deutschland 2021 [82]

Die Frage, die jedoch noch im Raum steht, lautet: Wie viele Personen von den 1.12 Millionen die ein Haus bauen möchten, würden dies auch mit einer nachhaltigen Baumethode tun? Da hierzu keine konkreten Statistiken vorliegen, ist dies lediglich durch eine ungefähre Annahme zu beantworten. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass der dabei resultierende Wert der Wirklichkeit entspricht. Eine ungefähre Annahme von 2 % der 1.12 Millionen Menschen wird somit getroffen. Dies würde ca. 20.000 Personen entsprechen. Um jedoch realistisch zu bleiben, ist es sinnvoll die Zahl zu reduzieren, denn es ist eine Sache, ein Haus bauen zu wollen, jedoch eine ganz andere, diesen Wunsch auch in die Tat umzusetzen. Deswegen kann von einer groben Schätzung von 5 % ausgegangen werden. Der resultierende Wert entspricht letztendlich 1.000 Personen, die voraussichtlich ein Haus mit nachhaltiger Baumethode bauen würden. Zusammenfassend lässt sich ein Marktpotential von 1.000 Gebäuden annehmen, die mit einer nachhaltigen Baumethode, innerhalb eines Jahres gebaut werden dürften. Ein ungefährer Wert wie dieser ist aus folgender Quelle zu entnehmen: „Der Green Building-Markt boomt: Während bis 2013 lediglich 550 Gebäude zertifiziert wurden, waren es 2019 bereits 2.100 — Ein Wachstum von circa 250 Gebäuden im Jahr!“ [83]

5.2 Marktveränderung

Eine Marktveränderung kann sowohl durch ein Wachstum als auch durch einen Rückgang des Marktes verursacht werden. Außerdem können plötzliche politische Ereignisse oder auch technische Veränderungen, positive wie auch negative, Auswirkungen auf den Markt haben. Es ist nicht möglich, in die Zukunft zu sehen, deshalb kann niemand sagen, wie sich der Markt verändern wird, also ob es 2025 neue Baumethoden geben wird oder eine neue Vorschrift gilt. Eine Einführung einer CO2-Steuer könnte zur Kostenwahrheit der Baubranche beitragen, wodurch plötzlich ist das Bauen mit Lehm wieder attraktiver würde.

5.3 Nachteile

5.3.1 Witterungsbeständigkeit

Einwirkungen von Feuchtigkeit und Frost müssen dringendst vermieden werden, denn Lehm ist nicht feuchteresistent. Eine geringfügige Tragfähigkeit ist die Folge. Schützende Maßnahmen wie das Behandeln der Oberfläche mit einer Schutzschicht oder das Erstellen eine Holzkonstruktion in Form eines Daches sollen schlimmere Auswirkungen vermeiden. Außerdem ist ein wasserfestes und auf lange Dauer tragendes Fundament sinnvoll.

5.3.2 Kosten

Das Bauen mit Lehm tritt derzeit in eine neue Ära der Wiederentdeckung ein, es finden zwar einige Annäherungen statt, jedoch nur mit geringem Erfolg, denn Experten, die mit Lehmbau zu tun haben, wie zum Beispiel Martin Rauch, stehen nicht ausreichend zur Verfügung. Demzufolge sind planerische Kosten weitaus höher im Gegensatz zu herkömmlichen Projekten. Bei vor Ort produzierten Gebäuden spielt die Bauzeit eine wichtige Rolle, die jedoch insbesondere aufgrund der langen Zeit zum Trocknen sich maßgeblich verlängert. Die Kosten eines Projektes spielen dabei eine ernsthafte Rolle:

Man geht davon aus, dass 10 bis 20 % höhere Kosten entstehen, als bei einem mit üblichen Baumethoden erstellten Haus. [84]

Eine Kostenübersicht von üblichen Baustoffen zeigt, dass Lehm im Vergleich einen deutlich teureren Preis pro Quadratmeter Wohnfläche aufweist.

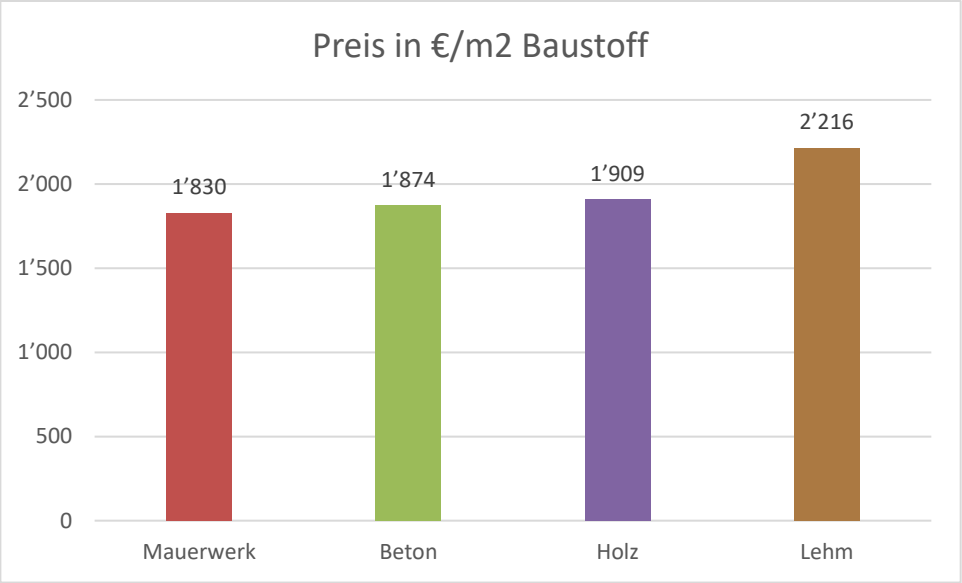

Abbildung 5.3-1: Preis Baustoffe in € pro Quadratmeter [85]

Die Werte für Mauerwerk, Beton und Holz wurden aus folgender Quelle entnommen [86, S. 6].

Eine Berechnung/Annahme wurde für Lehm getroffen:

Mittelwert von (Mauerwerk+ Beton) = 1.847 €/m2

20% (Annahme durch [84]) von 1.847 €/m2 = 369 €/m2

Lehm= 2.216 €/m2 = 1.847 €/m + 369 €/m2

5.3.3 Mangelnde Anerkennung

Es ist nicht üblich, mit einem Baustoff wie Lehm ein Haus zu bauen. In der Vergangenheit war es gang und gäbe, mit Lehm ein Haus zu bauen. Mit der Zeit und der Entwicklung von neuen Technologien verlor der Lehm als Baustoff seine Bedeutung. Ab den 1930er Jahren begann der Umschwung, es wurde immer mehr mit Beton gebaut, da dieser in der Industrie herstellbar und wirtschaftlich besser vertrieben ist [87]. Es wird noch eine Zeit lang dauern, bis Lehm als Baustoff bei einer Vielzahl von Menschen einen guten Eindruck hinterlässt und die Nachfrage steigt.

5.4 Vorteile

5.4.1 Dämmend und Wärmespeichernd

Lehm kann zwar nicht in Form eines Dämmstoffes zum Einsatz kommen, jedoch zeigt der Vergleich, dass Lehm als Baustoff einen niedrigeren Wärmeleitwert aufweist. Stampflehm speichert die Wärme für einen längeren Zeitraum als Beton. Die Abgabe der Wärme findet erst nach einem höheren Temperaturunterschied statt, der Stampflehm ist also resistenter gegen minimale Temperaturschwankungen. Daraus ergibt sich der Vorteil einer gleichmäßigen Raumtemperatur sowie der geringere Verbrauch von Heizung oder Kühlgeräten.

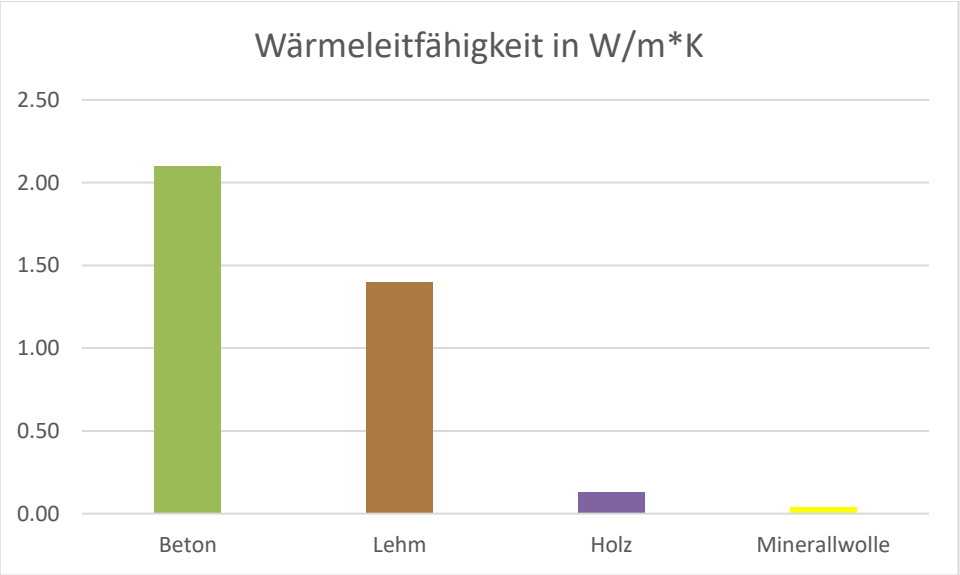

Abbildung 5.4-1: Wärmeleitfähigkeit Baustoffe Fertigungshalle [88]

Die Werte für Beton, Holz und Mineralwolle wurden aus der folgenden Quelle entnommen [89].

Der Wert für Lehm ist aus Quelle [90] entnommen.

5.4.2 Brandschutz

Die Definierung von Lehm als nicht brennbar ist gemäß DIN 4102-4 festgelegt. Lehm mit einem Fasergehalt von bis zu 1 % wird als Baustoff A1 (nicht brennbar) eingestuft [91]. Baustoffe ziehen im Brandfall sogar Energie aus dem Feuer, weil sie in Ziegel gebrannt werden. Wird das Feuer jedoch mit Wasser gelöscht, verringert sich die Tragfähigkeit der Stampflehmwand.

5.4.3 Luftfeuchtigkeit, Schadstoffe und Gesundheit

Lehm kann rasch Luftfeuchtigkeit absorbieren und gibt sie langsam wieder ab. Geeignete Räume, die davon profitieren, sind zum Beispiel Weinkeller oder Badezimmer. Dies liegt an den hygroskopischen Kapillareigenschaften von Lehm. Das Raumklima wird vom Lehm selbständig reguliert. Der Lehm nimmt nicht nur Luftfeuchtigkeit auf, sondern filtert zugleich auch die Schadstoffe aus der Luft. Gestank, Dämpfe oder auch Rauch haben keine negativen Auswirkungen, eine Stampflehmwand gibt diese also nicht wieder ab. Geruchsbekämpfer wie zum Beispiel Dunstabzugshauben in Küchen sind hierbei überflüssig und können somit eingespart werden. Lehm weist einen neutralen PH-Wert auf, was wiederum bei Hautkontakt unbedenklich und eher positiv ist. Lehm enthält keine Schadstoffe, wirkt antibakteriell und bekämpft zugleich Schädlinge. Daher ist Lehm besonders für Allergiker zu empfehlen.

5.4.4 Nachhaltigkeit

Lehm ist ein sehr energiesparender Baustoff. Er kann in unbegrenzter Menge fast überall auf der Welt entnommen und ohne aufwendige industrielle Weiterverarbeitung, anschließend genutzt werden. Es wird geschätzt, dass der Energiebedarf für die Herstellung von Baulehm etwa nur 1 % des Energiebedarfs beträgt, der für die Herstellung allgemeiner Industriebaustoffe wie Stahlbeton oder Mauerwerk erforderlich ist [92]. Baulehm kann aus recycelten Materialien und Abfallprodukten, zum Beispiel wie aus Aushubmaterial, hergestellt werden.

Gebäude wie der Alnatura Campus in Darmstadt entstanden größtenteils aus Aushubmaterial von der Baustelle „Stuttgart 21“ und das Ricola Kräuterzentrum wurde mit Baustoffmaterial in Form von Erdreich (im Umkreis von 10 Kilometer) erstellt worden ist [87]. Ein Gebäude aus Lehm muss bei einem Rückbau nicht aufwendig in seine einzelnen Bestandteile sortiert werden. Eine Entsorgung ist nicht notwendig, da Lehm ein wiederverwendbares Material ist. Eine Wiederverwendung setzt voraus, dass der Lehm keine weiteren Zusätze aufweist. Tritt dies zu, so kann der Vorgang beliebig oft wiederholt werden. Der Recyclingkreislauf ist folglich geschlossen. Ein oft angesprochenes Thema ist der hohe CO2-Verbrauch im Baugewerbe. Das Bauen mit Lehm könnte dementsprechend CO2-Einsparungen einbringen. Die Einführung der CO2-Steuer könnten die tatsächlichen Kosten in der Baubranche offenlegen, was wiederum den Lehm zum „Baustoff der Zukunft“ machen könnte.

5.5 Zwischenfazit

Stampflehm oder „Rammed Earth“, wie die englische Bezeichnung lautet, kann durchaus eine nachhaltige Baumethode mit hohem Markpotential sein. Die größtmöglichen Erfolge mit Stampflehm als nachhaltige Baumethode können jedoch nur erzielt werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. **Kosten anderer Baumethoden steigen**

Mit einer CO2-Steuer werden die realen Kosten aufgedeckt. Die Kosten des Bauens mit Beton oder Mauerwerk würden rasant steigen, was wiederum den Lehm attraktiver macht.

2. **Automatisierung und Fertigteilproduktion**

Die Entwicklung einer Fertigungsmaschine ist anfangs kostspielig, jedoch können im Nachhinein die Kosten beim Herstellen durch die Einsparung von Arbeitern reduziert werden. Zusätzlich ist bereits sehr lange schon ein Zeitalter angebrochen, in dem Automatisierung als selbstverständlich angesehen wird.

3. **Zahl der Lehmfachkräfte muss steigen**

Der Lehmbau bekommt zwar immer mehr Fürsprecher aber es mangelt weiterhin an Fachexperten, die wissen, wie mit Lehm umzugehen ist und wie damit gebaut werden sollte. Je mehr Fachexperten gute Arbeiten verrichten, desto schneller könnte sich das Bauen mit Lehm verbreiten.

4. **Lehmbau muss an Attraktivität gewinnen**

Die Vorteile von Lehm sind zum Beispiel der geringe CO2-Fußabdruck, der einfache Recyclingprozess, der geringer Energieverbrauch bei der Herstellung, die niedrigeren Heizkosten in einem Haus, das perfekte Raumklima und die positiven gesundheitlichen Aspekte. All diese Vorteile müssen auf mehr positive Resonanz bei der Menschheit stoßen. Die Überlegenheit der Vorteile könnte bei dem einen oder anderen, trotz höherer Kosten, den Ausschlag zugunsten des Bauens mit Lehm geben.

5. **Kosten müssen gesenkt werden**

Nachhaltiges Bauen darf nicht teurer sein als die herkömmlichen Baumethoden. Nachhaltiges Bauen kann sonst noch etliche Vorteile mit sich bringen, aber wenn der Nutzer sich zwischen den herkömmlichen Baumethoden oder den 15 % Mehrkosten für eine nachhaltige Baumethode entscheiden kann, wird er sich in den meisten Fällen für die günstigere herkömmliche Baumethode entscheiden.

6. Potentielle Unternehmen

6.1 Vorstellung Vogt Baugeräte GmbH

Die VOGT Gerätetechnik bietet effektive Lösungen für unterschiedlichste Aufgabenstellungen und kommt in der Sanierung (Putz/Fliesen), beim Entfernen von Bodenbelägen bis hin zur Flachdachsanierung aber auch im Tief-, Kanal- und Rohrleitungsbau, bei Reinigungsarbeiten von Produktionsanlagen, im Garten- und Landschaftsbau sowie in der Baumpflege zum Einsatz.

Seit 1992 fertigt das Unternehmen langlebige Qualitätsprodukte, auch in dem Bewusstsein, dass die geschenkten natürlichen Ressourcen nicht „unendlich“ zur Verfügung stehen. Man setzt auf deutsche Fertigung und verzichtet somit auf lange Lieferwege, schont die Umwelt und erhöht die Wertschöpfung in unserem Land. Natürlich hat Qualität ihren Preis, aber die Produkte sind ihren Preis wert, wovon das Unternehmen gerne überzeugen will. Das familiär geführte Unternehmen orientiert sich an ehrlichen Partnerschaften auf Augenhöhe und wird nach christlichen Werten geführt. Die Beratung erfolgt praxisnah und fundiert. Die hohe Verfügbarkeit an Geräten, Werkzeugen, Ersatzteilen und Zubehör ermöglicht eine schnelle Lieferfähigkeit. [93]

Homepage: https://www.vogt-tec.de/

Mit dem CEO der Vogt Baugeräte GmbH, [redacted] stand der Verfasser persönlich in Kontakt, er vermittelte mir, dass Interesse an einer Zusammenarbeit besteht. Der Vogt Hammer, ein patentiertes Produkt der Firma, welcher bereits bei der manuellen Herstellung von Stampflehmwänden genutzt wird, kann von der Vogt GmbH bei einer Zusammenarbeit in das Projekt miteinfließen.

Kontaktdaten:

[redacted]

Mail: [redacted]

Fon: [redacted]

6.2 Vorstellung RAVI Bau- und Mietgeräte GmbH

Die RAVI Bau- und Mietgeräte GmbH ist ein 1933 gegründetes Unternehmen, welches Baugeräte verkauft und vermietet. Die Firma RAVI ist spezialisiert auf Geräte, welche für Bodenverdichtung sowie Betonverdichtung zum Einsatz kommen. 2014 ist eine neue Firmenzentrale mit Sitz in Großröhrsdorf (Sachsen) erbaut worden. Laut Homepage ist dieses Unternehmen ein kleines bis mittelständiges Unternehmen mit ungefähr 10-15 Mitarbeitern. Die Firma RAVI wirbt mit langjähriger Erfahrung in Verdichtungstechnik.

Homepage: https://www.ravi.de/

[redacted]ie Geschäftsführerin der RAVI GmbH, sprach dem Verfasser ihr Interesse aus. Sie versicherte dem Verfasser, dass ihr Unternehmen die nötige Erfahrung und zugleich auch das Expertenwissen zur Bodenverdichtung mit in das Forschungsprojekt einbringen könne.

Kontaktdaten:

[redacted]

Mail[redacted]

Fon:[redacted]

6.3 Weitere Unternehmen

Im Anhang befindet sich eine Liste mit weiteren potentiellen Firmen, die nach ihrer Branche sortiert sind. Jedes Unternehmen auf dieser Liste wurde vom Verfasser zweimal per E-Mail kontaktiert und dreimal angerufen, leider bekam der Verfasser immer wieder diese Antwort zu hören: „Wir werden uns bei Ihnen melden “. Nach Meinung des Verfassers schreckt es die Unternehmen eher ab, dass der Verfasser hier als Mittelsmann handelt und nicht direkt von PERI ist. Aufgrund des Status des Verfassers als Student , nehmen viele Unternehmen wohl eher eine abgeneigte Haltung ein. Es kann aber auch gut möglich sein, dass die ausgesuchten Unternehmen einfach nur kein Interesse haben. Trotz der wenigen positiven Rückmeldungen, ist der Verfasser froh, wenigstens zwei Unternehmen gefunden zu haben, bei denen Interesse besteht. Zwar leider nur in der Branche der Verdichtungstechnik, aber der Verfasser denkt da PERI auch bei dem erfolgreichen 3D-House-Printing-Projekt mit Robotertechnik ausgestattet worden ist, wird es für das Unternehmen sicher möglich sein, ein Roboter-Unternehmen zu finden, welches an einer Zusammenarbeitet interessiert ist.

7. Fazit

Ein Ziel der Ausarbeitung war es, herauszufinden ob Stampflehm in Form einer nachhaltigen Baumethode Marktpotential besitzt. Durch Experteninterviews war eine bessere Einschätzung des Marktpotentials möglich. Die Antworten aus den Experteninterviews spiegelten sich mit den von mir analysierten Bedingungen aus dem Unterkapitel 5.5 Zwischenfazit wider, sodass deutlich wird, dass die Meinungen der Experten und die Ergebnisse aus dieser Ausarbeitung starke Parallelen aufweisen. Der Schwerpunkt der Ergebnisse liegt vor allem auf den Kosten die minimiert werden müssen oder die Kosten anderer Baumethoden steigen.

Vor allem bei der Suche nach Experten ist mir persönlich aufgefallen, dass es wenige Experten im Lehmbau gibt. Deshalb war es mir leider nicht möglich, eine große Anzahl an Experten für ein Interview zu finden. Die Experten gaben oftmals fehlende Zeit und viel Arbeit als Begründung für die Absage der Interviews an. Dies zeigt durchaus, dass eine hohe Nachfrage vorhanden ist, jedoch ein Mangel an Fachexperten besteht.

Ein weiteres Ziel der Arbeit war es, herauszufinden, welche Technik bei einem automatisierten Herstellungsprozess einer Stampflehmwand benötigt wird. Mit Hilfe von Literatur, dem Internet und Videos war es durch aus möglich, die gesamte benötigte Technik, die neuen Technologien und den Stampflehm selbst sowie die Bodenverdichtung in dieser Arbeit grundlegend darzustellen.

Mit den gesammelten erzielten Erkenntnissen aus dieser Arbeit war es mir schließlich möglich, Unternehmen ausfindig zu machen, die die Technologien sowie die Erfahrung in ein späteres Forschungsprojekt einer automatisierten Stampflehmwandherstellung mit einbinden können. Wie schon im Unterkapitel 6.3 „Weitere Unternehmen“ erklärt, war das Ausfindigmachen nicht so einfach wie angenommen. Es lässt sich leider nur spekulieren, ob es an dem Studenten-Status lag oder schlichtweg an mangelndem Interesse, dass sich im Ergebnis nur wenige Unternehmen interessiert zeigten. Jedoch ließen sich immerhin letztendlich zwei Unternehmen ausfindig machen, die Interesse an einer Zusammenarbeit haben.

Auf der Grundlage dieser Arbeit bin ich voller Zuversicht hinsichtlich des Gelingens des Forschungsvorhabens, denn nicht nur der theoretische Teil dieser Arbeit, also das Sammeln und Analysieren der benötigten Technologien, sondern auch die Befragung der Experten zu einer solchen automatisierten

Stampflehmwandherstellung geben Anlass dazu, im Hinblick auf einen Erfolg dieses Projekts zuversichtlich zu sein.

Aus den Ergebnissen dieser Bachelorarbeit und den damit verbundenen Untersuchungen wird deutlich, wie besonders Lehm in Wirklichkeit ist, wie viel positive Eigenschaften ein leider in Vergessenheit geratener Baustoff aufweist. Nach dieser Arbeite fasse ich persönlich das Thema Nachhaltigkeit mit anderen Augen auf. Vor allem in dem Experten-Interview mit Stefan Brenkers wurde mir die Wichtigkeit von Nachhaltigkeit nochmals bewusst. Somit schließe ich daraus, dass das Bewusstsein der Menschen über das Thema Nachhaltigkeit verbessert werden sollte.

Literaturverzeichnis

[1] United Nations Environment Programme, *The emissions gap report 2020*. 2020.

[2] „On UN deadline, Government climate pledges, if implemented, would warm world by 2.7˚C“. https://climateanalytics.org/latest/on-un-deadline-government-climate-pledges-if-implemented-would-warm-world-by-27c/ (zugegriffen Okt. 08, 2021).

[3] „Bauwirtschaft und Klimaschutz - Stahl, Beton und Zement verschlingen Energie“, *Deutschlandfunk Kultur*. https://www.deutschlandfunkkultur.de/bauwirtschaft-und-klimaschutz-stahl-beton-und-zement.976.de.html?dram:article_id=453432 (zugegriffen Okt. 08, 2021).

[4] „ZUKUNFT VERBAUT? WARUM WIR EINE REVOLUTION IN DER BAUINDUSTRIE BRAUCHEN UND WIE DIESE GELINGEN KANN“, *Madaster*, Juli 28, 2021. https://madaster.de/blog_revolution_bauindustrie/ (zugegriffen Okt. 08, 2021).

[5]„Erzeugerpreisindizes ausgewählter Baumaterialien“, *Statistisches Bundesamt*. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Grafiken/Preise/Erzeugerpreise/2021/_Interaktiv/202100705-erzeugerpreisindizes-baumaterialien.html (zugegriffen Okt. 28, 2021).

[6] „ABB-News: Roboterbauer ABB will Roboter auf Baustellen einsetzten“. https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/robotik-wie-der-roboterbauer-abb-die-baustellen-automatisieren-will/27197696.html?ticket=ST-10833114-ffPuREgsdAUehsJphMsf-ap6 (zugegriffen Okt. 11, 2021).

[7] „Robotik-im-Bauwesen-edited.jpeg (1600×900)“. https://www.capmo.com/wp-content/uploads/2021/07/Robotik-im-Bauwesen-edited.jpeg (zugegriffen Okt. 28, 2021).

[8] Thomas W. Frick(1), „Von Industrie 1.0 bis 4.0 - Industrie im Wandel der Zeit“, *Industrie-Wegweiser*, Aug. 15, 2017. https://industrie-wegweiser.de/von-industrie-1-0-bis-4-0-industrie-im-wandel-der-zeit/ (zugegriffen Aug. 15, 2021).

[9] Thomas W. Frick(2), „Von Industrie 1.0 bis 4.0 - Industrie im Wandel der Zeit“, *Industrie-Wegweiser*, Aug. 15, 2017. https://industrie-wegweiser.de/von-industrie-1-0-bis-4-0-industrie-im-wandel-der-zeit/ (zugegriffen Aug. 15, 2021).

[10] Thomas W. Frick(3), „Von Industrie 1.0 bis 4.0 - Industrie im Wandel der Zeit“, *Industrie-Wegweiser*, Aug. 15, 2017. https://industrie-wegweiser.de/von-industrie-1-0-bis-4-0-industrie-im-wandel-der-zeit/ (zugegriffen Aug. 15, 2021).

[11] „Industrie 4.0“, *FOSTEC & Company*. https://www.fostec.com/de/kompetenzen/digitalisierungsstrategie/industrie-4-0/ (zugegriffen Aug. 16, 2021).

[12] Thomas W. Frick(4), „Von Industrie 1.0 bis 4.0 - Industrie im Wandel der Zeit“, *Industrie-Wegweiser*, Aug. 15, 2017. https://industrie-wegweiser.de/von-industrie-1-0-bis-4-0-industrie-im-wandel-der-zeit/ (zugegriffen Aug. 15, 2021).

[13] „Die deutsche Baubranche: Fakte, Entwicklungen & Trends“, *Capmo.de*, Feb. 02, 2021. https://www.capmo.de/baulexikon/baubranche/ (zugegriffen Aug. 10, 2021).

[14] Cosuno, „Cosuno - Warum die Baubranche jetzt digitaler werden muss“. https://www.cosuno.de/blog/warum-die-baubranche-jetzt-digitaler-werden-muss/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[15] ch, „Digitalisierung KMU - mit redIT als Partner schrittweise zum Erfolg“, *redIT*. https://redit.ch/digitalisierung-angebot-kmu/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[16] W. W. der R. Aachen *u. a.*, *Industrie 4.0: Implement it!: Ein Leitfaden zur erfolgreichen Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen*, 1. Aufl. RWTH Aachen Werkzeugmaschinenlabor, 2018.

[17] „Criteria for the realization of Industry 4.0 - KAN“. https://www.kan.de/en/publications/kanbrief/industry-40-vision-or-reality/criteria-for-the-realization-of-industry-40/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[18] A. Borgmeier, A. Grohmann, und S. F. Gross, *Smart Services und Internet der Dinge: Geschäftsmodelle, Umsetzung und Best Practices: Industrie 4.0, Internet of Things (IoT), Machine-to-Machine, Big Data, Augmented Reality Technologie*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.

[19] „Was ist IoT? Vorteile und Einsatzmöglichkeiten in SAP | T.CON“. https://www.team-con.de/unsere-leistungen/beratung/digitalisierung/iot (zugegriffen Aug. 16, 2021).

[20] „Die Vorteile und Nachteile des Cloud-Computing | heise Download“. https://www.heise.de/download/blog/Die-Vorteile-und-Nachteile-des-Cloud-Computing-3713041 (zugegriffen Aug. 18, 2021).

[21] M. Gottwald, „Was ist Big Data? - Big Data Analytics, Software, Tools + Trends“. http://www.softselect.de/wissenspool/big-data (zugegriffen Aug. 23, 2021).

[22] (1), „Big Data Analytics: Was Sie darüber wissen sollten“, Aug. 22, 2021. https://www.sas.com/de_de/insights/analytics/big-data-analytics.html (zugegriffen Aug. 23, 2021).

[23] (2), „Big Data Analytics: Was Sie darüber wissen sollten“. https://www.sas.com/de_de/insights/analytics/big-data-analytics.html (zugegriffen Aug. 23, 2021).

[24] (3), „Big Data Analytics: Was Sie darüber wissen sollten“. https://www.sas.com/de_de/insights/analytics/big-data-analytics.html (zugegriffen Aug. 23, 2021).

[25] (5), „Big Data Analytics: Was Sie darüber wissen sollten“. https://www.sas.com/de_de/insights/analytics/big-data-analytics.html (zugegriffen Aug. 23, 2021).

[26] (6), „Big Data Analytics: Was Sie darüber wissen sollten“. https://www.sas.com/de_de/insights/analytics/big-data-analytics.html (zugegriffen Aug. 23, 2021).

[27] lerablog, „How is Data Science Transforming the Retail Industry?“, *Lera Blog*, Nov. 07, 2019. https://lerablog.org/business/it/how-is-data-science-transforming-the-retail-industry/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[28] „Additive bzw. generative Fertigung: Grundlagen und Potenziale“. https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/additive-fertigung/ (zugegriffen Aug. 23, 2021).

[29] „Virtual- und Augmented Reality erfolgreich in Unternehmen einführen“, *Industrieanzeiger*, März 16, 2020. https://industrieanzeiger.industrie.de/management/virtual-und-augmented-reality-erfolgreich-in-unternehmen-einfuehren/ (zugegriffen Aug. 24, 2021).

[30] H. Schroeder, *Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen*, 2., Überarb. und akt. Aufl. 2013 Edition. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

[31] U. Röhlen und C. Ziegert, *Lehmbau-Praxis: Planung und Ausführung*, Aktualisierte und Erweiterte Ausgabe mit Abbildungen, Tabellen Edition. Berlin Wien Zürich: Beuth, 2020.

[32] „DBU - “Bauen und Wohnen – ressourcenschonend und energieeffizient”: Neue DBU-Broschüre | Startseite“. https://www.dbu.de/123artikel33888rss.html (zugegriffen Sep. 04, 2021).

[33] BauNetz, „Betonherstellung und Klimaschutz | Beton | Herstellung | Baunetz_Wissen“, *Baunetz Wissen*. https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/herstellung/betonherstellung-und-klimaschutz-7229519 (zugegriffen Sep. 04, 2021).

[34] BauNetz, „Baugrund | Beton | Gründung | Baunetz_Wissen“, *Baunetz Wissen*. https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/gruendung/baugrund-151062 (zugegriffen Sep. 07, 2021).

[35] „Körnungslinie“. https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/koernungslinie/8808 (zugegriffen Sep. 07, 2021).

[36] „König | Maschinen im Baubetrieb“. https://www.beck-shop.de/koenig-leitfaden-baubetriebs-bauwirtschaft-maschinen-baubetrieb/product/14026210 (zugegriffen Sep. 07, 2021).

[37] „grundlagen-bodenverdichtung.pdf“. Zugegriffen: Sep. 07, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://bau-industrietechnik.de/media/docs/grundlagen-bodenverdichtung.pdf

[38] „WM9701_0403_rdr.pdf“. Zugegriffen: Sep. 08, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bomag.com/media/editor/WM9701_0403_rdr.pdf

[39] „Bodenverdichtung“, *BauPunkt Hain*. http://www.baupunkt-hain.de/baumaschinen-und-baugeraete/bodenverdichtung/ (zugegriffen Sep. 08, 2021).

[40] „Statische Bodenverdichtung. Bodenverdichtung“. https://plantu.ru/de/pesok/static-soil-compaction-soil-compaction/ (zugegriffen Sep. 08, 2021).

[41] H. König, B. Kochendörfer, und F. Berner, *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung*, 4., Aktualisierte Aufl. 2014 Edition. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.

[42] „Bodenart“. https://hypersoil.uni-muenster.de/0/03/06.htm (zugegriffen Sep. 07, 2021).

[43] „➤ Was bedeutet Automatisierung & wie können wir sie nutzen?“, *STAFFXPERTS*, Juli 29, 2019. https://staffxperts.de/glossar/automatisierung/ (zugegriffen Sep. 09, 2021).

[44] „Automatisierung in der Industrie - Anwendungsbeispiele | d.velop - Blog“, *d.velop Blog*, Dez. 11, 2020. https://www.d-velop.de/blog/branchenprozesse/automatisierung-in-der-industrie/ (zugegriffen Sep. 09, 2021).

[45] „Roboter | Cobots“, *www.tuvsud.com*. https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/maschinensicherheit-info/sondermaschinen/roboter (zugegriffen Sep. 10, 2021).

[46] A. Pott und T. Dietz, *Industrielle Robotersysteme: Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen*. Springer Vieweg, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-25345-5.

[47]„Gebrauchte Roboter KR 60-3 | Eurobots“. https://www.eurobots.net/kuka-kr-60-3-krc4-de.html (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[48] „Kuka KR5 arc industrieroboter | Eurobots“. https://www.eurobots.net/roboter_kuka_kr5_arc-de.html (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[49] E. Uhlmann und J. Krüger, „Industrieroboter“, in *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, K.-H. Grote, B. Bender, und D. Göhlich, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, S. 1655–1663. doi: 10.1007/978-3-662-54805-9_126.

[50] DigitalCavalry, „Punktsteuerung » Metalltechnik Lexikon“. http://www.metalltechnik-lexikon.de/punktsteuerung/ (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[51] „F_Industrieroboter.pdf“. Zugegriffen: Sep. 12, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mrt.kit.edu/download/F_Industrieroboter.pdf

[52] „Robotersteuerung - robot controller“. https://wiki.induux.de/Robotersteuerung (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[53] R. Koether und A. Sauer, *Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure*, 5., Überarbeitete und Erweiterte Edition. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.

[54] „OFFLINE Roboterprogrammierung | Robologic“. https://www.robologic.eu/roboterprogrammierung/offline/ (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[55] „Robotmaster - WDS Software & Service GmbH“. https://www.wds.de/loesungen/fertigung/mastercam/zusatzprodukte/robotmaster/ (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[56] „Alnatura_Campus_14_Quelle_Alnatura_Fotograf_Lars_Gruber_1028.jpg (960×411)“. https://www.alnatura.de/-/media/Alnatura/B2C/Bilder/ueber-uns/campus/Alnatura_Campus_14_Quelle_Alnatura_Fotograf_Lars_Gruber_1028.jpg?h=411&mw=960&w=960&hash=B48EFFBB04A92C8A08B600A75A08538A (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[57] „Alnatura Campus | Lehm Ton Erde, Martin Rauch, Vorarlberg“. https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=97 (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[58] „Alnatura Arbeitswelt, Darmstadt - Deutsche BauZeitschrift“. https://www.dbz.de/artikel/dbz_Alnatura_Arbeitswelt_Darmstadt_3419037.html (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[59] „DETAIL berichtet über Alnatura | haas cook zemmrich STUDIO2050“. https://www.haascookzemmrich.com/de/news/detail-alnatura/ (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[60] A. Heringer, L. B. Howe, und M. Rauch, *Upscaling Earth: Material, Process, Catalyst*, New Edition. Zürich: gta Verlag, 2019.

[61] „_mnu5335.jpg (850×568)“. https://www.lehmtonerde.at/uploads/pictures-w850/_mnu5335.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[62] „d5ff9144f260c305.jpg (1200×1600)“. https://www.dbz.de/imgs/1/4/7/9/9/5/4/d5ff9144f260c305.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[63] „Municipal indoor swimming pool in Toro | Vier Arquitectos SLP“, *Archello*. https://archello.com/de/project/municipal-indoor-swimming-pool-in-toro (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[64] BauNetz, „Öffentliches Hallenbad in Toro | Gesund Bauen | Kultur/Freizeit | Baunetz_Wissen“, *Baunetz Wissen*. https://www.baunetzwissen.de/gesund-bauen/objekte/kultur-freizeit/oeffentliches-hallenbad-in-toro-2369495 (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[65] „Municipal indoor swimming pool in Toro | Vier Arquitectos SLP | Medien - Fotos und Videos - 20 | Archello“. https://archello.com/de/story/43648/attachments/photos-videos/20 (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[66] „71f7da63046f78d8.jpg (533×377)“. https://www.baunetzwissen.de/imgs/1/2/6/1/3/8/7/71f7da63046f78d8.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[67] „Deutsche BauZeitschrift“. https://www.dbz.de/artikel/dbz_Lebenszyklus_Lehm_Ricola_Kraeuterzentrum_Laufen_CH_2062806.html (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[68] „Größter Lehmbau Europas Stampflehmbau nach Plänen von Herzog & de Meuron für Ricola in Laufen - Bauhandwerk“. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflehmbau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen_2120058.html (zugegriffen Sep. 12, 2021).

[69] „kraeuterzentrum_header.jpg (940×320)“. https://ricola-cdn-ep.azureedge.net/cmsstorage/ricola/media/content/int/media/pressreleases/pressreleases-header/kraeuterzentrum_header.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[70] „f5209aa7c1db8ee2.jpg (800×533)“. https://www.bauhandwerk.de/imgs/7/5/9/0/9/5/f5209aa7c1db8ee2.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[71] A. Asal, „Bauen mit Erde - nachhaltige Stabilisierung und additive Fertigung für den Stampflehmbau“.

[72] „102500377_c54bbd1978.jpg (800×533)“. https://www.dbz.de/imgs/102500377_c54bbd1978.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[73] Formearth, *The First Automated Rammed Earth House Building Machine - Formearth*, (März 15, 2020). Zugegriffen: Sep. 13, 2021. [Online Video]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=4TXj5IIkUIY

[74] „Machine | Automated Technology to Build Rammed Earth Walls“, *Formearth*. https://formearth.com/machine/ (zugegriffen Sep. 13, 2021).

[75] Formearth, *The First Automated Rammed Earth House Building Machine - Formearth*, (März 15, 2020). Zugegriffen: Sep. 25, 2021. [Online Video]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=4TXj5IIkUIY

[76] Urschel Laboratories, Inc. - Geschichte“. https://de.urschel.com/timeline.html (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[77] „5-new-machines-news-header.jpg (1250×604)“. https://imavex.vo.llnwd.net/o18/clients/urschel-labs-2015/images/News/5-new-machines-news-header.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[78] W. Urschel, „Urschell Wall Building Machine“

[79] URSCHEL, *Urschel Wall Building Machine*, (Juni 03, 2017). Zugegriffen: Sep. 25, 2021. [Online Video]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=QXqwnJTVSsE

[80] „2-0.jpg (1023×658)“. https://docplayer.org/docs-images/113/208571440/images/2-0.jpg (zugegriffen Sep. 25, 2021).

[81] „Baufertigstellungen von Wohnungen in Deutschland bis 2020“, *Statista*. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/39008/umfrage/baufertigstellungen-von-wohnungen-in-deutschland/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[82] „Finanzanlagen - Geplanter Hausbau in Deutschland 2021“, *Statista*. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/266329/umfrage/finanzanlagen-geplanter-hausbau-in-deutschland/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[83] „Green Buildings: Nachhaltiges Bauen auf dem Vormarsch | BNP Paribas Real Estate“. https://www.realestate.bnpparibas.de/blog/trends/green-buildings-nachhaltiges-bauen-auf-dem-vormarsch (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[84] „Lehmhaus bauen » Welche Kosten entstehen?“, *Hausjournal.net*, Okt. 01, 2014. https://www.hausjournal.net/lehmhaus-bauen-kosten (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[85] C. Huhn, „Kostenübersicht herkömmliche Baustoffe + Lehm“. Sep. 24, 2021.

[86] „Kostenbewusst_bauen_mit_Mauerwerk.pdf“. Zugegriffen: Sep. 20, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.massiv-mein-haus.de/download/Kostenbewusst_bauen_mit_Mauerwerk.pdf

[87] „Ein Haus aus Stampflehm“. https://www.festool.de/blog/work/leben-mit-lehm (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[88] C. Huhn, „Diagramm Wärmeleitfähigkeit Baustoffe“. Sep. 24, 2021.

[89] BauNetz, „Wärmeleitfähigkeit | Nachhaltig Bauen | Glossar | Baunetz_Wissen“, *Baunetz Wissen*. https://www.baunetzwissen.de/glossar/w/waermeleitfaehigkeit-664148 (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[90] „Stampflehm. Wände wie Kunstwerke“, *Malerblatt Online*, Feb. 29, 2020. https://www.malerblatt.de/gestaltung/inspiration/stampflehm/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[91] „Bauen mit Lehm – Renaissance eines traditionellen Baustoffs“, *db deutsche bauzeitung*, Mai 30, 2007. https://www.db-bauzeitung.de/wissen/technik/bauen-mit-lehm/ (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[92] „Bauen mit Lehm“. http://www.dieter-roehm.de/lehm.htm (zugegriffen Sep. 24, 2021).

[93] „Unternehmen“, *VOGT Baugeräte GmbH*. https://www.vogt-tec.de/unternehmen (zugegriffen Okt. 14, 2021).

Anhang

Der Anhang wurde auf Grund seiner Ausführlichkeit gesondert gelistet und ist in voller Ausführung im Anhang zu finden.

Experteninterview BA-Thesis 30.09.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

Fragen zum Thema Lehmbau

Interviewer: Christopher Huhn, Student HTWG-Konstanz – Bauingenieurwesen
Interviewter: [redacted]

Thema des Interviews ist das Bauen mit Lehm und sein Marktpotential

1. Bitte stellen Sie kurz ihr Unternehmen vor und den Schwerpunkt ihrer Leistungen.

Ich handele mit vorgefertigten Stuckelementen verschiedener Hersteller sowie mit naürlichen Baustoffen wie Lehm-, Kalk- und Holzprodukten, Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen sowie handwerklich hergestellten Beschlägen, Leuchten und Bauelementen aber auch Systemen und Produkten zur Dach- u. Fassadenbegrünung.

Durch meinen handwerklichen Hintergrund und die damit verbundene Erfahrung ist es mir möglich, Handwerkern und Endverbrauchern, die die Materialien selbst verarbeiten möchten, deren Verwendung zu zeigen und sie bei der Ausführung zu begleiten und anzuleiten.

Ein kleines Sortiment steht in meinen Geschäftsräumen zum Einkauf bereit, größere Mengen und Abpackungen wie BigBags oder ganze Paletten werden derzeit als Ganzes gehandelt

2. Wie stehen Sie zum Thema Nachhaltigkeit?

Nachhaltigkeit ist eines der Hauptthemen, mit denen ich mein Unternehmen unterlege. Ich bemühe mich, möglichst nachhaltig produzierte Produkte anzubieten, nehme Restposten zurück, damit sie nicht weggeworfen werden, bewirtschafte meine Gewerbeimmobilie mit einer eigenen Solaranlage und werde demnächst ein E-Auto fahren, welches dann ebenfalls mit dieser Solarenergie betrieben wird

Experteninterview BA-Thesis 30.09.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

3. Ihre Firma handelt mit Naturbaustoffen. Was sind Ihre Erfahrungen damit? Wie sieht die Nachfrage hierbei aus? Wie sehen Sie den zukünftigen Markt für nachhaltig Baumaterialien?

Mit Naturbaustoffen habe ich sehr gute Erfahrungen gesammelt. Ich arbeite als Handwerker seit über 30 Jahren mit derartigen Produkten, habe von 2011 bis 2018 als technischer Berater die Kunden des Herstellers CLAYTEC beraten, Schulungen durchgeführt und auf Messen vertreten. Die Nachfrage ist derzeit stark steigend, was sich für die Zukunft noch erheblich ausbauen lassen wird.

4. Was halten Sie davon, dass nachhaltiges Bauen teurer als übliches Bauen ist? Was muss sich Ihrer Meinung nach ändern?

Nachhaltiges Bauen ist nicht teurer, sondern nachhaltiger als konventionelles Bauen. Der Eindruck, dass zunächst der Preis für die Herstellung eines Bauwerkes oder einer Teilleistung höher liegt, kann immer mit dem höheren oder wenigstens nachhaltigerem Nutzen gegengerechnet werden. Ändern muss sich hier die öffentliche Darstellung, Wahrnehmung und Haltung zum Thema. In der Regel haben die Kunden heute die Preisbildung schon verstanden, zudem sind die Produkte im Verhältnis zu den Massenprodukten der konventionellen Hersteller gar nicht mehr so viel kostspieliger als noch vor 10-20 Jahren.

5. Laut ihrer Referenzen haben Sie mit Lehmbau zu tun. Wie sind ihre Erfahrungen mit Lehm?

Lehm ist einer der ältesten und natunahsten Baustoffe, mit denen wir heute wieder zunehmend in traditioneller und / oder moderner Manier arbeiten. Die Verarbeitbarkeit ist hervorragend, wird sehr positiv verstärkt durch eine nahezu perfekte Vorfertigung an Teilfertigprodukten durch sehr gut sortierte Hersteller und ist zudem dermatologisch und physiologisch am wenigsten bedenklich.

6. Können Sie Lehm als Baustoff empfehlen?

Ja, ich kann Lehm als Baustoff empfehlen. Es gibt ein paar Einschränkungen, wo Lehm als Baustoff weniger oder nicht geeignet ist, so im ungeschützten Außenbereich, in feuchten Kellerräumen oder gewerblich genutzten Feuchträumen.

Experteninterview BA-Thesis 30.09.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

7. Was denken Sie, wenn es irgendwann so weit wäre, dass die Tonne CO2 extrem teuer und ein Baustoff wie Zement unbezahlbar wird, kann Lehm hierdurch zum Baustoff der Zukunft werden? Wie sehen Sie das Potential von Lehm?

Lehm ist schon heute Baustoff der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft. Der Fokus wird sich noch stärker als heute auf Lehm, Holz und andere nachwachsende Rohstoffe wie Hanf, Schilf, Stroh u.s.w. richten. Zement und damit Beton wird dann im Wesentlichen nur noch für die tragenden Bauteile eingesetzt werden, aber nicht mehr als Allheilmittel für jeden möglichen Zweck.

8. Ich habe mir folgendes überlegt: Stampflehmwände mit Hilfe von Robotern und Automatisierter Technologie in einen selbständigen Fertigungsprozess einzuführen. Anschauungsbeispiele sind hierfür die folgenden YouTube-Links:
   - https://www.youtube.com/watch?v=F-0BvaeLBHw
   - https://www.youtube.com/watch?v=4TXj5IIkUIY

   Was denken Sie über diese Idee?
   Wie sehen Sie das Potential für ein solchen Fertigungsprozess?
   Wie schätzen Sie die Nachfrage ein?

Der Denkansatz ist nicht neu, aber auch nicht schlecht. Je nach dem, wo die Errichtung erfolgen soll, kann der Einsatz dieser Technik / Technologie von Vorteil sein. Zu Prüfen wäre hier der Energieaufwand insgesamt und der daraus resultierende Nutzen / Schaden. Wichtig ist dabei, dass der Lehm nicht mit Bindemitteln gebunden wird, da sonst die Replastifizierbarkeit hinfällig wäre und die positiven Eigenschaften stark eingeschränkt oder gar aufgehoben würden.

Das Potential richtet sich nach der Nachfrage und der Möglchkeit, zur Anwendung zu kommen. Für die Errichtung von z.B. Reihenhaussiedlungen kann ich mir durchaus ein gesundes Potential vorstellen

Die Nachfrage danach ist z.Z. bei fast Null, diese muss erst generiert werden, da die Systeme am Markt unbekannt / nicht vertreten sind. Sobald ein Verfahren, welches ein bestehendes Verfahren durch kostengünstigere Technik und intreressante Nebenwirkungen und Zusatznutzen ablösen kann, auf dem Markt verfügbar wird, kann bei entsprechendem Marketing eine schnell wachsende Nachfrage generiert werden. Wichtig sind dabei das Marketing und der Willen des Marktes, das Produkt / die Technologie anzunehmen. Dabei helfen auch wirtschaftliche und politische Aspekte.

Experteninterview BA-Thesis 06.10.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

Fragen zum Thema Lehmbau

Interviewer: Christopher Huhn, Student HTWG-Konstanz – Bauingenieurwesen
Interviewter: [redacted]

Thema des Interviews ist das Bauen mit Lehm und sein Marktpotential

1. Bitte stellen Sie kurz das Unternehmen vor und den Schwerpunkt ihrer Leistungen.

   Seit mehr als 35 Jahren arbeiten wir mit Lehm, ein ganzes Jahrzehnt lang als Handwerksunternehmen. Dies hat uns das Gespür für den Baustoff geben, aus diesen Wurzeln haben wir die Produkte und Techniken von CLAYTEC Baustoffe aus Lehm entwickelt. Ihr Nutzen: Wirklich ausgereifte Baustoffe und Anwendungen.

2. Wie stehen Sie zum Thema Nachhaltigkeit?

   Das Thema Nachhaltigkeit spielt bei der Firma Claytec eine wichtige Rolle. Ziel des Unternehmens war und ist es, den Baustoff Lehm, der sich durch hervorragende Umwelteigenschaften ausweist, für das heutige Bauen verfügbar zu machen und ihn in dessen Strukturen zu integrieren. Der Energieeinsatz für die Produktion der CLAYTEC Lehmbaustoffe ist entweder bereits sehr gering oder er wird kontinuierlich minimiert. Grundsatz ist es, die durch die natürlichen Eigenschaften gegebene Wiederverwertbarkeit des Materials auf allen Produktebenen zu erhalten. Weitere Grundsätze des Unternehmens sind: Einsatz von erneuerbaren Energien und Effizienz auf alle Ebenen, dezentrale Produktion, vorbildliche Sozialstandards.

Experteninterview BA-Thesis 06.10.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

3. Die Firma Claytec arbeitet mit Lehm. Was sind Ihre Erfahrungen damit? Wie sieht die Nachfrage hierbei aus? Wie sehen Sie den zukünftigen Markt für nachhaltig Baumaterialien?

Unsere Erfahrungen mit Lehm waren und sind bisher sehr positiv. Die Nachfrage steigt, wir sehen die Zukunft für nachhaltige Baumaterialien aufstrebend. Mittlerweile kommt das Nachhaltige Bauen immer mehr in den Trend. Ich bin der Meinung gerade durch die in letzter Zeit öfters vorkommenden Naturkatastrophen, regt es die Menschen zum Nachdenken an. Die Folge dessen könnte durchaus zum Anstieg vom Nachhaltigen Bauen führen.

4. Was halten Sie davon, dass nachhaltiges Bauen teurer als übliches Bauen ist? Was muss sich Ihrer Meinung nach ändern?

Durch vermehrte Nachfrage wird sich der Mehrpreis relativieren. Ähnlich wie beim Bio-food wird aber vermutlich eine Differenz bleiben, weil Verfahren zum Teil aufwändiger und einige Rohstoffe hochpreisiger sind.

5. Können Sie Lehm als Baustoff empfehlen?

Natürlich können wir Lehm als Baustoff empfehlen. Jedoch sind die Einsatzbereiche von Lehm immer genauestens zu bedenken. Den Lehm kann nicht überall seine Anwendung finden. Wasser ist der schlimmste Feind von Lehm, gerade mit tragender Funktion kann dies schlimmere Auswirkungen hervorrufen. Lehm hat eben seine Vor- und Nachteile. Aber alles in allem kann ich Lehm nur empfehlen.

Experteninterview BA-Thesis 06.10.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

6. Was denken Sie, wenn es irgendwann so weit wäre, dass die Tonne CO2 extrem teuer und ein Baustoff wie Zement unbezahlbar wird, kann Lehm hierdurch zum Baustoff der Zukunft werden? Wie sehen Sie das Potential von Lehm?

Lehm ist zwar noch nicht so weit um Beton komplett ersetzen zu können, jedoch kann Lehm mit Hilfe von anderen Baustoffen durchaus ein Teilersatz werden. Beispiele hierfür sind Fachwerkhäuser, die aus Holz und einer Kombination aus Lehm und Stroh das Gebäude bilden.
Ob Lehm ein Baustoff der Zukunft wird bezweifle ich, aber wie gesagt in Lehm steckt grundsätzlich hohes Potential.

7. Ich habe mir folgendes überlegt: Stampflehmwände mit Hilfe von Robotern und Automatisierter Technologie in einen selbständigen Fertigungsprozess einzuführen. Anschauungsbeispiele sind hierfür die folgenden YouTube-Links:
   - https://www.youtube.com/watch?v=F-0BvaeLBHw
   - https://www.youtube.com/watch?v=4TXj5IIkUIY

   Was denken Sie über diese Idee?
   Wie sehen Sie das Potential für ein solchen Fertigungsprozess?
   Wie schätzen Sie die Nachfrage ein?

Das ist eine nette Idee, jedoch steht diese noch am Anfang. Man müsste die Marktreife abwarte. Ich glaube, wenn dies kostengünstiger als andere Methoden wird, dann kann sich diese Idee auf dem Markt positiv entwickeln. Ein sehr gutes Vermarkten ist extrem wichtig, dadurch steigt dementsprechend die Nachfrage. Zu beachten ist jedoch noch, um mit dieser Idee große Erfolge zu erzielen, dass viele Faktoren voneinander abhängig sind und auch erfüllt werden.

Experteninterview BA-Thesis 05.10.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

Fragen zum Thema Lehmbau

Interviewer: Christopher Huhn, Student HTWG-Konstanz – Bauingenieurwesen
Interviewter: [redacted]

Thema des Interviews ist das Bauen mit Lehm und sein Marktpotential

1. Bitte stellen Sie kurz ihr Unternehmen vor und den Schwerpunkt ihrer Leistungen.

   Also im Prinzip die Überschrift meiner Firma lautet Wandgestaltung mit Lehm. Ich mache im Prinzip das ganze Paket des Innenausbaus also sprich dicklagigen Lehm-Putz auf Mauerwerk auftragen mit anschließendem feinem Lehm bis hin zur farblichen Gestaltung mit einer Lehmfarbe oder halt einem dekorativen Lehmfarbputz. Einen Design-Putz, in den man dann irgendwelche Zuschläge beimischen kann wie Muschelkalk, Strohfasern, Gräser, wie Kräuter oder sonstiges. Der Schwerpunkt liegt hierbei oft im Altbau aber so wie auch im Neubau. Hier liegt der Schwerpunkt oft auf dem Holzrahmenbau. Bei dem dann letztendlich der Putzträger für mich die Holzfaserplatte ist.
   Die Wandflächen sind beplankt mit den Holzfaserplatten, diese sind dann im einfachen Aufbau dünnlagig mit Lehm beschichtet. Für mich liegt eigentlich auch der Schwerpunkt in den meisten Außenwandflächen als Hüllflächentemperierung. Sprich eine Wandflächentemperierung wird auf diese Holzfaserplatten aufgebracht und dicklagig mit Lehm verputzt.

2. Wie stehen Sie zum Thema Nachhaltigkeit?

   So gut wie möglich es sich umsetzen lässt, versuche ich das aus eigenen Stücken so gut wie es geht

Experteninterview BA-Thesis 05.10.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

3. Ihre Firma arbeitet mit Lehm. Was sind Ihre Erfahrungen damit?
Wie sieht die Nachfrage hierbei aus? Wie sehen Sie den zukünftigen Markt für nachhaltig Baumaterialien?

Die Nachfrage ist höher als das was ich bedienen kann. Ich sehe definitiv die Zukunft im Lehm-Putz. Ich denke mir, wenn das Thema CO2 Besteuerung letztendlich auch die Zementindustrie trifft wird das ganze wohl doch noch mal mehr einen Schub bekommen.

4. Was halten Sie davon, dass nachhaltiges Bauen teurer als übliches Bauen ist?
Was muss sich Ihrer Meinung nach ändern?

Ich glaube der Blick auf das Gesamte ist wichtig. Es wird oft nur verglichen eine fertige Oberfläche also eine weiß gestrichene Wand im konventionellen Aufbau sprich Gips-Putz mit einer Glasfasertapete und einer Latex Farbe. Wenn ich diese Vergleiche mit einer Lehmputzwand die weiß gestrichen ist, dann vergleiche ich am Ende nicht einfach nur die weiße Wand, sondern denn beim Lehm-Putz bekomme ich ja noch eine Funktionalität dazu, die da heißt, dass das Raumklima reguliert wird. Es Ich habe somit einen nachhaltigen Baustoff, keine Chemie, keine Weichmacheröle die ausdünsten, ich habe somit eine Oberfläche bei einer Lehmfarbe die sehr lange sauber bleibt. Ich habe aktuell erst einen Kunden gehabt, wo ich das Haus vor 12 Jahren gemacht habe und wir haben darüber gesprochen und uns tatsächlich einzelne Wände ausgeguckt, die wir vielleicht noch mal überarbeiten jedoch nach 12 Jahren. Sie sind aber alle noch tadellos. Ich finde, dass so etwas mit in die Bewertung einfließen muss und nicht einfach nur sagen das Stück Wand kostet mich jetzt 80 € konventionell und im Lehmbau 120 €.

5. Können Sie Lehm als Baustoff empfehlen?

Ich kann Lehm sehr empfehlen. Der Lehm Hat allein eine andere Wärmereflektion im Gegensatz zu einer Gipswand D.h. die Körperwärme, die ich abstrahle wird von der Lehmwand zu einem höheren Anteil reflektiert als von einer Gipswand. Deswegen ist das Empfinden, dass ich mich in einem Lehmhaus wohler fühle daher kommt dies. Die Aufnahme übler Gerüche ist auch noch eine positive Eigenschaft des Lehms. Auf jeden Fall kann ich Lehm nur "wärmstens" empfehlen.

Experteninterview BA-Thesis 05.10.2021
Nachhaltige Baumethoden Stampflehmbau

6. Was denken Sie, wenn es irgendwann so weit wäre, dass die Tonne CO2 extrem teuer und ein Baustoff wie Zement unbezahlbar wird, kann Lehm hierdurch zum Baustoff der Zukunft werden? Wie sehen Sie das Potential von Lehm?

Da sind wir wieder bei dem Thema. Ich stehe da auch voll dahinter und dies wird auch definitiv dann so passieren. Alleine schon, wenn ich mal meine Entwicklung betrachte in der Auseinandersetzung mit dem Lehm die 2008 begonnen hat, wie viel mehr das Thema in den Köpfen der Menschen ist. Da ich mich so lange damit beschäftige, manchmal sagen zu mir die Leute „Du in deinem Mikro-Kosmos"
Jedoch treffe ich fast nur oder sehr viele Leute die schon irgendwie infiziert sind mit dem „Lehm-Virus". Es ist auch oft so, dass sich die Menschen, die sich mit dem Lehm auseinandersetzen diese sehen eine Wand als mehr als nur einfache Oberfläche an.

7. Ich habe mir folgendes überlegt: Stampflehmwände mit Hilfe von Robotern und Automatisierter Technologie in einen selbständigen Fertigungsprozess einzuführen. Anschauungsbeispiele sind hierfür die folgenden YouTube-Links:
   - https://www.youtube.com/watch?v=F-0BvaeLBHw
   - https://www.youtube.com/watch?v=4TXj5IIkUIY

   Was denken Sie über diese Idee?
   Wie sehen Sie das Potential für ein solchen Fertigungsprozess?
   Wie schätzen Sie die Nachfrage ein?

Das Ganze ist schwierig zu bewerten, weil es eine Vision ist irgendwo. Die auf der einen Seite relativ utopisch klingt. Aber gut so eine Vision wird ja dann getragen von einer Entwicklung. Es ist definitiv vorstellbar, da Stampflehmwände Raumklimatisch beste Gegebenheiten vorweisen kann und auch ab einer gewissen Stärke statisch relevant ist. Es wird durchaus eine positive Nachfrage resultieren.

Erklärung

Hochschule Konstanz
Technik, Wirtschaft und Gestaltung

Anlage zur
Bachelor-Thesis von

Christopher Jonathan Huhn
.....

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorstehende Bachelor-Thesis selbständig angefertigt und die benutzten Hilfsmittel sowie die befragten Personen und Institutionen vollständig angegeben habe.

Singen (Hohentwiel), 28.10.2021
……
(Ort, Datum)

[redacted]
……
(Unterschrift)