

BBSR-
Online-Publikation
25/2023

Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen

von

Prof. Manfred Grohmann
Prof. Philipp Eversmann
Anne Liebringshausen
Saskia Drebes
Andreas Göbert
Christian Freudenberger

Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

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

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.30

Projektlaufzeit: 02.2019 bis 02.2021

IMPRESSUM

Herausgeber

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

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Arnd Rose
arnd.rose@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Universität Kassel
Fachbereich „Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung“
Fachgebiet „Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren“

Prof. Manfred Grohmann
Prof. Philipp Eversmann
Anne Liebringshausen, M. Sc. (Projektleitung)
Dipl.-Des. Saskia Drebes
Andreas Göbert, M. Sc.
Christian Freudenberger

Redaktion

Universität Kassel
Anne Liebringshausen

Stand

Februar 2021

Gestaltung

Universität Kassel
Anne Liebringshausen

Bildnachweis

Titelbild: Anne Liebringshausen

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

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

Zitierweise

Grohmann, Manfred; Eversmann, Philipp; Liebringshausen, Anne; Drebes, Saskia; Göbert, Andreas; Freudenberger, Christian, 2023: Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen. BBSR-Online-Publikation 25/2023, Bonn.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	S. 06
--------------------	--------------

ABSTRACT	S. 08
-----------------	--------------

1. EINLEITUNG	S. 10
----------------------	--------------

- 1.1. Zusammenfassung und Problemstellung
- 1.2. Fragestellung und Methodik
- 1.3. Ziele
- 1.4. Prozesserläuterung

2. FORMSTOFFE	S. 14
----------------------	--------------

- 2.1. Formgrundstoffe
 - 2.1.1. Gießereialtsande
 - 2.1.1.1. Formsand
 - 2.1.1.2. Quarzsand
 - 2.1.2. Keramiksand (Cerabeads 1700)
 - 2.1.3. Holzspan/Holzmehl
 - 2.2. Formstoffbinder
 - 2.2.1. Bentonit
 - 2.2.2. Alkalisilikat (Wasserglas)
 - 2.2.3. Polyurethanharz (PU)
 - 2.2.4. Stärke
- Exkurs:** Schimmelvermeidung*

3. VERFAHRENSPROZESSE & REZEPTUREN ZUR HERSTELLUNG VON SCHALUNGSROHLINGEN	S. 19
--	--------------

- Exkurs:** Mischen, Verdichten, Trocknen*
- Auflistung nach Formstoff in Kombination mit Bindertypus:
- 3.1. Formsand
 - 3.2. Quarzsand-Wasserglas
 - 3.3. Quarzsand-Stärke
 - 3.4. Keramiksand-Polyurethanharz
- Exkurs:** Quarzsand-Polyurethanharz*
- 3.5. Holzspan-Stärke
 - 3.5.1. Trocknung
 - 3.5.2. Entwicklung eines Halbzeugs im Lagenprinzip

4. SUBTRAKTIVE BEARBEITUNG VON SCHALUNGSROHLINGEN	S.31
--	-------------

5. OBERFLÄCHENBEARBEITUNG UND TESTBETONAGE	S. 35
---	--------------

- 5.1. Oberflächenbehandlung je nach Verfahren
- 5.2. Keramiksand-Schalungen
- 5.3. Holzspan-Stärke-Schalungen

6. PRÜFVERFAHREN

S. 45

- 6.1. Druckfestigkeit von Schalungen
- 6.2. Bewertung von Oberflächen
 - Exkurs:** Sichtbetonoberflächen*
 - 6.2.1. Bewertung von Schalungsoberflächen
 - 6.2.2. Bewertung resultierender Betonoberflächen
- 6.3. Toleranzabgleich
 - 6.3.1. Toleranzabgleich von Schalungen
 - 6.3.2. Toleranzabgleich von Betonabgüssen

7. RÜCKFÜHRUNG

S. 52

- 7.1. Formsand-Schalungen
- 7.2. Quarzsand-Stärke-Schalungen
- 7.3. Quarzsand-Wasserglas-Schalungen
- 7.4. Keramiksand-Schalungen
- 7.5. Holzspan-Stärke-Schalungen
 - 7.5.1. Rückführung durch Schreddern
 - 7.5.2. Rückführung im Wasserbad

8. VERFAHRENSVERGLEICH

S. 56

9. UMSETZUNG 1:1 DEMONSTRATOR

S. 59

- 9.1. Vorstudien in den Betonfertigteilterwerken zur Umsetzung eines 1:1 Demonstrators
- 9.2. Entwurf und Fertigung eines 1:1 Demonstrators
 - EXKURS** Reduzierung des Eigengewichts von Sandschalungen*
- 9.3. Produktion, Ergebnisse und Auswertung von Betondemonstratoren
 - 9.3.1. Betonage in den Betonfertigteilterwerken
 - 9.3.2. Ergebnisse der Betonage von „Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG“
 - 9.3.3. Ergebnisse der Betonage von „Runkel Fertigteilterbau GmbH“
 - 9.3.4. Auswertung der Betondemonstratoren

10. AUSWERTUNG/FAZIT/RESÜMEE

S. 94

- 10.1. Ökobilanzierung
- 10.2. Resümee
- 10.3. Anwendung der Forschungsergebnisse

11. DANKSAGUNG/MITWIRKENDE

S. 111

12. LITERATUR- UND BILDNACHWEIS

S. 113

- 12.1. Literaturnachweis
- 12.2. Abbildungsverzeichnis

KURZFASSUNG

Problemstellung und Lösungsansatz

Die Möglichkeiten und Entwicklungen der digitalen Formfindungen steigen, doch fehlt es in der Praxis noch immer an einer nachhaltigen Umsetzung und Realisierung von komplexen, dünnen und doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen, die zum jetzigen Stand der Technik nur unter hohem Materialaufwand hergestellt werden können, und dadurch sowohl aus Mangel an Umsetzungsvermögen als auch Kostengründen nur partiell realisiert werden können. Aus dieser Notwendigkeit zielt diese Forschungsarbeit auf die Entwicklung eines Zero-Waste-Verfahrens, zur Herstellung nachhaltiger, komplexer, skalierbarer, rezyklier- und wiederverwendbarer Schalungen für die industrielle Fertigung.

Gegenstand des Forschungsvorhabens. Beschreibung der Arbeitsschritte und des Lösungswegs

Gegenstand der Forschungsarbeit war die Untersuchung von Industrieabfällen wie Altsand und Altholz auf ihre Tauglichkeit als Schalungsmaterial und deren vorwiegend subtraktiver Bearbeitung mittels digitaler Fertigungsweisen. In einzelnen Arbeitsschritten wurden die Formstoffe durch Prüfverfahren und die Erstellung von Demonstratoren in unterschiedlichen Skalierungsschritten in Zusammenarbeit mit Industriepartnern überprüft und optimiert.

Schalungen wurden stetig in unterschiedlichen Stadien geprüft, analysiert und ausgewertet, um quantifizierbare und vergleichbare Kennwerte zu generieren. Die Untersuchungen sahen sowohl Prüfungen zur Druckfestigkeit der unterschiedlichen Schalungen vor als auch zur Charakterisierung von Oberflächenqualität sowie der Gesamtpräzision zwischen dem realen, gefrästen Schalungskörper und dem digitalen 3D-Modell.

Zur Auswahl der Schalungsgrundstoffe wurde eine breit aufgestellte Grundlagenstudie erstellt, die deponierte Gießereialtsande auf Basis von Quarzsand und Quarzsand mit Bentonitanteil (Form- oder auch Bentonitsand genannt), kreislauffähigen und recyclebaren Keramiksand, sowie seitens der nachwachsenden Rohstoffe Holzspan/ Holzmehl auf Altholzbasis miteinschließt.

Die Formgrundstoffe selbst haben keine bindende Funktion und sind auf die vermittelnde Wirkung eines Bindemittelsystems angewiesen, um für die Herstellungen von Schalungen ein verdichtbares, formstabiles Kollektiv zu bilden und anfallenden Kräfteeinwirkungen wie die der digitalen Fertigung, Transport und Handling in Betonfertigteilerwerken standzuhalten. In eine engere Wahl wurden die Bindersysteme Bentonit, Wasserglas, kaltquellende

Stärke und Furanharz, der aus nachhaltigen Ressourcen gewonnen wird, einbezogen. Evaluiert wurden folgende Kombinationen von Formgrundstoffen und Bindertypen (Abb. 1).

BINDER	QUARZSAND	HOLZSPAN	KERAMIK
Bentonit	x		
Wasserglas	x		
Stärke	x	x	
Furanharz	x		x

Abb. 1: Untersuchte Formgrundstoffe und ihre Formstoffbinder

Bei der Wahl von Formstoffen und Bindersystemen stand die Betrachtung der ökologischen Verträglichkeit, eine sortenreine Rückführung der Schalungen und Wiederaufbereitung – die kohärent ist mit einem konsequenten Verzicht auf (schädliche) Additive in Formstoffrezepturen – im Vordergrund zur Umsetzung eines zusätzlichen geschlossenen Materialkreislaufsystems.

Zur Herstellung eines Formstoffrohlings wurden je nach Formstoff-Bindersystem variierende Verfahren angewendet. Im Sinne des Forschungsprojektes, einen maximal nachhaltigen Ansatz zu verfolgen, wurde dabei auf bereits bestehende Maschinen und Verfahren zurückgegriffen.

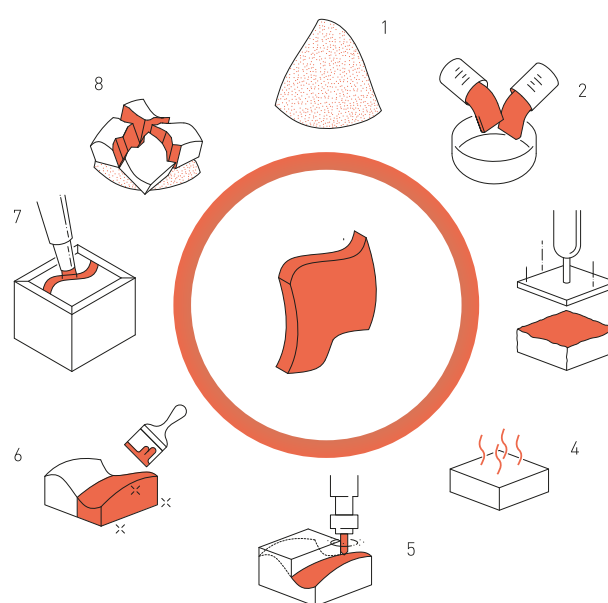


Abb. 2: Prozessklärung

Grundlegend ließen sich alle Systeme in folgende Prozesse einteilen: Wurde der Formstoff mit (1) Binder versehen, gab es je nach Art des Stoffes die Notwendigkeit, den resultierenden Formstoffbrei (2) zu verdichten. Abhängig vom verwendeten Formgrundstoff und Formstoffbinder, variieren Trocknung sowie Vernetzung sowohl nach (3) Art als auch (4) Vernetzungsverfahren (siehe Abb. 2).

Aus dem Herstellungsprozess hervorgegangene, gebundene und ausgehärtete Werkstoffe konnten mit einer CNC-Fräse subtraktiv geformt werden. Um den Industriestandard an Sichtbetonoberflächen erfüllen zu können (Sichtbetonklasse 4: Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung), wurde der Betrachtung von resultierenden Schalungsoberflächen eine hohe Bedeutung zugrunde gelegt, da diese bildgebend sind für das spätere Werkstück. Der Auftrag einer Versiegelung bildet die Kontaktfläche zwischen Schalhaut und Beton. Neben einer Glättung der rauen und saugenden Schalhaut dient sie einer schützenden Wirkung vor dem Eindringen des Frischbetons, ohne jedoch durch schädliche Additive eine sortenreine Rückführung der Schalungen zu gefährden.

Die oberflächenbehandelten Schalungen (Schalung und Konterschabung) wurden vertikal aufgestellt und mit einem äußeren Schalrahmen versehen. Der Hohlraum zwischen beiden Schalungselementen wurde justiert und mit Beton ausgegossen.

Durch konsequente, nachhaltige Maßnahmen ließen sich nach der Betonage Schalung und Betonelement sortenrein trennen. Die Schalungen konnten repetitiv mit Beton ausgegossen werden (ohne eine erneute Versiegelung) oder via Zermahlungs-, Zerstoß- oder Auflösungsprozesse zurückgeführt werden. Am Ende der Prozesskette wurden die recycelten Formstoffe wiederverwendet, durchliefen erneut die Prozesskette und starteten so einen weiteren Lebenszyklus.

Resümee

Aufgrund von hohen Festigkeitswerten, Oberflächengüten, Industriefähigkeit, Präzision - und nicht zuletzt den Rückführungseigenschaften - überzeugte das Holzspan-Stärke-Verfahren und das Keramiksand-Verfahren im Vergleich zu anderen erprobten Formstoffabfällen.

Das Keramiksand-Verfahren erzielte Schalungskörper mit den höchsten Festigkeitswerten und konnte aufgrund dessen als industrielles Verfahren in Einsatz gebracht werden. Prüfverfahren und 1:1 Umsetzungen in Form eines großmaßstäblichen Demonstrators zeigten, dass hier großes Potenzial bezüglich der Oberflächengüte lag. Die Oberflächenbehandlungen waren unaufwändig und die Rückführung möglich, wobei nach einer gewissen Anzahl an Prozesszyklen die Keramik regeneriert werden musste.

Das Holzspan-Stärke-Verfahren weist durch seine hohe Oberflächengüte und das geringe Gewicht der Schalungen großes Potenzial auf. Auch die positiven Erkenntnisse über den möglichen Einsatz jeglicher Holzarten und die Unabhängigkeit von Spanlängen sowie die umstandslose Rückführung der Schalungen bestärkten das Verfahren. Neben den grundlegenden materialtechnischen Vorteilen des Formstoffes stellte auch die einfache Implementierung in bestehende Betriebe und Produktionsweisen sowie der geringe Werkzeugverschleiß große Vorteile gegenüber allen anderen Verfahren dar.

ABSTRACT

Problem definition and solution approach

The possibilities and developments of digital form finding are increasing, but in practice there is still a lack of sustainable implementation and realisation of complex, thin and doubly curved precast concrete parts. At the current state of research, these parts can only be produced at a high costs due to expensive materials and high production costs.

This research developed a zero-waste manufacturing process for sustainable, complex, scalable, recyclable and reusable formworks for industrial production.

Subject of the research project. Description of the work steps and the solution

The subject of the research was the examination of industrial waste such as used sand and wood for their suitability as formwork materials, and their processing using digital manufacturing methods. At each stage of the process, testing methods were used to check and optimise the moulding materials. Demonstrators were produced in different scales with the help of industrial partners to check and optimise the results. Formworks were constantly checked, analysed and evaluated to generate quantifiable and comparable parameters. The research tested the compressive strength, the characterisation of the surface quality and the precision between the prototypes and the digital 3D model.

An experimental material study was carried out in order to select the basic formwork materials. These included deposited waste foundry sand based on quartz sand and quartz sand with bentonite (moulding or bentonite sand), and reusable and recyclable sintered ceramics. Renewable raw materials such as waste wood, in the form of chips and wood flour, were also included in the research.

Basic mould materials have no binding function and are dependent on the intermediary effect of a binding agent system to form a compact, stable collective for the production of formworks and to withstand the forces that arise, such as those of digital production, transport and handling in precasting plants.

The binder systems bentonite, sodium silicate, cold-swelling starch and furan resin, which is obtained from sustainable resources, were included in a closer selection. The following combinations of mould base materials and binder types were evaluated (Fig. 1).

BINDER	QUARZ SAND	WOOD CHIP	CERAMIC
Bentonite	x		
Sodium silicate	x		
Starch	x	x	
Furan resin	x		x

Fig. 1: Examined basic moulding materials and their binders

When choosing moulding materials and binder systems, the focus was on ecological compatibility, correctly sorted recycling of the formwork, and reprocessing, which consistently avoids (harmful) additives in moulding material formulas to implement an additional closed material cycle system. To produce a moulding material blank, varying processes were used depending on the moulding material-binder system. In keeping with the research project's goal to pursue a maximally sustainable approach, existing machines and processes were used.

Basically, all systems can be divided into the following processes: If the moulding material was provided with a binder, depending on the type of material, there was a need to compress the resulting material pulp.

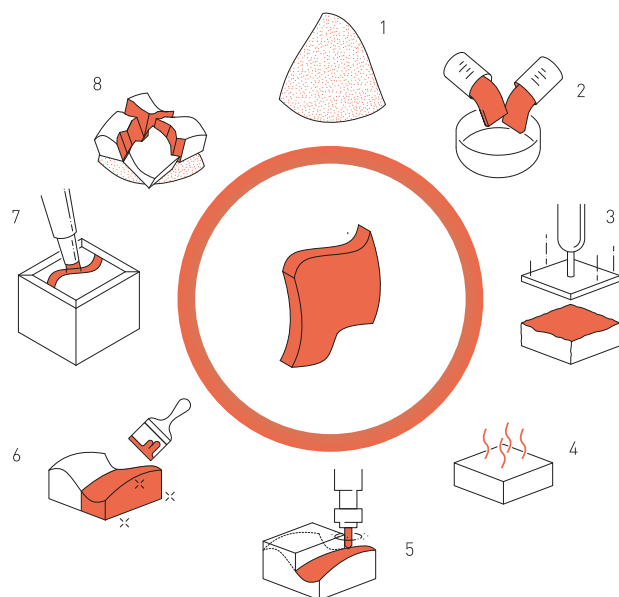


Fig. 2: Process explanation

Depending on the chosen moulding base and binder, drying and crosslinking vary according to both type and cross-linking process (fig. 2).

Bounded and hardened materials, resulting from the manufacturing process, could be subtractively shaped with a CNC milling machine. In order to be able to meet the industrial standards for architectural concrete requirements (Expodes Concrete Class 4: "concrete surfaces with particularly high design importance" from DBV Merkblatt Sichtbeton Fassung 2004), the consideration of the resulting formwork surfaces was given a high level of importance, as these affect the appearance of the final workpiece.

The application of a seal forms the contact area between the formwork shell and the concrete. In addition to smoothing the rough and absorbent formwork shell, it also has a protective effect against the ingress of fresh concrete, but without endangering the reuse to their original components of the formwork as a result of harmful additives.

The surface-treated formworks (formwork and countering formwork) was erected vertically and provided with an outer formwork frame. The cavity between the two formwork elements was adjusted and filled with concrete. Through consistent, sustainable measures, the formwork and concrete element could be separated and correctly sorted after concreting. Concrete could repeatedly be poured from the formwork (without renewed sealing) or its being returned to its original state via grinding, crushing or dissolving processes. At the end of the process chain, the recycled moulding materials were reused, run through the process chain again and started another life cycle.

Conclusion

Due to the high strength values, surface quality, industrial suitability, precision - and finally the return properties - the wood chip starch process and the sintered ceramic process were convincing in contrast to other tried and tested moulding waste materials.

The ceramic sand process achieved formworks with the highest strength values and could be used as an industrial process.

Test methods and 1:1 implementations in the form of a large-scale demonstrator showed the great potential in terms of surface quality. The surface treatments were inexpensive and the recycling possible, whereby the ceramic had to be regenerated after a certain number of process cycles.

The wood chip and starch process have great potential due to a high surface quality and the low weight of the formworks. The positive findings about the possible use of any type of wood and the independence of chip lengths, as well as the easy return of the formwork, strengthened the process. In addition to the fundamental material-technical advantages of the moulding material, the simple implementation in existing plants and production methods as well as the low tool stripping are major advantages over other processes that have been explored.

1. EINLEITUNG

1.1. Zusammenfassung & Problemstellung

Die Möglichkeiten und Entwicklungen der digitalen Formfindungen steigen, doch fehlt es in der Praxis noch immer an einer nachhaltigen Umsetzung und Realisierung komplexer Geometrien, die zum jetzigen Stand der Technik nur unter hohem Materialaufwand hergestellt werden können, und dadurch sowohl aus Mangel an Umsetzungsvermögen als auch Kostengründen nur partiell realisiert werden können. Hier zeigt sich klar die Dringlichkeit zur Realisierung eines nachhaltigen Schalungsverfahrens.

Das Forschungsvorhaben zielte auf die Entwicklung eines Zero-Waste-Verfahrens, zur Herstellung nachhaltiger, skalierbarer und wiederverwendbarer Schalungen für die industrielle Fertigung, ab. Im Fokus stand dabei die Realisierung von präzisen, digital/parametrisch entworfenen, komplexen, dünnen und doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen.

Gegenstand der Forschungsarbeit war die Untersuchung von Industrieabfällen und nachhaltigen Materialien auf ihre Tauglichkeit als Schalungsmaterial und deren vorwiegend subtraktiver Bearbeitung mittels digitaler Fertigungsverfahren. In jeweiligen Arbeitsschritten wurden die Formstoffe durch Prüfverfahren untersucht und die resultierenden Erkenntnisse anhand großmaßstäblicher Demonstratoren überprüft und optimiert.

Das entwickelte Zero-Waste-Verfahren bringt den ökologisch nachhaltigen und wirtschaftlichen Vorteil, dass als Schalungsgrundlage gesundheitlich unbedenkliche industrielle Abfallprodukte, die einen geschlossenen Kreislauf aufweisen, in den Einsatz gebracht werden und die zusätzlich immer wieder verwendet und neu geformt werden können.

1.2. Fragestellung & Methodik

Es ergaben sich folgende Themenbereiche, die methodisch erarbeitet wurden: Erstellung von Schalung und Kontersicherheit, Standsicherheit der Schalungen beim Betoniervorgang, Formung (kontrollierte Gestaltung und Produktion), Abformungsverhalten und Trennwirkung, Oberflächenqualität, Skalierbarkeit, Präzision, eine sortenreine Rückführung und die Frage nach der Eignung als ein nachhaltiges industrielles Verfahren. Der hohe Innovationsgrad der Arbeit brachte ein Fehlen von vorhandenen Forschungsansätzen mit sich, was sich auf die Methodik auswirkte, die zwischen praktischen, experimentellen Forschungsarbeiten, digital- maschinell gestützten Simulations-, Analyse- und Auswertungsverfahren und Steuerung von Herstellungsprozessen variierte.

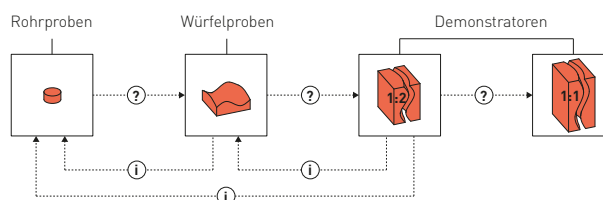


Abb. 1: Methodisches Vorgehen

Die Methodik in der ersten Phase diente der Grundlagenforschung und war auf die Produktion und Machbarkeit kleinmaßstäblicher Prototypen ausgelegt, um in einem evolutionären Prozess die beschriebenen Probleme praktisch anzugehen und zielführende, optimierte Ergebnisse zu erlangen. Experimente wurden dokumentiert, aufbereitet, in Bezug zueinander gesetzt und ausgewertet. Im Verlauf der folgenden Phasen wurden Forschungsergebnisse unter Zuhilfenahme von Analyseverfahren immer weiter präzisiert: Ergebnisse wurden auf Ihre Oberflächenbeschaffenheit wie Rauigkeit unter Laborbedingungen analysiert und ausgewertet, um messbare, vergleichbare Kennwerte zu generieren. Die Druckfestigkeit der Schalungen wurde mittels genormter Prüfverfahren bestimmt. Geschalte Betonelemente wurden optisch analysiert (3D-Scan) und mit dem digitalen Modell abgeglichen, hinsichtlich Präzision und eventuell auftretender Verfahrenstoleranzen.

Details wurden immer wieder sowohl praktisch als auch digital vertiert ausgearbeitet. Aus der Analyse resultierende Kennwerte wurden hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewertet und in Bezug zu konventionellen Materialien und Verfahren gesetzt, ebenso wie wirtschaftliche Aspekte (Skalierbarkeit, Maschineneinsatz, Arbeits- und Zeitaufwand).

Zur Prüfung der erarbeiteten Ergebnisse wurde, mit der Unterstützung von Industriepartnern, zum Ende der Forschungsarbeiten ein 1:1-Prototyp, einer dünnwandigen Betonschale hergestellt. In den abschließenden Bauphasen standen eine fachübergreifende Kommunikation und Projektsteuerung im Fokus. Während des Projektes wurde in den einzelnen Phasen eine kontinuierliche Recherche- und Feedback-Kommunikation mit Vertretern aus Industrie und Wirtschaft geführt, um eine zukünftige Machbarkeit des Verfahrens in der Praxis zu prüfen.

1.3. Ziele

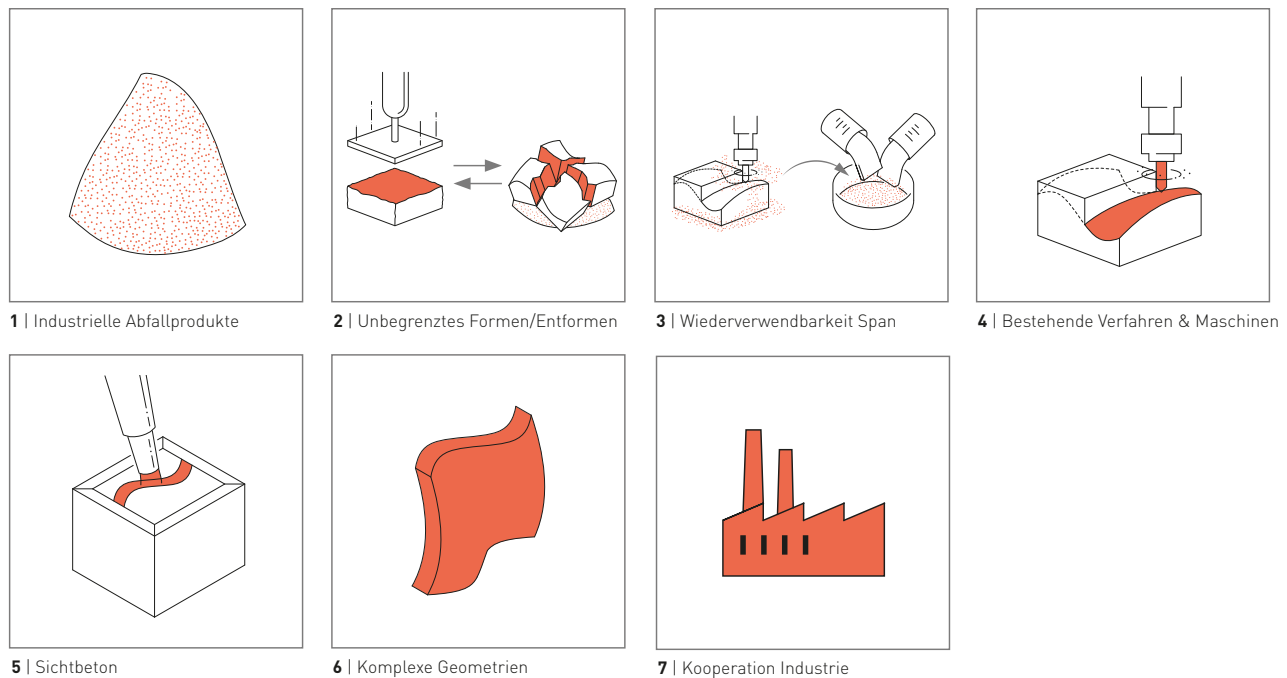


Abb. 2: Visualisierte Umsetzungsparameter

Aus der bereits genannten Problemstellung und einem Mangel an nachhaltigen Alternativen zur Realisierung von komplexen Betonfertigteilen, leiteten sich für die Forschungsarbeiten folgende Umsetzungsanforderungen ab:

- 1.) Verwendung von industriellen Abfallprodukten und/oder nachhaltigen, kreislauffähigen Materialien als Formstoffgrundlage
- 2.) Möglichkeit eines mehrfachen Formens- und Entformens der Schalungen, sowohl zur Abbildung verschiedener Geometrien als auch eine wiederholte Abformung einer Geometrie
- 3.) Rückführung des bei der subtraktiven Bearbeitung aufkommenden Formstoffspans in den Formstoffkreislauf
- 4.) Anwendung von bestehenden, in der Industrie direkt umsetzbaren Fertigungsprozessen und Maschinen
- 5.) Umsetzung etablierter als auch standardisierter Betonoberflächengüten
- 6.) Abbildung komplexer Geometrien
- 7.) Kommunikation und Kooperation mit der Industrie, um eine Markteinführung zu ermöglichen

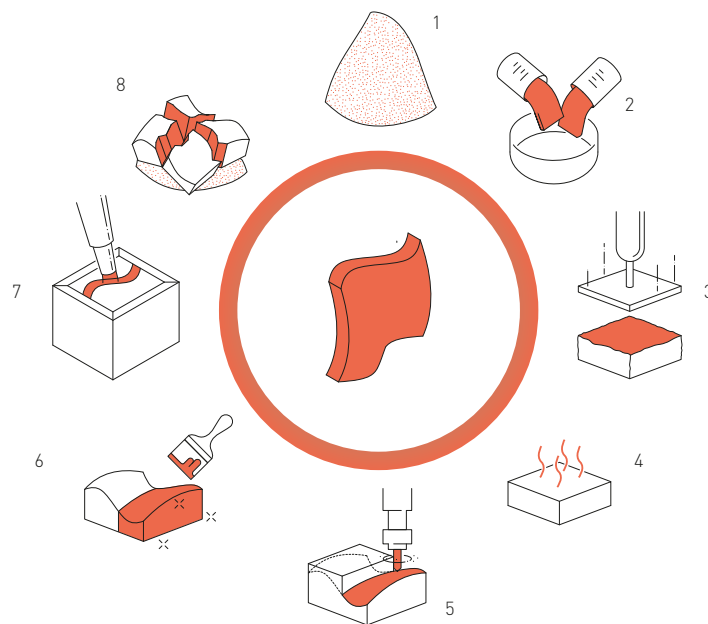


Abb. 3: Prozessdiagramm

1.4. Prozesserläuterung

Folgend ein kurzer Abriss über die einzelnen Prozessschritte des Formstoffkreislaufs für die Herstellung von komplexen Betonschalungen:

Schritt 1: Formstoffe

Zu Beginn der Prozesskette steht ein Formstoff, der entweder bereits seinen Lebenszyklus in der Industrie beendet hat, aber für die anstehenden Forschungsarbeiten wiederverwendet werden kann, oder ein Formstoff, der einen geschlossenen Kreislauf garantiert. Erforscht wurden die Formgrundstoffe Sand, Keramiksand und Holzspan.

Schritt 2: Formstoffbinder

Die Formgrundstoffe sind in ihrem Zustand lose und ungebunden. Um diese zusammenzufügen, wurden im Sinne des Forschungsansatzes nachhaltige Formstoffbinder in Verwendung gebracht.

Schritt 3: Pressen/ Verdichten

Wurde der Formstoff mit Binder versehen, gibt es je nach Art des Stoffes die Notwendigkeit, den resultierenden Formstoffbrei zu verdichten.

Schritt 4: Trocknung und Vernetzen

Abhängig vom verwendeten Formgrundstoff und Formstoffbinder variieren Trocknung sowie Vernetzung sowohl nach Art als auch Vernetzungsverfahren.

Schritt 5: Subtraktives Formen

Die nun resultierenden, gebundenen und ausgehärteten Werkstoffe können mit einer CNC-Fräse subtraktiv geformt werden.

Schritt 6: Oberflächenbearbeitung

Um das Eindringen des Betons zu verhindern und eine glatte Oberflächengüte zu erlangen, muss die aufgeraute Oberfläche zur Versiegelung bearbeitet werden. In der Wahl der Versiegelungs-Produkte wurde auch hier ein möglichst nachhaltiger Ansatz verfolgt.

Schritt 7: Betoniervorgang

Die oberflächenbehandelten Schalungen (Schalung und Konterschalung) werden vertikal aufgestellt, mit einem äußeren Schalrahmen versehen und der Hohlraum zwischen beiden Schalungselementen mit Beton ausgegossen.

Schritt 8: Rückführung

Nach dem Betoniervorgang lassen sich Schalung und Betonelement sortenrein trennen. Die Schalungen können via Zermahlungs-, Zerstoß- oder Auflösungsprozess zurückgeführt werden. Am Ende der Prozesskette wird der zurückgeführte Formstoff wiederverwendet, durchläuft erneut die Prozesskette und beginnt einen weiteren Lebenszyklus.



Abb. 4: Verwendete Formstoffe

2. FORMSTOFFE

Erforscht wurden verschiedene Formstoffe, hinsichtlich ihrer Tauglichkeit als Schalungsmaterial, für den Einsatz in der Fertigung von Betonfertigteilen. Formstoffe setzen sich zusammen aus den Formgrundstoffen, also einem Füllstoff, der den Hauptbestandteil des Gemenges bildet und einem Bindemittel. Der Formgrundstoff hat in der Regel selbst keine bindende Funktion und ist auf die vermittelnde Wirkung eines Bindemittelsystems angewiesen, um ein verdichtbares, fräsbares und haltbares Kollektiv zu bilden.

Im Folgenden werden die im Forschungsprojekt betrachteten Formgrundstoffe sowie Formstoffbinder hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Eignung für den eingangs erwähnten Einsatz beschrieben.

2.1. Formgrundstoffe

Bei Formgrundstoffen handelt es sich um natürliche oder synthetische Späne, Granulate oder Sande, die in der Regel selbst keine bindenden Eigenschaften besitzen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Formgrundstoffe (1) Quarzsand, (2) Holzspan, (3) sowie ein Multibasierter Keramiksand betrachtet und beschrieben.

BINDER	QUARZSAND	HOLZSPAN	KERAMIK
Bentonit	x		
Wasserglas	x		
Stärke	x	x	
Furanharz	x		x

Abb. 5: Untersuchte Formgrundstoffe und ihre Formstoffbinder

2.1.1. Gießereialsande

Obwohl Gießereien 85-95% der verwendeten Form- und Quarzsande zyklisch gebrauchen, fallen bei der Herstellung von Formen große Mengen Gießereialsande an. Der Altsand wird fast ausschließlich deponiert, da er nicht länger den Ansprüchen des Metallgusses genügt. Im Kontext eines neuen Wertstoffkreislaufs, etwa in der Bauindustrie und in der Produktion von Betonfertigteilen, erweisen sich diese "Abfälle" als potente Rohstoffe.

Auch hinsichtlich geringer Deponiekapazitäten und fehlender Akzeptanz gegenüber neuer Deponiestandorte, gilt es neue Verwertungsansätze zu erarbeiten und so einen ökologischen und ökonomischen Umgang mit dem Material zu gestalten.¹

2.1.1.1. Formsand

„Formsand“ oder auch „Grünsand“ ist ein mit Bentonit und Glanzkohlenstoffbildnern versetzter Quarzsand, welcher als Formstoff für Gussmodelle in Gießereien verwendet wird. Der Einsatz von Formsand als Formstoff bedeutet die Anfertigung von „verlorenen Formen“, also Formen, die beim Entformen des Gussstücks aufgebrochen werden müssen und somit nicht neu abgegossen werden können. Formsand wird in der Gießindustrie im feuchten Zustand, mit einem Wasseranteil von 5-10%, verwendet und abgegossen.²

Der im Forschungsprojekt verwendete Formsand wurde von der Deponie des Unternehmens „Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG“ aus dem geografisch nahegelegenen Stadtallendorf bezogen. Als Formgrundstoff dient ein Gemisch aus den Sanden G36 und H32 der „Quarzwirke GmbH“, mit mittleren Korngrößen von 0,18 mm (G36) und 0,32 mm (H32).



Abb. 6: Formsand / 0,6-fache Vergrößerung

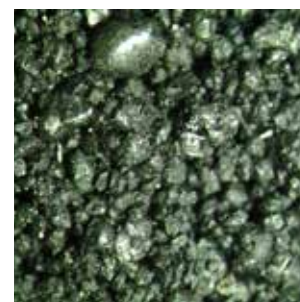


Abb. 7: Formsand / 0,6-fache Vergrößerung

Als organische Additive werden Glanzkohlenstoffbildner, wie etwa Steinkohlestaub, Harze oder Öle hinzugegeben, welche eine trennende Wirkung zwischen Gussteil und Sand erwirken. Tritt die Schmelze auf den Sand, entsteht durch thermische Abspaltung Glanzkohlenstoff, der die Sandkörner des Formstoffes an der Grenzfläche Form/Metall einhüllt und eine Benetzung durch den flüssigen Gusswerkstoff verhindert. Der so aktivierte Glanzkohlenstoff färbt den Sand dunkel und bedeutet einen 10-12%igen Anteil von "Schlemmstoffen" im Gemisch. Dieser Feinstoffanteil setzt sich zusammen aus abgebranntem Bentonit, fein gebrochenem Quarz sowie dem beschriebenen Glanzkohlenstoff und muss, für den weiteren Einsatz in der Gießerei, ausgesondert werden.³

Die „Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG“ beschreibt für ihren Formsand eine Recycling-Quote von 90% und eine Verwendung des Sands in 15 bis 20 Umläufen. Der Gehalt an aktivem Bentonit und Glanzkohlen-

01 : Vgl. Winterhalter et al. (1992), S. 7 02 : Vgl. Martin (2020) 03 : Vgl. Franke (2019), S. 316

stoffbildnern wird prozessbegleitend überprüft und sobald nötig, regeneriert. Dennoch fallen große Mengen nicht weiter regenerierbaren Sandes an. Diese ausgetauschten und entstaubten Sande werden deponiert und stehen der Entwicklung eines nachgelagerten Produktionskreislaufs zur Verfügung.⁴

2.1.1.2. Quarzsand



Abb. 8: Quarzsand /
0,6-fache Vergrößerung

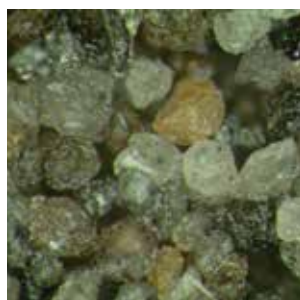


Abb. 9: Quarzsand /
6,6-fache Vergrößerung

Mittels Binder und Härterkomponente gebunden, dienen sog. Kerne in der Gießereitechnik hauptsächlich der Abbildung von Innenkonturen, zur Schaffung von Hohlräumen in Formteilen und ggf. auch Hinterschneidungen. Kernformen müssen sowohl einem hohen Gießdruck standhalten als auch mechanisch und/oder thermisch leicht aufzubrechen sein. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist der Guss von Motorblöcken, bei dem die Kerne nach dem Guss durch Rütteln entfernt werden. Eine Vielzahl von Verfahren sowie Bindersystemen steht der Herstellung von Sandkernen zur Verfügung. Die in der Quarzsandherstellung verwendeten Harze härten, mittels Katalysatoren, durch Polymerisation aus. Dabei werden die einzelnen Sandkörner umschlossen und in einem festen Netzwerk gebunden.

Aufgrund hoher Anforderungen an die Stabilität, etwa durch Transporte innerhalb der Gießereien und Genauigkeit der Geometrie, wird für die Herstellung von Kernen fast ausschließlich neuer Quarzsand verwendet, wodurch große Mengen an Kern-Altsanden anfallen.⁵

Der für das Forschungsvorhaben verwendete Quarzsand ist ein Abfallprodukt der Gießereiindustrie und wurde auch über den Kooperationspartner „Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG“ bezogen. Den Formgrundstoff, also den Quarzsand H32, mit einer mittleren Korngröße von 0,32 mm bezieht das Unternehmen von der „Quarzwirke GmbH“. Der Quarzsand wird von „Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG“ im sog. Cold-Box-Verfahren eingesetzt und mit Phenolharz (organisch) gebunden. Je nach Einstellung der Komponenten beträgt die Verarbeitungszeit wenige Sekunden bis hin zu einigen Stunden. Die Schadstoffentwicklung während des Aushärtens ist ver-

gleichsweise gering und es wird kein Stickstoff freigesetzt. Die Aufbereitung findet mechanisch statt, sodass der Formstoff entstaubt, aber nicht regeneriert ist (hier müsste man Reststoffe abbrennen, also thermisch aufbereiten). Bei Fritz Winter wird der Sand nur einmalig verwendet und anschließend deponiert.

2.1.2. Keramiksand (Cerabeads 1700)



Abb. 10: Cerabeads 1700 /
0,6-fache Vergrößerung



Abb. 11: Cerabeads 1700 /
6,6-fache Vergrößerung

Ist ein synthetisiertes, auf Mullit (Mineral) basierendes und kugelförmiges Aluminiumsilikat. „Cerabeads 1700“, so die Markenbezeichnung der verwendeten Keramik, wird in Japan hergestellt und findet als Formgrundstoff in Gießereien Verwendung. Durch die kugelförmige Geometrie erhält die Keramik im Verbund sowohl eine äußerst hohe Festigkeit als auch eine besonders feine Oberflächenbeschaffenheit. Bei der spanenden Verarbeitung, wie etwa dem Fräsen von Formen, werden die einzelnen Keramik-kugeln aus dem Netzwerk gebrochen, also entlang des Binders, ohne dabei selbst aufzubrechen. Somit neigt der Formstoff kaum zum „Verstauben“ und kann mit hohen Wiederaufbereitungszyklen aufwarten. Außerdem ist die Keramik beständig gegen jede Art von Säuren und Laugen und kann sowohl sehr gut oberflächenbehandelt als auch mit Beton abgegossen werden.

Dieser keramikähnliche Spezialsand war im Forschungsantrag nicht vorgesehen. Die gießereispezifischen, positiven Eigenschaften ließen sich jedoch auch auf die Verwendung als Betonschalung übertragen und wurden daher in die Forschungsarbeiten eingebunden. Der Keramiksand ist kein industrielles Abfallprodukt, dennoch kann der Formgrundstoff immer wieder verwendet werden und gewährleistet so einen geschlossenen Kreislauf. Gießereimodelle werden in der Industrie mechanisch aufbereitet und wiederverwendet. Erst nach 30 bis 40-facher Verwendung muss der Formstoff thermisch regeneriert werden.⁶

Chemische Zusammensetzung:

Al₂O₃ 60,72 %, SiO₂ 36,41 %, Fe₂O₃ 1,43 %, Na₂O 0,20 %, MgO 0,16 %

04 : Vgl. Martin [2020]. 05 : Vgl. Winterhalter et al. (1992), S. 36. 06 : Vgl. Maus [2019]

2.1.3. Holzspan/Holzmehl

	JELUXYL	WEHO 120/F.	WEHO 500	WEHO 500S	WEHO 800S	HAHO 120/F.	HAHO 150/30
Holzsorte		Weichholz	Weichholz	Weichholz	Weichholz	Hartholz	Hartholz
Holzart		Fichten-/Tannen-holzmehl	Fichten-/Tannen-holzmehl	Fichten-/Tannen-holzmehl	Fichten-/Tannen-holzmehl	Hartholzmehl	Hartholzmehl
Spanlänge [µm]		bis 120	bis 500	bis 500	bis 1.000	bis 180	bis 500
Trockenverlust [%]		~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 10	~ 10
Schüttgewicht [g/l]		~ 140	~ 130	~ 180	~ 190	~ 220	~ 240
PH-Wert		~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5

Abb. 12: Untersuchte Holzmehl- und Holzspanarten der Firma „Jelu“

Holzspan entsteht als Neben- und Abfallprodukt bei zerspanenden Betrieben, wie etwa Sägewerken, und kann sowohl aus Hart- als auch Weichhölzern bestehen. Während Holzspan z.B. bei Fräsprozessen resultiert, entsteht das feinere Holzmehl beim Schleifen von Holz.

Es wurde anfallender, industrieller Holzspan als auch entstehende Nebenprodukte für Betonschalungen in Verwendung gebracht. Erste Versuche, diesen anfallenden Industriespan mit Stärke zu binden, hat viele Forschungsfragen aufgeworfen. Da der Restspan unterschiedliche Holzsorten in unterschiedlichen Längen beinhaltet, war bei der Betrachtung von Proben offen, welche oder welcher Parameter für resultierende Ergebnisse ausschlaggebend war. Um den Formstoff Holz zunächst als isolierten Parameter zu erforschen, wurde daher auf genormten Holzspan und Holzmehl aus der Industrie zurückgegriffen. Hier liegen u.a. Spezifikationen über Holzsorte, Spanlängen, Struktur, Trockenzustand und Trockenverlust, Schüttdichte, Siebrückstände und pH-Wert vor, die forschungsrelevante Informationen lieferten und eingrenzten.

Holzprodukte werden kategorisiert nach Spanlängen und Hart- bzw. Weichholz. Die Holzfaserstoffe wurden von dem Unternehmen „JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG“ für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt.

In die Forschungsarbeiten eingebunden wurden Spanlängen von 120 µm (Holzmehl) bis hin zu 800 µm (Holzfasern). Einbezogen wurden sowohl Weichhölzer wie Fichte und Tanne, als auch Harthölzer, mit den in Abbildung 12 aufgeführten Spanlängen und verwendeten Spanprodukten.

2.2. Formstoffbinder

Formgrundstoffe werden durch Bindersysteme an ihren Phasengrenzen zu Kollektiven gefügt. Dies geschieht chemisch oder physikalisch (Kohäsion, Adsorption, Adhäsion), sodass der Formstoff vernetzt bzw. verklebt.

Als Bindertypen wurden (A) Bentonit, (B) Alkalisilikat (Wasserglas), (C) pflanzliche Stärken und (D) Polyurethanharz untersucht.

2.2.1. Bentonit

Bentonit ist ein Gestein aus feinen Tonmineralien, das eine starke Wasseraufnahme- und Quellsfähigkeit aufweist und sandige Formgrundstoffe in einer lehmigen Masse mechanisch bindet. Der Farbton von Bentonit reicht von hellen Beigetönen bis hin zu sandigem Gelb. In der Lebensmittelindustrie wird Bentonit als Fällmittel für Fruchtsäfte und Wein verwendet, sowie in Nahrungsergänzungsmitteln. Der in der Gießereiindustrie verwendete und mit Bentonit gebundene Formsand besitzt einen tiefschwarzen Farbton, welcher durch weitere Additive wie Kohlenglanzstoffe und deren Abbrennen erzeugt wird.⁷

Abbrennen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Bestandteile des bindefähigen Bentonits verbrennen und den Formgrundstoff nicht länger adäquat binden. Er gilt als „totgebrannt“. Eine Regeneration des Formstoffs, durch die erneute Zugabe von „aktivem“ Bentonit ist jedoch möglich, sodass ein Zielwert von 6-7% im Gemenge dauerhaft gehalten werden kann. Die Bestimmung des

07 : Vgl. Foundry Technologies & Engineering GmbH: Aktivbentonit

Aktivtongehalts passiert mittels Methylenblauadsorption, einer optischen Prüfmethode der Gießereitechnik. Der Beigabewert von Wasser variiert, je nach gewünschtem Zielverhalten, zwischen 2,5% - 10%. Diese Rezeptur ist in der Gießereitechnik allgemein bekannt und brachte projektspezifische Annäherungswerte, die die Forschungsarbeit eingrenzten.⁸

2.2.2. Alkalisilikat (Wasserglas)

Alkalisilikat, umgangssprachlich Wasserglas, ist ein chemisch härtendes, anorganisches Bindemittel. Stark vereinfacht kann davon gesprochen werden, dass Wasserglas gelöster Quarzsand ist. Es existieren eine Reihe verschiedener Wasserglas-Verfahren, die in Gießereien sowohl zur Herstellung von Formen als auch Kernen verwendet werden.⁹

Im Zuwendungsantrag war vorgesehen, Quarzsand mit Hilfe des sog. CO₂-Wasserglas-Verfahrens zu binden. Die Basis dieses Verfahrens bildet ein feiner Formgrundstoff (Quarzsand), der mit einer Wasserglas-Lösung vermengt, durch Vibration bzw. Rütteln verdichtet und anschließend mit Kohlendioxid (CO₂), in der Praxis häufig als Kohlensäure bezeichnet, ausgehärtet wird. Dieses Verfahren wird in Aluminium- und Eisengießereien zur Herstellung von Kernen eingesetzt.¹⁰

Aus Gründen der ökologischen Nachhaltigkeit und nach Rücksprache mit dem Industrieunternehmen „ASK Chemicals GmbH“, wurde im Forschungsprojekt auf ein anderes Wasserglas-Verfahren bzw. Produkt zurückgegriffen. Der Wasserglas-Binder mit dem Produktnamen „INOBAKE LV“ umschließt dabei die einzelnen Sandkörner und bindet unter Hinzugabe eines flüssigen Katalysators ab. Hier kann auf eine Begasung mit Kohlensäure verzichtet werden, was einen weiteren Produktionsschritt spart. Über die Wahl eines entsprechenden Katalysators kann die Vernetzungsgeschwindigkeit eingestellt und so eine rationale Produktion realisiert werden. Die Verwendung von Wasserglas als Bindesystem bedeutet eine geruchslose und emissionsarme (kein Ausgasen) Formherstellung.¹¹

2.2.3. Polyurethanharz (PU)

Bei Harzen unterscheidet man grundlegend zwischen Naturharzen und Kunstharzen. Während natürliche Harze als Sekrete in verschiedenen Bäumen gebildet werden oder tierischen Ursprungs sind (Schellack der Lackschildlaus), werden Kunstharze industriell-synthetisiert. Diese künst-

lichen und fließfähigen Polymere bilden die Grundlage für die Herstellung einer großen Zahl von duroplastischen Kunststoffen (Kunststoffe, die nach dem Aushärten nicht thermisch verformt werden können).

Ebenso wie das zuvor beschriebene Wasserglas-Verfahren, bedeutet der Einsatz von PU-Harz als Bindemittelsystem einen mehrstufigen Prozess. In der Regel wird ein Vernetzen und das damit einhergehende Aushärten des Harzes durch eine zweite Komponente, dem Härter, ausgelöst. Werden die zwei Stoffe zusammengeführt, steigt während der Härtung die Viskosität des Gemisches allmählich an und ein unschmelzbares, festes Netzwerk etabliert sich.¹² Diese enorme Stabilität und das geringe Schwindungsverhalten sind in der Gießereiindustrie und bei der Erzeugung von Gussformen von großer Bedeutung, um maßhaltige und hochwertige Gussergebnisse erzielen zu können.

Doch gemäß der Anforderung des Projektes, einen nachhaltigen Ansatz zu verfolgen, wurde als Binder für Keramiksand (Cerabeads 1700) ein 2-Komponenten-Bindemittel auf Polyurethanbasis verwendet, dass ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen wird. Zusätzlich kann das selbe Formstoffbindersystem für Quarzsand als Reststoff zum Einsatz kommen. Durch den Einsatz nachwachsender und kennzeichnungsfreier Rohstoffe wurde durch das Unternehmen „Bindur GmbH“ ein organisches Bindemittel entwickelt, das schadstofffrei und verarbeitungsfreundlich ist. Das Bindemittel mit dem Markennamen „PUROLiT“ besteht aus zwei Komponenten (Harz und Härter), dessen Reaktionsgeschwindigkeit über einen Katalysator steuerbar ist. Das Produkt ist nahezu geruchlos, emissionsarm und daher ungefährlich in der Anwendung. Neben den verarbeitungsfreundlichen Eigenschaften weist es, ebenso wie herkömmliche PU-Binder, eine hohe Stabilität auf. Die umweltfreundlichen Eigenschaften des Bindersystems qualifizieren die ausgeschleusten Quarzsande gemäß Deponieverordnung zu ungefährlichen Abfallstoffen.¹³

2.2.4. Stärke

Stärke als pflanzliches Bindemittel auf Kohlenhydratbasis ist ein Polysaccharid und damit eine organische Verbindung. Es handelt sich um einen festen, pulverförmigen, geruchslosen, weißen Stoff, der in kaltem Wasser unlöslich ist.

Unter Einwirkung von Hitze kann Stärke ein Vielfaches ihres Eigengewichts an Wasser binden, aufquellen und

08 : Vgl. Winterhalter et al. (1992), S. 33ff. 09 : Vgl. Foundry Technologies & Engineering GmbH: Wasserglas 10 : Vgl. Winterhalter et al. (1992), S. 44 + 51.

11 : Vgl. Welter (2019). 12 : Vgl. LUMITOS AG: Harz (Material) 13 : Vgl. Bindur (2019), S. 1f.

BEZEICHNUNG	HERSTELLER	BASIS	ART/KATEGORIE	VERWENDUNG
Tecgel	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Düngemittel, Klebstoff-industrie
Tigel	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Düngemittel, Klebstoff
Tigel CF	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Düngemittel, Klebstoff
Lightec	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Waschmittel, Biotechno-logie
T12	AllStarch	Weizenstärke	Kochstärke	Gipskartonherstellung
Swellstar CWS12	AllStarch	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Lebensmittelindustrie, Papierindustrie
WN1	AllStarch	Weizenstärke	Kochstärke	Lebensmittel, Papier-industrie
WMS	AllStarch	Wachsmaisstärke	Kochstärke	Lebensmittel-, Klebstoff-industrie
Emsize CMS 60	Emsland	Carboxymethylstärke	kaltquellende Stärke	Schlichtemittel, Klebstoff-industrie
Emsol K 55	Emsland	Hydroxypropylstärke	Kochstärke	Klebstoff-, Textil-, Papier-industrie
EMOX D 30 S	Emsland	oxidierte Stärke	Kochstärke	Bindemittel, Verdickungs-mittel

Abb. 13: Verwendete Stärkeprodukte

verkleistern. Ab einer Temperatur von 47–57 °C (abhängig von der jeweiligen Stärkeart) quillt Stärke zunächst auf, die Molekülketten platzen und sie verkleistert bei 55–87 °C. So entsteht Stärkekleister, der beim Abkühlen als fester Stoff erstarrt. Physikalisch modifizierte Stärken, die durch chemische Verfahren gewonnen werden, können auch ohne Hitzeeinwirkung verkleistern.

Man spricht hier auch von kaltquellender Stärke, vorverkleisterter Stärke und Quellstärke.¹⁴ Stärkeleime kommen vorrangig in der Papierherstellung und bei Anwendungen mit geringen Ansprüchen an Nassfestigkeiten zum Einsatz. In Kombination mit Tannin können stärkebasierte Bindemittel ebenso bei der Spanplattenherstellung eingesetzt werden.¹⁵

Untersucht und unterschieden wurde zwischen modifizierter Stärke (kaltquellend) aus Weizen, Mais und Wachsmaisbasis und Kochstärke auf Basis von Kartoffeln und Weizen. Insbesondere in Form von Kartoffel-, Mais- und Weizenstärke zählt Stärke dank ihrer mannigfaltigen Einsatzmöglichkeiten in der chemisch-technischen Industrie, gemeinsam mit Holz und Zucker, zu den wichtigsten nachwachsenden Rohstoffen.

Stärke nicht nur als Formstoffbinder für Holzschalungen einzusetzen, wie im Forschungsantrag vorgesehen, sondern zusätzlich auch für Quarzsand-Schalungen, hat sich im Forschungsprozess als sinnvolle Ergänzung ergeben und wurde ebenso betrachtet. Gleichzeitig wurde auf Basis von kaltquellender Stärke und Wasser ein Oberflächenversiegelungsprodukt entwickelt, dass allen Anforderungen (wie Polyurethan-Versiegelungen) genügen konnte.

Exkurs: Schimmelvermeidung

Unabhängig vom Formgrundstoff (Holzspan, Sand, Altsand), konnte im Zusammenhang mit dem Formstoffbinder Stärke eine hohe Schimmelbildung beobachtet werden. Zunächst durch die Arbeit an dem Grundstoff Holzspan aufgetreten, konnten einige potenzielle Ursachen ausgemacht werden: (1) Der in der Rezeptur, zum Verkleistern benötigte, hohe Anteil an Wasser, (2) ein schlechtes Abführen des überschüssigen Wassergehalts und (3) eine mangelhafte Trocknung führten zu Schimmelbildung. Die Schimmelbildung betraf, trotz bereits unterschiedlicher angewandeter Trocknungsverfahren, auch weiterhin die Stärke-gebundenen Holzspan- und Quarzsand-Schalungen. Chemisch vernetzende oder mit Bentonit gebundene Schalungen sind von Schimmelbefall nicht betroffen, sodass als Ursache die verwendeten Stärken eingegrenzt werden konnten. Um Schimmelbildung zu vermeiden, wurde in Versuchsreihen die Hinzugabe von vorbeugenden Additiven getestet. Getestet wurden (1) Kochsalz, (2) Citronensäure, (3) Salicylsäure und (4) Calciumpropionat. Alle vier Additive hemmen das Wachstum von Schimmel. Jedoch stellte sich heraus, dass Kochsalz und Citronensäure die Trocknung stark verzögern und große Mengen benötigt wurden. Salicylsäure und Calciumpropionat wirken schon in geringen Mengen (nur 1% auf 100% Formstoffmasse) vorbeugend gegen Schimmel. Da Salicylsäure aber stark reizend und ätzend wirkt, dagegen Calciumpropionat als Konservierungsmittel in der Lebens- und Futtermittelindustrie gängig ist, wurde Calciumpropionat vorzugsweise als schimmelhemmendes Mittel eingesetzt.

¹⁴ : Vgl. Tegge, Günther: Stärke und Stärkederivate ¹⁵ : Vgl. Dunky, Manfred; Niemz, Peter: Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren

3. VERFAHRENSPROZESSE & REZEPTUREN ZUR HERSTELLUNG VON SCHALUNGSRÖHRLINGEN

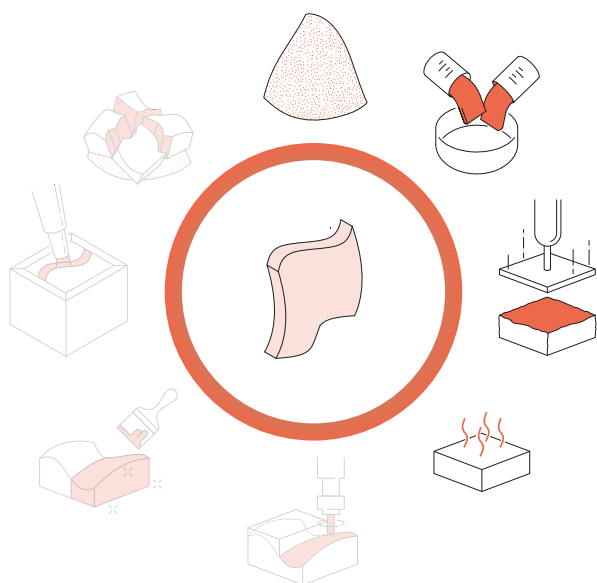


Abb. 14: Prozessdiagramm

Exkurs: Mischen, Verdichten, Trocknen

Mischen

Um ein homogenes Gemisch zu erstellen und eine gleichmäßige Verteilung aller Stoffe zu gewährleisten, werden der Formgrundstoff, Formstoffbinder und ggf. weitere Additive in einem Durchlaufmischer vermischt. Bei allen Verfahren wurden die Grundstoffe dabei zunächst trocken gemischt. Die Trockenmischdauer kann je nach Verfahren variieren. Nach Zugabe des Binders und/oder Wasser wird das Gemisch in einem weiteren Durchgang nass gemischt. Die Drehzahl des Mixers liegt dabei im Bereich von 1000-3000U/min.

Verdichten

Bei einigen der betrachteten Verfahren besteht nach dem Mischvorgang die Notwendigkeit, den resultierenden Formstoffbrei zu verdichten. Dies kann, je nach Verfahren, entweder händisch, mit einem Betonstamper oder mittels mechanischen Pressens geschehen. Der aufzuwendende Druck beim mechanischen Pressen richtet sich nach dem Formgrundstoff.

Trocknen

Trocknungsweise und Zeit sind abhängig von den jeweiligen Formstoffbindern. Es wird unterschieden zwischen:

1.) Vernetzen von Formstoffen: Die verwendeten Harze härten mittels Härter bzw. Katalysatoren durch Polymerisation aus. Dabei werden die einzelnen Sandkörner umschlossen und in einem festen Netzwerk gebunden. Zu

dieser Methode zählen die Formstoffbinder Alkalisilikat und Polyurethanharz.

2.) Lufttrocknung: Die gebundenen Formstoffe werden über einen gewissen Zeitraum offen auf einem Gitter zur Trocknung gelagert. Dabei ist die durchschnittliche Raumtemperatur, die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit und Lagerung relevant für resultierende Ergebnisse. Der Lufttrocknung unterzogen werden Formsand- und Holzspan-Schalungen.

3.) Hochfrequenz- und Mikrowellentrocknung: Mit Stärke gebundene Quarzsand-Schalungen werden technisch durch Hochfrequenz- und Mikrowellentrocknung bzw. getrocknet. Die Probe wird einem elektrischen Wechselfeld ausgesetzt und die Wassermoleküle im Gefüge werden in Schwingung versetzt. Durch die Reibung der Wassermoleküle entsteht Hitze und Wasser verdampft.

4.) Technische Trocknung: Bezeichnet die Trocknung von Materialien mit einem hohen Feuchtigkeitsanteil mithilfe technischer Geräte wie einem Trockenschrank. Durch spezifische, konstante Einstellungen, wie z.B. Temperatur, Frischluftzufuhr und Trocknungszeit, können Materialien kontrolliert entfeuchtet werden. Diese Art der Trocknung wurde sowohl bei Holzspan-Schalungen als auch bei Quarzsand-Schalungen angewendet, welche mit Stärke gebunden sind.

3.1. Formsand

Der bereits verwendete und von der Sanddeponie bezogene Formsand ist teilweise geklumpt und wird vor dem Mischen gesiebt. Der resultierende feine Sand (Korngrößen von 0,18 mm [G36] und 0,32 mm [H32]) wird mit 5% Wasserzugabe (in Abhängigkeit zur Formstoffmasse) mit einem Quirl oder Mischanlage eine Minute vermengt. Der Grünsand wird in ca. 30 mm hohe Lagen feucht gepresst, bis die für die Schalungsgeometrie relevante Höhe erreicht wurde. Dies kann händisch, mit einem Betonstamper (30 Stampfungen pro Lage) umgesetzt werden. Als Alternative bietet sich eine mechanische, maschinengestützte Verdichtung an. Die Umsetzung erfolgt ebenso in Lagen – nur wird pro Lage eine einmalige Krafteinwirkung von 26 kN angewendet.

Der noch lehmige, nasse Schalungsröhrling wird an der Luft getrocknet. Die Proben werden offen auf einem Gitter gelagert. Die durchschnittliche Raumtemperatur beträgt 24°C und die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit 45%. Ein Probewürfel (150 mm x 150 mm x 150 mm) trocknet binnen 12 Stunden und kann im Anschluss subtraktiv in Form gebracht werden.

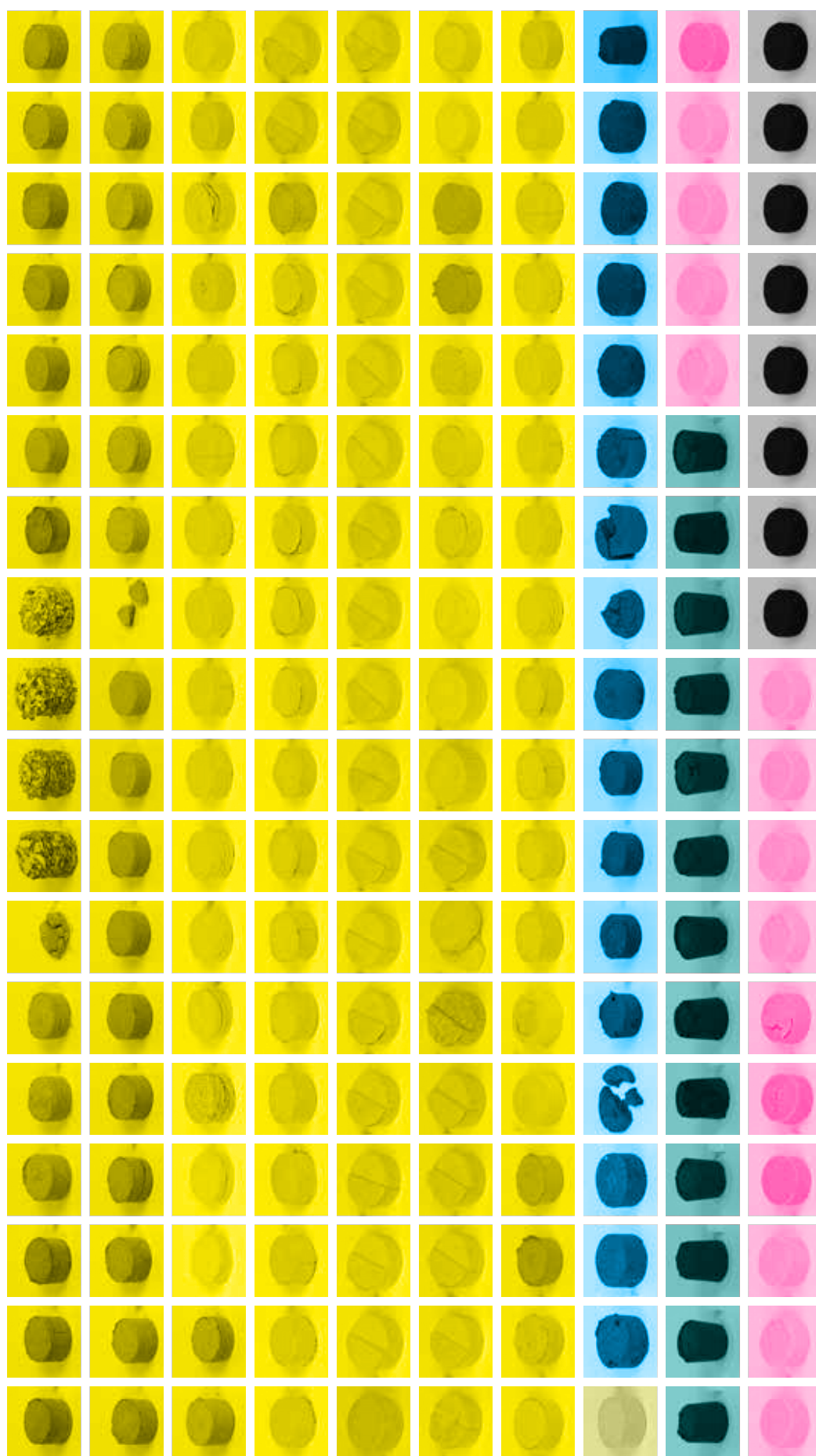


Abb. 15: Übersicht der erstellten Materialstudien in Form von Rohrproben

Die Rezeptur ist in der Gießereitechnik allgemein bekannt. Die Hinzugabe von Wasser schwankt dabei zwischen 2,5% - 10%. Die Annäherungswerte haben die Forschungsarbeiten bereits eingegrenzt.

WASSERZUGABE [%]	BEOBACHTUNG
2,5	Bindung findet statt, doch im Trockenzustand sehr porös.
5,0	Bindung findet statt. Im Trockenzustand weniger porös als die Zugabe von 2,5%.
7,5	Bindung findet statt. Kein Unterschied zu 5% Wasserzugabe zu erkennen.
10,0	Sehr sämig nach dem Mischen. Beim Stampfvorgang tritt Wasser aus. Die Mischung ist übersteuert und der Sand bindet kein Wasser mehr

Abb. 16: Rezeptur Formsand: Variierender Wasseranteil

Daraus ließ sich ableiten, dass eine Zugabe von 5% Wasser ein Optimum an Festigkeit und Bindefähigkeit bildet. Dahingehend wurde auch geprüft, ob eine weitere Zugabe von Bentonit Auswirkungen auf die o.g. Parameter hat. Durch unterschiedliche prozentuale Zugaben von Bentonit konnte allerdings kein besseres Ergebnis hinsichtlich der aufgestellten Parameter erzielt werden.

3.2. Quarzsand-Wasserglas

Da die Form- und Kernherstellung mittels Wasser-glas-Bindersystem ein in der Gießereitechnik seit langem angewandtes Verfahren ist, konnte hier das Betrachtungsfeld präzise eingegrenzt werden. Ausgangspunkt waren dabei die bewehrten Rezepturen und Vorgehensweisen, die nun für den spezifischen Anwendungsbereich eingestellt werden konnten. Folgende Grundmischung wurde definiert:

100% Quarzsand (Altsand) / 2,5% Binder / 0,5% Katalysator (100 : 2,5 : 0,5)

Die Formstoff-Herstellung beginnt zunächst mit dem Sieben des Altsands, um eventuelle Verklumpungen und anderweitige Rückstände zu entfernen. Im Anschluss wird eine gewünschte Menge des bereinigten Grundstoffs, Binders und des Katalysators abgewogen. Der Binder wird auf den Grundstoff gegeben und für 40 Sekunden mit diesem verrührt. Hierzu muss ein geeignetes Rührwerkzeug verwendet werden, denn die Verarbeitungszeit der einzelnen

Komponenten beträgt nur wenige Minuten. Das Gemisch wirkt dabei recht trocken und es muss darauf geachtet werden, dass der gesamte Sand benetzt wird. In gleicher Weise kann nun der Katalysator auf das Gemisch gegeben und untergerührt werden. Auch hier wird mit dem Rührwerkzeug für 40 Sekunden gemischt. Zügig muss der Formstoff in den entsprechenden Formkasten gegeben werden und mittels Vibration oder Aufschlagen der Form auf den Boden komprimiert und verdichtet werden. Die Oberfläche kann glatt gedrückt oder gezogen werden. Laut Hersteller kann der Formstoff nach 45 Minuten entformt und bis zur endgültigen Aushärtung gelagert werden.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Formstoff, bei behutsamem Umgang, schon nach wenigen Minuten entformt werden kann. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass eine Aushärtezeit von 20 Stunden nicht unterschritten werden sollte, da die Druckfestigkeit sprunghaft ansteigt. Die höchste Druckfestigkeit weist der Formstoff nach etwa 48 Stunden auf, bevor sie im Anschluss wieder rapide abfällt. Für die Verwendung des Formstoffs wird also ein idealer Verarbeitungszeitraum zwischen 20-48 Stunden nach der Produktion festgesetzt.

Hinsichtlich eines optimalen Mischungsverhältnisses wurde die Ausgangsrezeptur sowohl über- als auch untersteuert. Es hat sich gezeigt, dass eine Untersteuerung von Binder und Katalysator des Ausgangsrezepts (100 : 2,5 : 0,5) zu mangelhafter Bindewirkung führt und nicht empfohlen werden kann. Die Proben waren deutlich inhomogener und poröser.

Eine extreme Übersteuerung (Binder und Katalysator im selben Verhältnis) führt hingegen auch weiterhin zu brauchbaren Proben, auch wenn das Formstoffgemisch übersättigt und sehr ölig wirkt. Selbst bei einer Erhöhung der Komponenten um den Faktor 5 (100 : 12,5 : 2,5) vernetzt das Gemisch und bildet ein sehr festes Netzwerk aus. Lediglich die Ablagerung weißer Ränder an der Oberfläche lässt auf eine Übersättigung schließen.

Es stellte sich heraus, dass eine moderate Übersteuerung der Ausgangsmixtur in unserem Falle die besten Ergebnisse, hinsichtlich Mischbarkeit, Entformbarkeit, Druckfestigkeit, sowie Abbildegenauigkeit, erzielte. Daraus resultierte folgende Rezeptur:

100 % Quarzsand / 5% Binder (INOBAKE) / 1% Katalysator (100 : 5 : 1)

Mit dieser Mixtur wurde eine komplette Benetzung aller Sandpartikel mit dem Binder gewährleistet und ein festes, formstabiles Ergebnis erzielt.

WASSERGLAS [%]	BEOBACHTUNG
1,5	Befriedigender Verbund zwischen den einzelnen Sandkörnern. Formstoff ist sehr spröde und bricht bei Druck leicht.
2,5	Sehr guter Verbund zwischen den einzelnen Sandkörnern. Die Masse wirkt homogen und die Oberfläche ist gleichmäßig trocken.
5,0	Form ist feucht, aber nicht nass. Gemenge ist homogen. Druck kann ausgeübt werden.
12,5	Form ist sehr nass, auch nach Entformen. Standfestigkeit ist zunächst gegeben, bei leichtem Druck zerfällt die Form. Die Mischung ist übersättigt.

Abb. 17: Rezeptur Quarzsand-Wasserglas: Variierender Wasserglasanteil mit gleichzeitig steigendem Katalysatoranteil

3.3. Quarzsand-Stärke

Stärke nicht nur als Binder für Holzschalungen einzusetzen, wie im Forschungsantrag vorgesehen, sondern zusätzlich auch für Quarzsand-Schalungen, hat sich im Forschungsprozess als sinnvolle Ergänzung ergeben. Da für diese Materialkombination keine Rezepturen vorlagen und Recherchen keine Vergleichsprojekte aufzeigten, wurde das Bindeverhalten experimentell durch Beigaben unterschiedlicher Stärken untersucht. Als Ausgangswert dienten dabei Ergebnisse, die schon bei den bereits durchgeführten Holzspan-Stärke-Versuchen erzielt wurden.

Erprobt wurde, welche Stärke zu welchem Anteil und in Kombination mit dem Parameter Wasser, bei einem gleichbleibendem Anteil Formstoff (Sand), eine Formstoffbindung erzielt. Bezüglich der ökologischen Nachhaltigkeit wurde bei der Wahl von Stärke auf Kochstärke (native Stärke) verzichtet und dafür auf physikalisch modifizierte Stärke zurückgegriffen. Diese Stärke ist bereits vorverkleistert, kaltquellend und entfaltet ihre bindenden Eigenschaften ohne zusätzliche Wärmezufuhr.

Für die Formstoffherstellung wird zunächst eine Menge des Formgrundstoffs, also des Quarzsands gesiebt und so von allen Rückständen bereinigt. Nach dem Abwiegen und Einfüllen in ein geeignetes Rührgefäß, wird eine entsprechende Menge Stärke (Pulver) untergemischt. Im nächsten Schritt wird das Wasser dem Gemisch zugegeben und mit einem Mischer für 60 Sekunden gemischt. Dabei ergibt sich eine granulare Masse, die anschließend zum Verpressen in einen Formkasten gegeben werden kann. Das Gemisch bleibt für bis zu 30 Minuten sehr klebrig und kann, sollte in der Zwischenzeit die Oberfläche angetrock-

net sein (ohne vorherige Pressung), durch die Zugabe von weiterem Wasser, erneut aufbereitet werden. Als geeignet hat sich ein Pressdruck von 26 kN herausgestellt. Die besten Ergebnisse, hinsichtlich Materialaufwand, Materialaufbereitung und Bindewirkung, erzielte das folgende Mischungsverhältnis:

100 % Quarzsand / 10 % Stärke / 20% Wasser / 1% Calciumpropionat (100 : 10 : 20 : 1)

Während die Oberfläche binnen weniger Stunden abtrocknet, wird die Feuchtigkeit durch dieses Trocknungsverhalten im Inneren eingeschlossen. Der Feuchtigkeitseinschluss konnte in einer vierwöchigen Versuchsreihe (Lufttrocknung) verdeutlicht werden. Die Proben trockneten aber nicht nur nicht durch, sie begünstigten im starken Maße auch die Bildung von Schimmel. Um dieser Schimmelbildung entgegenzuwirken, wurde dem Formstoffbrei als weiteres Additiv, im Verhältnis 1/100, Calciumpropionat hinzugegeben. Optisch konnte der Schimmelbefall so gänzlich verhindert werden, gleichzeitig wirkte sich die Zugabe von Calciumpropionat aber negativ (verzögernd) auf die Trocknung aus. Um das Trocknungsverhalten zu verbessern bzw. ein vollständiges Trocknen überhaupt erst zu ermöglichen, wurden alternative Trocknungsverfahren untersucht. Zunächst wurden Rohrproben (d=75mm, h=75mm) anhand einer Mixtur erstellt und im Trockenschrank bei 60 °C getrocknet. Dabei wurden Proben im Abstand von 24 Stunden entnommen und geöffnet. Es konnten auch nach 7 Tagen keine überzeugenden Ergebnisse erzielt werden, sodass davon auszugehen war, dass man mit diesem Trocknungsverfahren auch künftig keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen würde. Als weitere Option wurde die Hochfrequenz-Trocknung mittels Mikrowellen betrachtet. Dabei wurde – bei gleichbleibendem Versuchsaufbau (siehe oben) – eine Leistung von 180-240 Watt zugeführt, bei einer Dauer zwischen 20-60 Minuten.

STÄRKE / WASSER [%]	BEOBACHTUNG
Stärkeanteil bei 20% Wasser 5,0	Feste, nicht klebende Probe. Feste, geschlossene Oberfläche, sehr dichter Eindruck, keine Risse
Stärkeanteil bei 20% Wasser 10,0	Sehr feste, nicht klebende Probe. Feste, geschlossene Oberfläche, sehr dichter Eindruck, keine Risse
Wassereanteil bei 5% Stärke 10,0	Der Körper ist fest verpresst, aber nicht formstabil. Probe bricht beim Entschalen entzwei, bleibt an beiden Seiten am Rohr kleben.
Wassereanteil bei 5% Stärke 20,0	Der Körper ist fest verpresst, aber nicht gänzlich formstabil.

Abb. 18: Rezeptur Quarzsand-Stärke: Variierende Stärke- und Wasseranteile

Das Ergebnis waren zunächst Proben, die durch die hohe Energieeinwirkung aufgeplatzt sind oder bei einer geringen Energiezufuhr von 180 Watt nicht durchtrocknen konnten. Es hat sich empfohlen, die Proben bei einer Leistung von 240 Watt für 60 Minuten zu bestrahlen und anschließend an einem gut belüfteten Ort abkühlen bzw. ablüften zu lassen. Für die Trocknung eines komprimierten Quarzsand-Stärke-Würfels, mit den Maßen 150 mm x 150 mm x 150 mm, wurde dieser zunächst für 180 Minuten bei einer geringen Leistung von 180 Watt bestrahlt. Anschließend wurde er für weitere 24 Stunden zum Auskühlen gestellt. Eine Verarbeitung war nach diesem Prozess möglich, jedoch war der Würfel auch dann im Inneren noch partiell feucht und klebrig. Letztlich bleibt die Trocknung großer Querschnitte und Geometrien schwierig und genaue Angaben zur Trocknungszeit sind bisher nicht möglich.

3.4. Keramiksand-Polyurethanharz

Das Mischungsverhältnis ist in der Gießereitechnik bereits erforscht und in Anwendung. Diese Mischung hat sich ebenso zur Herstellung von Schalungen etabliert:

100% Cerabeads 1700 / 2,03% „PUROLiT“-Harz / 2,02% Härter (100 : 2,03 : 2,02)

Die Harz- und Härter-Komponente werden dem Formgrundstoff zugesetzt und im Mischer hochtourig für ca. 2 Minuten gemischt. In Abhängigkeit von der gewünschten Ausschaltzeit wird dem Formstoffgemisch vor der Durchmischung ein Katalysator zugegeben. Nach dem Mischen der Mixtur beträgt die Verarbeitungszeit ca. 10 Minuten. Ein händisches Verdichten (z.B. mit einem Betonstampfer) ist möglich aber nicht zwingend erforderlich, da das Gemisch sich selbst verdichtet. Nach ca. 40 bis 60 Minuten können bereits kleinere Sandformteile vorsichtig gewendet oder entformt werden. Größere Sandformteile können frühesten nach 3 Stunden gewendet oder entformt werden. Bei komplexen Geometrien werden die Sandformen aus Sicherheitsgründen über 12 Stunden ruhen gelassen.

Exkurs Quarzsand-Polyurethanharz

Im Forschungsverlauf hat sich als zusätzliche Kombinationsmöglichkeit – mit Polyurethanharz – ein Quarzsand auf Reststoffbasis herausgestellt. Hier gilt die gleiche o.g. Rezeptur und Vorgehensweise. Vorgreifend lässt sich hier bereits erwähnen, dass im Vergleich zur Keramik gleiche Festigkeitswerte erreicht werden. Durch eine hohe Verfügbarkeit von feinen deponierten Quarzsanden ist der Zugriff nachhaltiger und es lassen sich ähnliche Oberflächenbilder erzeugen.

3.5. Holzspan-Stärke

Hinsichtlich der Bindefähigkeit wurden innerhalb der Forschungsarbeiten eine Vielzahl an Versuchen mit unterschiedlichen Arten von Holzspan und Stärke durchgeführt, um die zum Verkleben benötigte Menge an Wasser auszutariieren. Untersucht und unterschieden wurde zwischen modifizierter Stärke (kaltquellend) auf weizen-, mais-, wachsmaisbasis und Kochstärke auf Basis von Kartoffeln und Weizen (siehe Abbildung 13). Folgende Forschungsfragen galt es durch die Erstellung von mannigfachen Rezepturen und Proben näher zu untersuchen: Mischen, Verdichten, Bindefähigkeit, Standfestigkeit, Trocknung, Schimmelbildung, Rissbildung, Festigkeit, Fräsbarkeit, Oberflächengüte, Rückführbarkeit.

Es hat sich gezeigt, dass sich das folgende Standardverfahren zur Herstellung von Schalungsrohlängen eignet: Holzspan und Stärke werden im Trockenzustand verrührt; in kurzen Intervallen wird Wasser hinzugegeben, bis sich eine breiige Substanz bildet. Der feuchte Formstoffbrei wird sofort verpresst und luftgetrocknet.

STÄRKEANTEIL [%]	BEOBACHTUNG
5	beim Mischvorgang größere Klümpchenbildung, nicht ausreichend formstabil, keine ausreichende Bindefähigkeit
10	beim Mischvorgang kleinere Klümpchenbildung, homogenes Gemisch, bereits formstabiler als bei 5%
30	beim Mischvorgang geringe Klümpchenbildung, homogenes Gemisch, sehr formstabil
50	beim Mischvorgang starke Klümpchenbildung, übersteuert, inhomogenes Gemisch, Stärkekümpchen auf der Oberfläche erkennbar

Abb. 19: Rezeptur Holzspan-Stärke: Variierender Stärkeanteil bei gleichbleibendem Wasseranteil von 100%

In Versuchsreihen wurde die Rezeptur mit variierenden Anteilen von Stärke und Wasser, bezogen auf den Holzspan, hinsichtlich folgender Merkmale näher untersucht und bewertet: Abrisse am Rand der Oberfläche, Porosität, Festigkeit und Rissbildungen im Probeninneren. Der Wasseranteil variierte dabei zwischen 10% und 160%, der Stärkeanteil zwischen 5% und 50%. Daraus ergaben sich folgende Ergebnisse: Der Stärkeanteil des Gemischs steht in starker Abhängigkeit zum Anteil des Wassers und umgekehrt. Aufgrund der Abhängigkeit müssen beide Ingredienzen gemeinsam betrachtet werden.



Abb. 20: Formstoffrohling / Formsand



Abb. 21: Formstoffrohling / Quarzsand-Wasserglas



Abb. 22: Formstoffrohling / Quarzsand-Stärke



Abb. 23: Formstoffrohling / Keramiksand-Polyurethanharz



Abb. 24: Formstoffrohling / Holzspan-Stärke

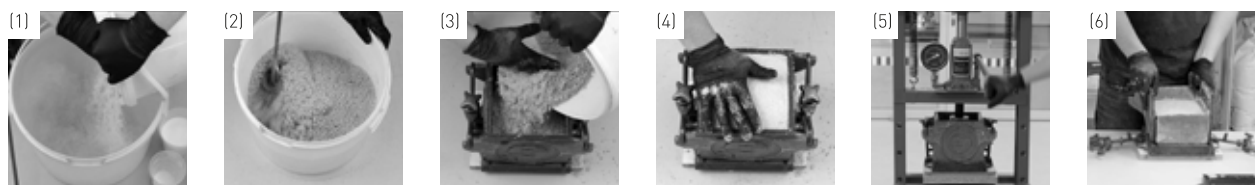


Abb. 25: Prozess zur Herstellung von Holzspan-Stärke-Rohlingen. (1) Rezeptur zusammenführen (2) Mischen (3) Einfüllen in Pressform (4) Vorverdichten (5) Pressen (6) Ausschalen

Ein zu geringer Wasseranteil, im Vergleich zur Stärke, lässt diese nicht ausreichend quellen und erzielt so keine ausreichende Bindung mit dem Holzspan. Bei einem sehr geringen Wasseranteil (ca. 5-30%) ist das Gemisch trocken und bröselig, eine angemessene Bindung des Holzspans ist nicht gegeben. Mit Erhöhung des Wasseranteils steigt gleichzeitig die Bindefähigkeit und die im Mischvorgang auftretende Klümpchenbildung kann auf ein Minimum reduziert werden. Auf die Trocknung, Schimmelbildung und Rissbildung wirkt sich ein hoher Wasseranteil negativ aus. Ein hoher, bereits gesättigter Wasseranteil im angerührten Stärke-Spangemisch, der erst zu der gewünschten Verkleisterung führt, entweicht beim Pressvorgang und gibt den Proben die gewünschte Bindung und Festigkeit. Ab einem Wasseranteil von ca. 100% entweicht Wasser beim Pressvorgang. Für das Verpressen des Breis wird eine Kraft von 25 kN benötigt. Ab dieser Krafteinwirkung stellt sich die Komprimierung des Formstoffs ein, sodass eine höhere Kraftaufwendung keine positive Auswirkung auf das Resultat des entstehenden Körpers hat (Abb.26).

Als Ergebnis der Versuchsreihen ging folgende Rezeptur als Optimum hervor:

100% Span / 30% Stärke / 140% Wasser / 2,6% Calciumpropionat

Größtenteils in Einsatz gebracht wurde der Span mit dem Produktnamen „WEHO 500“, ein Weichholz mit einer durchschnittlichen Spanlänge von 500 µm. Versuche zeigten, dass auch jeder andere getestete Span der Fir-

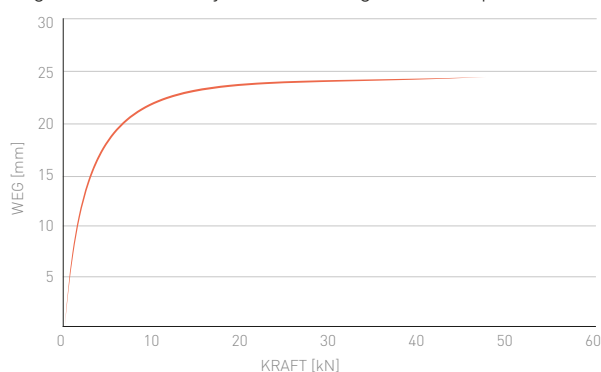


Abb. 26: Pressen von Holzspan-Stärkebrei

ma „JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG“ benutzt werden kann. Als Binder hat sich eine kaltquellende Stärke auf Weizenbasis etabliert, wie das Produkt „TECGEL“ von „Kröner Stärke GmbH“. Der Markt bietet eine Vielzahl an Stärke-Produkten, die in Versuchen alle ähnlich performten, in Bezug auf Bindungsfähigkeit und Festigkeit. Daher dient die örtliche Nähe der Produktionsstätte und der Einkaufspreis in dieser Forschungsarbeit als Auswahlkriterium. Der Preis für eine Tonne Weizenquellstärke (wie hier verwendet) liegt bei ca. 700€/t, Kartoffelquellstärke liegt bei ca. 1000€/t.

3.5.1. Trocknung

Zur näheren Betrachtung des Trocknungsverhaltens der Schalungen wurden Untersuchungen im Trockenschrank als auch an der Luft durchgeführt. Die Probekörper (Rohrprobe Ø75 mm, Höhe ca. 34 mm) wurden dabei über mehrere Tage auf einem Gitterrost gelagert und täglich gedreht, um eine gleichmäßige Luftzufuhr an alle Stellen der Proben zu gewährleisten. Das Gewicht und die Höhe aller erstellten Proben wurden unmittelbar nach dem Verpressen eingemessen. Diese Werte wurden in einem Intervall von 24 Stunden erneut geprüft und miteinander verglichen. Zur Evaluierung des Trocknungsverhalten – im Inneren – wurden Proben in dem o.g. Intervall mittig aufgesägt, quantitativ als auch qualitativ erfasst und ausgewertet.

Lufttrocknung:

Untersuchungen zur Lufttrocknung wurden bei einer Raumtemperatur von 21-23°C und einer relativen Luftfeuchte von 40-50% durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass der Prüfkörper zu Beginn und randseitig sehr schnell antrocknete (ca. 4 mm nach 48h). Im weiteren Verlauf trocknete die Probe etwas langsamer, um ca. 1 mm pro Tag. Nach 9 Tagen war die Rohrprobe (Ø75 mm; Höhe ca. 34 mm) vollständig durchgetrocknet. Das Gewicht reduzierte sich dabei in diesem Zeitraum (durch Verdunstung des hohen Wassergehalts) um bis zu 50%. Der Prüfkörper quoll im Zuge des Trocknungsprozesses auf, die Ausdehnung in der Vertikalen betrug im Durchschnitt ca. 4 mm. Horizontal blieb der Probendurchmesser unverändert (Abb. 27 + 28).



Abb. 27: Trocknungsverhalten von Holzspan-Stärke bei Lufttrocknung. Von Links: (1.) 2 Tage (2.) 3 Tage (3.) 4 Tage (4.) 5 Tage (5.) 8 Tage (6.) 10 Tage

TROCKNUNGS-DAUER [d]	EINWAAGE [g]	ENDWAAGE [g]	SCHWUND [%]	TROCKNUNG INNEN (SEITEN) [mm]	TROCKNUNG INNEN (OBEN/UNTEN) [mm]
1	127,76	98,44	22,9	4,0	4,0
2	131,06	99,00	24,5	5,0	5,0
3	129,95	93,20	28,3	6,0	8,5
4	130,24	86,20	33,8	7,5	10,0
5	129,91	81,70	37,1	8,0	12,0
6	131,81	78,70	40,3	11,0	15,0
7	132,21	75,90	42,6	12,0	17,0
8	130,19	72,29	44,5	13,0	19,0

Abb. 28: Trocknungsverhalten von Holzspan-Stärke bei Lufttrocknung

TROCKNUNGS-DAUER [d]	EINWAAGE [g]	ENDWAAGE [g]	SCHWUND [%]	TROCKNUNG INNEN (SEITEN) [mm]	TROCKNUNG INNEN (OBEN/UNTEN) [mm]
1	127,76	98,44	22,9	4	7
2	128,19	86,71	32,4	7	12
5	126,40	61,38	51,4	vollständig	vollständig

Abb. 29: Trocknungsverhalten von Holzspan-Stärke bei Trocknung im Trockenschrank (45°C)

Thermische Trocknung:

Untersuchungen wurden in einem Trockenschrank der Firma „memmert“ im Backverfahren durchgeführt. Dabei wurden die Proben bei einer konstanten Temperatur von (a) 45°C und (b) 60°C im Modus „fresh air“ gelagert.

Bei einer Temperatur von 45°C zeigte sich, dass die Proben bereits nach 5 Tagen vollständig durchgetrocknet waren. Die Gewichtsreduktion stellte sich bei ca. 50% ein (Abb. 29). Im Vergleich zur Lufttrocknung quollen die Proben mit einem Durchschnittswert von ca. 1 mm deutlich weniger auf. Bei einer Temperatur von 60°C wiesen die Proben bereits nach 24 Stunden im Schnitt einen Schwund von 35% auf (Vergleich zur Lufttrocknung: erst nach 3-4 Tagen). Die Proben waren bereits nach 48 Stunden vollständig durchgetrocknet. Aufgrund der hohen Temperatur quollen die Proben stark auf und es entstanden vermehrt Risse. Durch

einen zu hohen Feuchteanteil entstand im Probeninneren Schimmel. Zur Vermeidung von Schimmelbildung hatte sich eine geringfügige Beimengung von Additiven bewährt – z.B. Calciumpropionat (s. Exkurs: Schimmelvermeidung).

Um die bereits oben beschriebenen Probleme zur schimmelfreien Durchtrocknung zu minimieren oder eliminieren wurde nach alternativen Lösungen gesucht. Weitere Versuchsreihen sollten beim Trockenvorgang entstehende Rissbildungen minimieren und Erkenntnisse zur Rückführung der Schalungen geben. Die angewendeten Lösungen bezogen sich auf ein neues und innovatives, beschleunigtes Trocknungsverfahren (Drywoodboxx) und die Entwicklung einer abgewandelten neuen Fertigungsstrategie durch die Herstellung von dünnen und schnell lufttrocknenden Halbzeugen:

DAUER [h]	HOLZFEUCHTE U [%]			SICHTBARE DURCH- TROCKNUNG [mm]
	OBERFLÄCHE	MITTE	KERN	
0	124,2	135,6	120,9	
24	18,0	131,9	144,4	4 - 6 von Oberfläche
48	8,4	36,9	91,2	12 - 14 von Oberfläche
72	5,2	6,6	6,5	Nahezu vollständig >98%

Tabelle 30: Trocknungsverhalten von Holzspan-Stärke in Trockenkammer (Drywoodboxx)

Drywoodboxx

Zur weiteren Betrachtung und Optimierung des Trocknungsverhaltens wurden zusätzliche Rohrproben (mit dem gleichen o.g. Versuchsaufbau Ø75 mm; Höhe ca. 34 mm) in einer Trockenkammer der Firma "drywoodboxx GmbH" untersucht. Das in Fulda (nahe Kassel) ansässige Unternehmen ist spezialisiert auf energieeffiziente Trocknungsanlagen für Brennholz. Mit der Entwicklung eines innovativen Verfahrens, das die räumliche Distanz zwischen Heizregister und Trockengut aufhebt, lassen sich die bei herkömmlicher Frischluft-/Abluft-Trocknung eingesetzten Umluftventilatoren, die einen hohen Verbrauch an elektrischer Energie haben, vermeiden. So lässt sich der Energieverbrauch und damit die Energiekosten sowie die Umweltbelastung verringern. Darüber hinaus lassen sich Trocknungszeiten mit dem Verfahren merklich reduzieren, da die Wärme nicht diffus im Raum gestreut wird, sondern direkt angeleitet wird.

Abb. 31 zeigt die untersuchten Rohrproben in der technischen Trockenkammer. Eine Feuchtemessung erfolgte mittels teflonbeschichteter Elektroden, die nach 24 Stunden in jede einzelne Probe eingesteckt wurden. Abb. 32 + 33 zeigt den ermittelten Holzfeuchteverlauf an der (a) Oberfläche, in der (b) Zwischenzone sowie im (c) Kern



Abb. 31: Trocknung von Rohrproben in der Trockenkammer (drywoodboxx)

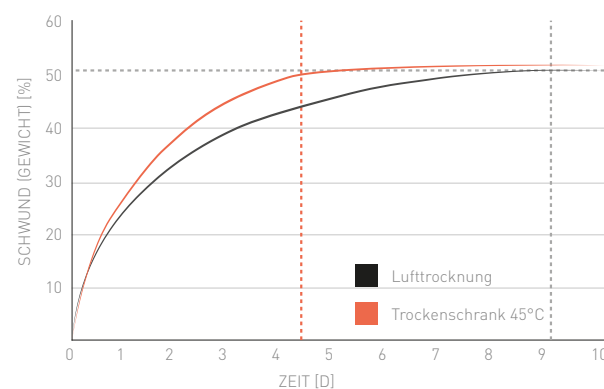


Abb. 32: Trocknungskurve von Holzspan-Stärkeschalungen

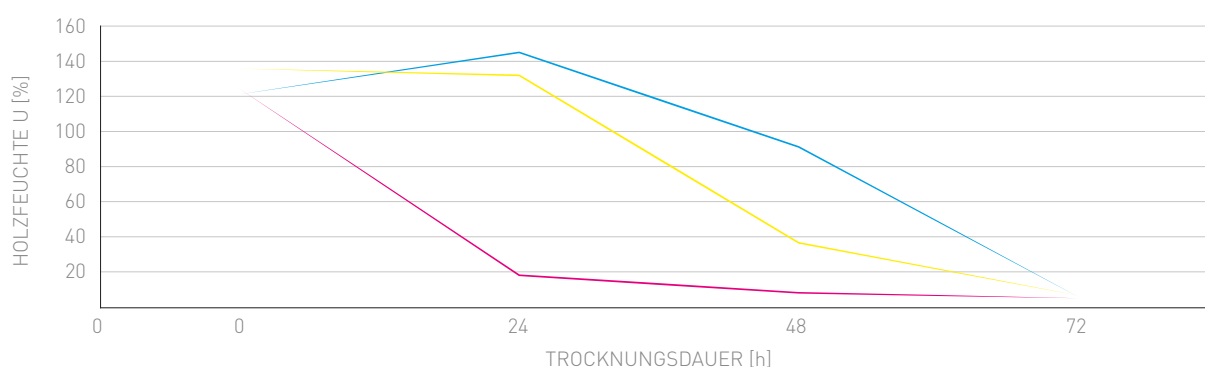


Abb. 33: Holzfeuchteverlauf (drywoodboxx)

■ Holzfeuchte Oberfläche ■ Holzfeuchte Mitte ■ Holzfeuchte Kern



Abb. 34: Trockenkammer der Firma „drywoodboxx“

über 72 Stunden. Dabei lag die Holzfeuchte (u) zu Beginn der Untersuchungen in allen drei Zonen zwischen 120 und 140%. Die Oberfläche erreichte bereits nach 24 Stunden einen Wert von unter 20%, wohingegen die Feuchte im Kern und in der Zwischenzone noch ca. 140% betrug. Die sichtbare Durchtrocknung begann an der Probenoberfläche und wanderte zwischen 4 und 6 mm in Richtung Kern. An der Oberfläche nahm der Feuchtegehalt nun deutlich langsamer ab; nach 48 Stunden lag der Wert bei ca. 8%, nach 72 Stunden bei ca. 5%. Im Kern senkte sich der Verlauf der Holzfeuchte-Kurve nach 24 Stunden nahezu linear ab und erreichte nach 72 Stunden einen Wert von 6,5%. Der Feuchtegehalt in der Zwischenzone lag nach 48 Stunden ungefähr in der Mitte; zwischen Oberfläche und Kern. Die sichtbare Durchtrocknung betrug 12-14 mm beginnend von der Oberfläche. Alle drei Bereiche wiesen nach 72 Stunden eine Holzfeuchte zwischen 5% und 6,5% auf, sodass der Trocknungsprozess nahezu vollständig (>98%) abgeschlossen war.

Resümee der angewendeten Trocknungsarten:

Eine schonende Lufttrocknung brachte sehr lange Trocknungszeiten von ca. neun Tagen mit sich. Durch eine thermische Trocknung bei 45°C im Trockenschrank ließ sich die Dauer auf fünf Tage reduzieren. Bei 60°C konnte die Trocknung sogar auf zwei Tage beschleunigt werden; allerdings quollen die Probekörper stark auf und zeigten deutlich sichtbare Rissbildungen. Eine energieeffiziente

und somit umweltschonendere als auch kostensparende Alternative bot das Verfahren von „drywoodboxx“. Die untersuchten Testkörper waren bereits nach drei Tagen vollständig durchgetrocknet und wiesen keine vermehrte Rissbildung oder Quellen auf. Untersuchungen an skalierten Testkörpern (unterschiedlicher Volumina) zeigten weiterhin, dass die Trocknungszeiten maßgeblich von der Größe bzw. dem Volumen der Schalungen abhängig sind. Ausschlaggebend für eine beschleunigte Trocknung ist dabei ein geringer Abstand zwischen Kern und Oberfläche. Auf diesem Trocknungsweg wird die Feuchtigkeit aus dem Inneren nach außen transportiert. Die Trocknungszeit lässt sich folgernd über die Materialstärke einstellen und optimieren. Je geringer die Materialstärke, umso größer die Schalungsoberfläche im Vergleich zum Volumen, woraus ein beschleunigter Transport der Feuchtigkeit aus dem Kern und damit schnellerer Trocknungsprozess resultiert.

3.5.2. Entwicklung eines Halbzeugs im Lagenprinzip

Um den zeitintensiven Trocknungsprozess von Holzspan-Stärke-Schalungen zu beschleunigen, wurde im Zuge der Forschungsarbeiten ein Konzept für aufeinander-geschichtete Lagen entwickelt. Hierfür wurden im ersten Schritt geeignete Halbzeuge mit definierter Materialstärke in einem standardisierten Fertigungsprozess hergestellt.

Die Fertigung entsprach dem Vorgehen zur Herstellung von Holzspan-Stärke-Rohlingen (siehe Kapitel 3.5.). Im zweiten Schritt wurden die einzelnen Lagen mit einem Stärkekleister verleimt und miteinander verpresst. Die Oberfläche der Halbzeuge wurde hierfür zunächst leicht angeraut und mit Wasser befeuchtet, um den Verbund der Lagen zu gewährleisten.

Abb. 41 zeigt den Querschnitt eines verleimten Spanrohlings. Deutlich zu erkennen ist die homogene Zwischenschicht, die durch das gleichmäßige Eindringen und Verteilen des Stärkekleisters resultierte. In Versuchsreihen konnte nachgewiesen werden, dass beim Fräsen der ver-

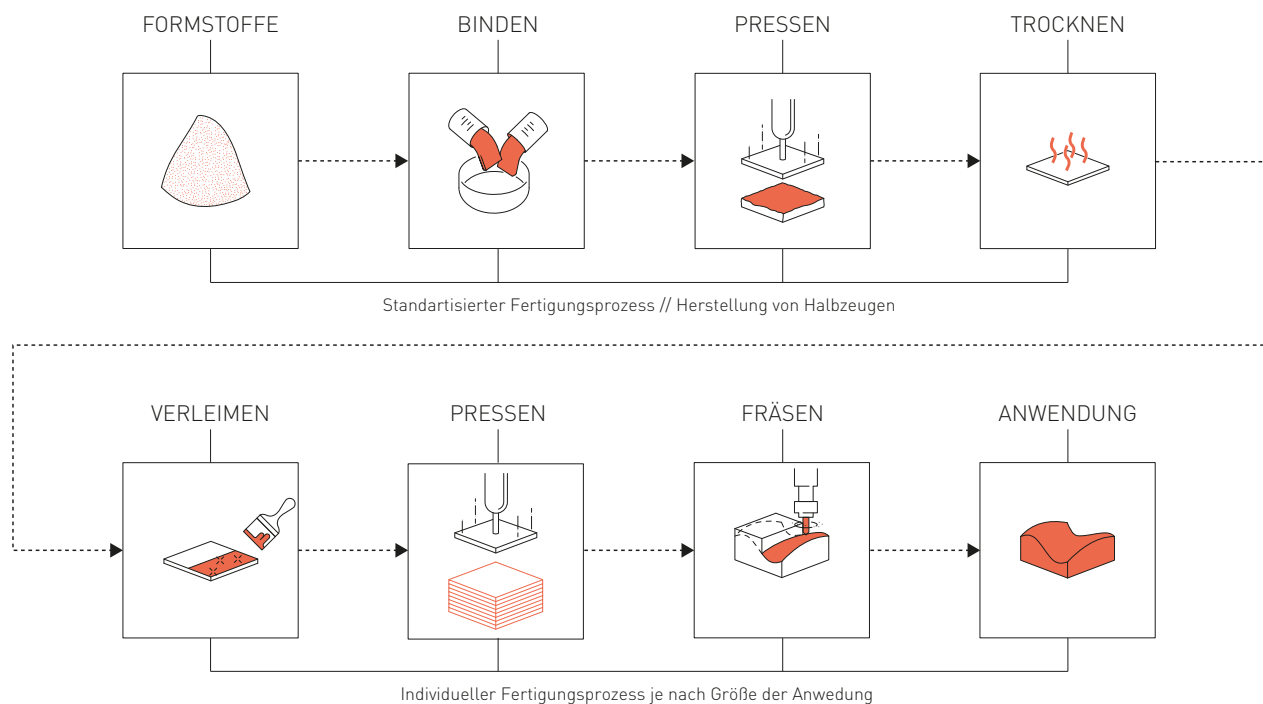


Abb. 35: Prozessstrategie Lagen

leimten Spanrohlinge keine Abrisse durch die einzelnen Schichten entstanden und die Oberflächenqualität ebenso unbeeinträchtigt blieb. Ein nicht geschichteter Würfel von 150 x 150 x 80 mm benötigt ca. 21 Tage, um durchzutrocknen. Lagen mit einer Materialstärke von 20 mm sind hingegen – aufgrund ihrer großen Oberfläche und im Vergleich zum Volumen – bereits nach ca. 3 Tagen luftgetrocknet; hieraus resultiert eine Zeitersparnis von rund 85% (Abb. 36). Folgend werden beide Verfahren gegenübergestellt und miteinander verglichen.

Vorteile:

- > Zeitersparnis der Trocknung von ca. 85% im Vergleich zu voluminösen Holzspanrohlingen
- > einfacher Herstellungsprozess dank standardisierter Fertigungsverfahren (Spanplattenindustrie)
- > beschleunigter Herstellungsprozess
- > keine Limitierung in der Höhe der Holzspanrohlinge und damit freiere Geometriewahl
- > keine weiteren Additive zur Schimmelvermeidung notwendig

Nachteile:

- > mögliche Schüsselbildung der dünnen Lagen
- > größere Lagerungsflächen nötig
- > zusätzliche Prozessschritte wie Verleimen und Pressen der einzelnen Lagen
- > reduzierte Fräsgeschwindigkeit aufgrund von Leimschichten

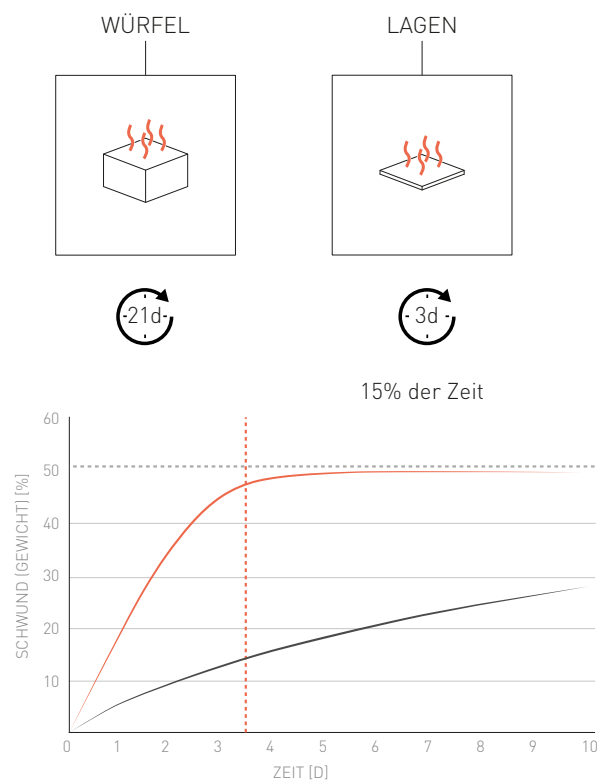


Abb. 36: Vergleich der Trocknungsdauer Würfel / Lagen bei Lufttrocknung



Abb. 37: Holzspan-Stärke-Lage (150 x 150 x 20 mm)



Abb. 38: Holzspan-Stärke-Lage (150 x 150 x 5 mm)



Abb. 39: Schichtung von Holzspan-Stärke-Lage (150 x 150 x 20 mm)



Abb. 40: Schichtung von Holzspan-Stärke-Lage (150 x 150 x 5 mm)



Abb. 41: Querschnitt verleimter Rohrprobe



Abb. 42: Fräskörper

4. SUBTRAKTIVE BEARBEITUNG VON SCHALUNGSROHLINGEN

Zur subtraktiven Bearbeitung der aus den vorherigen Schritten resultierenden Materialblöcken, wurden diese mit einer 5-Achs-CNC-Fräse zerspanend abgetragen und geformt. Das Ziel war eine feine, glatte Schalungsoberfläche zu erzeugen. Dabei sind die Ergebnisse abhängig von der Geschwindigkeit des Fräsvorgangs, des Fräswerkzeugs, Drehzahl und Vorschub. Ebenso ist die Anzahl der Fräsvorgänge (Schruppen und Schlichten) ausschlaggebend für das Oberflächenresultat. Schruppen ist eine grobe Vorbearbeitung des Formstoffes für die spätere Feinbearbeitung, das Schlichten. Auch die Wahl der Fräsmaschine ist ausschlaggebend für das Endergebnis. Portalfräsmaschinen sind durch ihre Bauform unempfindlicher gegenüber Vibrationen, was besonders beim Wunsch nach hoher Maßhaltigkeit, Oberflächengüte oder bei hoher Zerspanungsleistung eine wichtige Voraussetzung darstellt. Ebenso stellt die Wahl der anfahrbaren Achsen einen weiteren Faktor dar, möchte man komplexe Geometrien erzeugen.



Abb. 43: PKD-Kugelfräser mit 2 Schneiden

Beim Fräsen von Sandschalungen ist der Verschleiß des Zerspanungswerkzeuges (Fräser), aufgrund des aggressiv-abrasiven Sandes, sehr hoch und Werkzeuge müssen oft gewechselt werden. Ebenso müssen besondere Zerspanungswerkzeuge gefertigt werden und die Fräsdauer ist aufgrund des festen Formstoffes länger. Hier kommen in der Regel spezielle MKD-(monokristalliner Diamant) oder PKD-(polykristalliner Diamant) Fräser zum Einsatz, deren Schneiden ausgetauscht werden können, sobald sie verschlissen sind. Eine Besonderheit stellt dabei der ebenso harte Keramiksand dar: Aufgrund seiner Kugelform bedeutet seine Bearbeitung einen geringeren Werkzeugverschleiß. Hier werden die einzelnen Partikel beim Fräsen nicht gebrochen, sondern lediglich der Verbund gelöst und im Ganzen abgetragen.¹⁶

Aus den oben genannten Gründen stehen Anbieter und Modell der Fräsmaschine in Abhängigkeit zu dem zu bearbeitenden Formstoff. Das Fräsen von Sand- oder Keramikschalungen kann für reine Holzverarbeitende Betriebe eine Herausforderung darstellen, da sich der Sand (je nach Aufbau der Maschine) in Portal und Fahrtschienen

absetzen kann. Die CNC-Bearbeitung von Holzschalungen stellt dahingehend keine gesonderten Anforderungen an den Aufbau der Maschine und Werkzeuge. Für das Fräsen von Sandschalungen ist das an dem Forschungsprojekt beteiligte Unternehmen „Maus Modellbau GmbH“ verantwortlich. Das Unternehmen besitzt auf dem Gebiet des Sand-Fräsens große Expertise, da es sich auf die Herstellung von Gießereimodellen, also Sand- und Keramikformen, spezialisiert hat.



Abb. 44: Subtraktive Bearbeitung von Keramiksand „Maus Modellbau GmbH“

ZIMMERMANN FZ 32 PORTALFRÄSMASCHINE 5-ACHS			
FRÄSER	FRÄSER Ø [mm]	DREHZAHL [U/min]	VORSCHUB [m/min]
PKD-Kugelfräser 2 Schneiden	20,0	12.000	6,0

Abb. 45: Spezifikationen Sandfräsen „Maus Modellbau GmbH“

SK-CNC PORTALFRÄSMASCHINE MIT 5-ACHS KOPF HSD			
FRÄSER	FRÄSER Ø [mm]	DREHZAHL [U/min]	VORSCHUB [m/min]
VHM-Schaftfräser 2-Schneiden	8,0	11.500	3,5
VHM-Kugelfräser 2-Schneiden	12,0	11.500	5,0
VHM-Kugelfräser 2-Schneiden	8,0	11.500	6,0

Abb. 46: Spezifikationen Holzfräsen „Universität Kassel“

¹⁶ : Vgl. Maus [2019]



Abb. 47: Gefräste Quarzsand-Wasserglas-Schalung



Abb. 48: Schichten von Keramik-Schalungen



Abb. 49: Schichten von Holzspan-Stärke-Schalung



Abb. 50: Gefräste Holzspan-Stärke-Schalung



Abb. 51: Holzspan-Stärke-Schalung: erste Fräsversuche



Abb. 52: Holzspan-Stärke-Schalung: Ergebnis nach Rezeptur- und Fräsoptimierung



Abb. 53: Schruppen von Keramiksand-Schalungen „Maus Modellbau GmbH“

5. OBERFLÄCHENBEARBEITUNG UND TESTBETONAGE

	SCHLICHTE	STÄRKE	LATEX	SILIKON	VERSIEGLER
ANWENDUNGSGEBIETE	Grenz- oder Sperrschicht zwischen Sand und Metall in der Gießereitechnik (Fahrzeugindustrie, Handformguss, Spezialanwendungen)	- Lebensmittelindustrie, Papier- und Wellpappeproduktion, Textilindustrie, Klebstoffindustrie	- Herstellung von Matratzen-Kernen, LKW- und PKW-Reifen, Dichtungsprofilen, Motorlagern oder Abgussformen, Kleidungsstücken, (Einweg-)Handschuhen, Luftballons, Radiergummis	- fettfreies Schutz-, Gleit-, Trenn- und Pflegemittel für Kunststoffe, Holz, Gummi und Metalle - ausgezeichnetes Trennmittel beim Formen- und Spritzgießen	- Versiegelung von porösen Oberflächen, speziell Blockmaterialien, MDF und Kunststoff sowie Metallformen - Aufarbeitung von Polyester- oder Epoxidharz-Oberflächen
EIGENSCHAFTEN	- hohe Feuerfestigkeit - Trennwirkung - verbessert Oberflächengüte der Gussstücke - reduziert Gussfehler	- feines weißes Pulver, geruchlos und geschmacksfrei - löslich in heißem Wasser (Stärkekleber) - natürlich nachwachsender Rohstoff	- Gewinnung aus natürlich nachwachsendem Rohstoff - flexibles und druckbeständiges Material - langlebig, robust, leicht formbar, antiseptisch, wasserabweisend	- gummielastischer Zustand - wärmebeständig, hydrophob, dielektrisch - physiologisch verträglich	- einfache Anwendung - hohe Versiegelung der Oberfläche
ZUSTAND	flüssig oder pastös	in Ausgangszustand fest (Pulver), mit Wasser gemischt flüssig / pastös	flüssig bis pastös	flüssig	flüssig / pastös
BASIS	Wasser / Alkohol	Kohlenhydrat	Naturkautschuk	synthetisches Polymer	Harzlösung
AUFTRAG	Anstreichen, Spritzen, Sprühen, Fluten / Tauchen	Pinzel / Schwamm, Aufsprühen	Aufsprühen	Pinzel / Schwamm	Pinzel / Baumwolltuch

Abb. 54: Übersicht Oberflächenbehandlung

Oberflächenbearbeitung:

Alle untersuchten Schalungsmaterialien besitzen eine stark saugende Wirkung. Daher ist eine trennende bzw. versiegelnde Schicht zwischen Schalung und Beton unabdingbar, um ein Eindringen des Betons in die Schalung zu verhindern. Ein weiterer Betrachtungspunkt stellt die Trennwirkung zwischen aufgetragener Grundierung und Beton dar und die Frage, ob und - wenn ja - welches Trennmittel von Nöten ist. Der Anspruch an eine möglichst glatte und homogene Betonoberfläche, die ohne weitere Nachbehandlung auskommt, stellt große Anforderungen an die Grundierung der Schalung. Sie muss die Schalungsoberfläche einerseits vollständig versiegeln und dabei eine hohe Oberflächengüte erzeugen und darf gleichzeitig keine Reaktion mit einem Trennmittel oder dem Beton eingehen. Ebenso darf sich die Grundierung nicht negativ auf die Rückführung der Schalung auswirken. Damit verbunden sind ökologische Aspekte der eingesetzten Produkte. Insgesamt wurden zu Vergleichszwecken mehrere Versuchsreihen, sowohl mit als auch ohne Grundierung,

durchgeführt. Um die Schalungsoberflächen zu versiegeln, wurden unterschiedliche Produkte aus Wasserglas, Schlichte, Stärke, Latex, Silikon sowie spezielle Versiegelungsprodukte (Abb. 54) als Grundierung auf die Oberfläche der Fräskörper aufgetragen und im abgetrockneten Zustand hinsichtlich Versiegelungsgrad und Oberflächengüte miteinander verglichen. Je nach Grundierungstyp erfolgte der Auftrag mittels Pinzel, Schwamm, Baumwolltuch oder durch Aufsprühen. Im folgenden Unterkapitel 5.1 werden die nach Verfahren aufgelisteten Oberflächenversiegelungsstrategien in Kombination mit einem Trennmittel erläutert.

Testbetonage:

Zur Evaluierung der o.g. Anforderungen an Betonflächen wurden gefräste und oberflächenversiegelte Schalungsdemonstratoren (150 x 150 x 80 mm) mit Beton abgegossen. Ziel war es, resultierende Betonoberflächen zu betrachten und wie sich folgende Parameter auf das Ergebnis auswirken: (a) Wie reagieren Versiegelungsproduk-

te auf jeweilige Trägerformstoffe, (b) Wie reagieren diese Versiegelungsprodukte auf unterschiedliche Trennmittel, (c) Welches Gesamtergebnis ist zu erwarten bei Verwendung unterschiedlicher Betonrezepturen, (d) Ist ein Ausschalen gegeben, (e) Welche Oberflächengüten können erzielt werden. Die Betonage erfolgte im Betonlabor der Universität Kassel, des am Projekt beteiligten Fachgebiets „Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie“, welches ansässig ist im „Institut für konstruktiven Ingenieurbau“.

AUSGANGSSTOFF	VOLUMEN [dm³]	MASSE [kg]	DICHTE [kg/dm³]
Wasser	0,561	0,5606	1,00
Porenraum	0,045	-	0,00
Bindemittel			
CEM I 52,5 R-SR3 (Holcim Sulfo5R)	0,771	2,3903	3,10
Sika Silikoll P unkom- paktiert	0,230	0,5067	2,20
Zusatzmittel			
Sika ViskoCrete 2810	0,074	0,0797	1,07
Zuschlag / Zusatzstoffe			
Quarzmehl Millisil W12	0,225	0,5969	2,65
Quarzsand G32 0,125mm/0,5mm	1,093	2,8974	2,65
Summe	3,000	7,0315	

Abb. 55: M3Q-Mischung



Abb. 56: Betonage eines geformten Schalungskörpers in 150 x 150 mm Stahlschalung

Um schnelle Ergebnisse zu erzielen, wurde bei den Testbetonagen auf Bewehrung und Konterschaltung verzichtet. Hier ging es um die reine Betrachtung der Oberflächen. Um allerdings Prozesse eines industriellen Verfahrens zu simulieren – zur Herstellung von großmaßstäblichen und doppelseitig gekrümmten Betonelementen – wurde in den nächsten Skalierungssprüngen in einer vertikalen Aufrichtung mit Schalung, Bewehrung und Gegenschalung betoniert (siehe Kapitel 9.2).

Die Sand- oder Holzschalung wurde mit der bearbeiteten und bereits versiegelten Oberfläche nach oben in einen standardisierten Schalrahmen (150 x 150 x 150 mm) eingelegt, mit einem Trennmittel versehen und mit Beton ausgegossen. Als Trennmittel kamen verschiedene Schälöle und Trennwachse zum Einsatz. Die gefüllte Schalung wurde für 60 Sekunden auf einem Rütteltisch platziert und danach für 24 bis 48 Stunden zum Abbinden gelagert. Danach konnten die Proben ausgeschalt werden.

Verwendet wurde eine M3Q-Mischung; ein ultrahochfester und rheologisch steuerbarer Spezial-Beton – eine Entwicklung des kooperierenden Fachgebietes „Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie“ (Universität Kassel).

Die nachfolgenden Untersuchungen zeigen Ergebnisse zur Oberflächenversiegelung der Schalung, Oberflächengüte von Schalung und Betonabguss und dem Ausschalverhalten. Sie gliedern sich nach Oberflächenbehandlungen je nach Verfahren. Keramiksand-Schalungen sowie Holzspan-Stärke-Schalungen werden in den folgenden Kapiteln exemplarisch näher erläutert.



Abb. 57: Ausschalen Betonabguss

5.1. Oberflächenbehandlungen je nach Verfahren

Oberflächenbehandlungen:

Aus Vorstudien ließen sich aus den jeweiligen Verfahren Strategien zu Oberflächenbehandlungen ableiten, um möglichst effizient und nachhaltig auch hinsichtlich eines sortenreinen Recyclings und eines geschlossenen Materialkreislaufts (innerhalb eines Formstoffes) agieren zu können. Es wurde angestrebt, den jeweiligen Schalungs-Bindertyp als Oberflächengrundierung zu verwenden, um bei der Rückführung (durch Schreddern, Brechen, Rütteln etc.) zusätzliche Störstoffe im Schalungsformstoff zu vermeiden. Die jeweilige Oberflächenbehandlung richtet sich nach dem verwendeten Formstoffbinder eines Verfahrens wie in Abb. 58 dargestellt.

Erkenntnisse wurden nicht nach Verfahrensart, sondern nach der jeweiligen Grundierung unterteilt, da sich die Ergebnisse innerhalb der Verfahren überschneiden. Die Oberflächengüte richtete sich stark nach dem verwendeten Formstoff, die Erkenntnisse beziehen sich hier auf die Grundierungsart.

Eine gegenüberstellende Zusammenfassung von Oberflächen, Oberflächenbehandlungen und resultierenden Betonabgüssen ist folgend in Abbildung 59 zu finden.

Resümee:

Die untersuchten Grundierungen Schlichte und Wasserglas versiegelten die Oberfläche der Schalung weitestgehend. Der Einsatz von Trennwachs, in Kombination mit einer Grundierung aus Schlichte oder Wasserglas, erzielte beim Ausschalen bessere Ergebnisse als ein Schalöl. Beide Grundierungen, sowohl die Schlichte als auch das Wasserglas, sind wasserlöslich und reagierten mit dem Schalöl.

Bei einer Grundierung aus Latex hingegen, eignete sich ein Schalöl als trennende Schicht. Sowohl hinsichtlich des Ausschalverhaltens als auch im Hinblick auf die Oberflächengüte konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Lediglich eine Schlierenbildung beeinträchtigte die Oberflächenbeschaffenheit des Betons negativ. Aufgrund der hohen Viskosität bedurfte es einem Auftrag mittels Pin-

sels, welcher eine feine Struktur in der Latexgrundierung hinterließ, die sich wiederum im abgegossenen Betonelement abzeichnete. Hier wurde in weiteren Versuchsreihen der Einsatz eines sprühfähigen Latexprodukts untersucht. Eine Alternative stellte ein 2-Komponenten-Silikon dar, welches ebenso für den Einsatz erforscht wurde (siehe Kapitel 5.3). Hinsichtlich des im Forschungsprojekt verfolgten ökologischen Ansatzes bot die Grundierungsart Latex große Potenziale. Einerseits versiegelte die Latexschicht die Oberfläche der Schalung vollständig und verhinderte somit das Eindringen von Trennmittel und Beton in die Schalung. Andererseits ließ sich die Versiegelungsschicht problemlos von der Schalung entfernen. Dadurch wurde die Schalung nicht mit weiteren Fremdmitteln verunreinigt, womit eine saubere Rückführung gewährleistet wurde.

5.2. Keramiksand-Schalungen

Oberflächenbehandlungen:

Für die Oberflächenversiegelungen von Keramiksand-Schalungen wurden unterschiedliche Produkte aus Schlichte, Stärke, Latex sowie weiteren Versiegelungsprodukten eingesetzt. Als Trennmittel kamen Schalöle sowie Trennwachse zum Einsatz. Bei den Fräskörpern wurden sowohl Neusande als auch mechanische Regenerate der Keramikschalungen untersucht.

Die Resultate aus den bereits durchgeführten Vorstudien dienten als Grundlage, um effiziente und nachhaltige Strategien für die Oberflächenbehandlung von Keramiksand-Schalungen zu entwickeln. Dabei wurde insbesondere auf die Erkenntnisse der Versuchsreihe in Kapitel "5.1 Oberflächenbehandlungen je nach Verfahren" zurückgegriffen. Aus dieser resultierte bereits, dass eine Oberflächenbehandlung mit Schlichten eine Reaktion mit Schalölen zur Folge hat und sich somit hierfür lediglich Trennwachse eignen. Umgekehrt hinterließ das Trennwachs auf glänzenden, stark versiegelten Oberflächen, die beispielsweise mit Latex oder Schellack behandelt wurden, deutliche Trennmittelrückstände und beeinflussten die Oberflächengüte des Betonabgusses somit negativ. Auf diesen Oberflächen erzielten Schalöle deutlich bessere Ergebnisse. Anhand der beschriebenen Erkenntnisse wurden die

	FORMSAND / BENTONIT	QUARZSAND / WASSERGLAS	QUARZSAND / STÄRKE	KERAMIKSAND	HOLZSPAN
GRUNDIERUNG	Schlichte	Wasserglas	Stärke + Latex	ohne	Stärke + Latex
TRENNMITTEL	Wachs	Wachs	Schalöl	Wachs	Schalöl

Abb. 58: Oberflächenbehandlungen je nach Verfahren

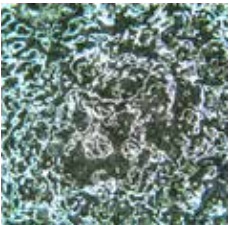
	SCHLICHTE	WASSERGLAS	STÄRKE UND LATEX	OHNE GRUNDIERUNG
ABBILDUNG				
OBERFLÄCHENVERSIEGELUNG	- Oberfläche optisch versiegelt - an wenigen Stellen bricht die Oberfläche auf und die Körnung der Schalung ist zu erkennen	- Oberfläche optisch versiegelt - an wenigen Stellen bricht die Oberfläche auf und die Körnung der Schalung ist zu erkennen	- Oberfläche optisch vollständig versiegelt - keinerlei Stellen zu erkennen, an denen Oberfläche aufgebrochen ist	- Oberfläche bleibt unversiegelt
OHNE TRENNMITTEL	- Beton reagiert mit Schlichte - starke Haftung zwischen Beton und Schalung - starke Schlichterückstände an Schalungshaut und Betonoberfläche	- Beton reagiert mit Wasserglas - starke Haftung zwischen Beton und Schalung - starke Wasserglasrückstände an Schalungshaut und Betonoberfläche	- Beton reagiert mit Latex - besonders starke Haftung zwischen Beton und Schalung - Latexschicht verbleibt an Betonoberfläche	- frischer Beton zieht unmittelbar in Schalung ein - sehr starke Haftung zwischen Beton und Schalung, nicht lösbar
TRENNMITTEL SCHALÖL	- Beton reagiert mit Schlichte - starke Haftung zwischen Beton und Schalung - Sand- und Schlichterückstände am Beton	- Beton reagiert mit Wasserglas - problemlos ausschalbar - sichtbare Wasserglasrückstände an Betonoberfläche	- keine Reaktion zwischen Beton und Schalung - problemlos ausschalbar - keinerlei Rückstände an Betonoberfläche	- Schalöl dringt ungehindert in Schalung ein - sehr starke Haftung zwischen Beton und Schalung, nicht oder nur sehr schwer lösbar
TRENNMITTEL WACHS	- keine Reaktion zwischen Beton und Schalung - problemlos ausschalbar - nur minimale Sand- und Schlichterückstände am Beton	- Beton reagiert mit Wasserglas - problemlos ausschalbar - sichtbare Wasserglasrückstände an Betonoberfläche	- keine Reaktion zwischen Beton und Schalung - problemlos ausschalbar - leichte Wachsrückstände an Betonoberfläche	- keine Reaktion zwischen Beton und Schalung - problemlos ausschalbar - leichte Wachsrückstände an Betonoberfläche
OBERFLÄCHENGÜTE ABGUSS	- leichte Schlierenbildung bedingt durch Auftrag der Schlichte	- insgesamt recht glatte Oberfläche - leichte Unebenheiten bedingt durch Auftrag des Wasserglases	- leichte Schlierenbildung bedingt durch Auftrag des Latex	- ohne Versiegelung richtet sich die Oberflächengüte ausschließlich nach dem verwendeten Formstoff
MIKROSKOPISCHE BETRACHTUNG (0,6) SCHALUNG				
MIKROSKOPISCHE BETRACHTUNG (0,6) BETON-ABGUSS				

Abb. 59: Versuchsreihen mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen

grundierten Oberflächen in dieser Versuchsreihe je nach resultierender Haptik und dem Gesamteindruck zunächst bewertet und je nach Grad der Versiegelung entweder mit Trennwachs oder Schalöl behandelt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden je nach Grundierungsart zusammengefasst.

Resümee:

Für die in dieser Versuchsreihe untersuchten Schichten wurden folgende Produkte getestet: HA Kokillenschlichte KS83, HA Eco Coat 182, Disopast 2357 C, Arkopal 6473. Bei allen mit Schlichte behandelten Fräskörpern wurde das Trennwachs Ortolan Extra 791 der Firma MC-Bauchemie eingesetzt. Die Fräskörper wirkten nach der Grundierung optisch versiegelt und wiesen eine leicht raue, matte Oberfläche auf. Alle Produkte reagierten mit dem Trennmittel und/oder Beton und machten ein Ausschalen meist unmöglich oder zeigten starke Rückstände der Schlichte auf der Betonoberfläche.

Eine Reihe der Oberflächen wurden von der Firma Maus GmbH mit folgenden Produkten behandelt: Fassadenfarbe, Fassadenfarbe + Schellack, Fassadenfarbe + SolGel C66, SolGel C66, Super Duraffix SDF-F II, Firnis II. Die Oberflächen wirkten nach der Grundierung unterschiedlich stark versiegelt und gingen ebenfalls eine Reaktion mit dem Beton ein, färbten diesen oder ließen starke Rückstände an der Betonoberfläche zurück.

Weitere Proben wurden mit einem eigens entwickelten Stärke-Wasser-Gemisch behandelt. Im Trockenzustand bildete sich eine leicht raue, matte Deckschicht. Der Betonabguss ließ sich gut ausschalen, es verblieben nur minimale Schalungsrückstände an der Betonoberfläche. Die



Abb. 60: Betonabguss Keramiksand-Schalung (Münch Versiegler Mikon 399 MC)

Oberflächengüte des Abgusses ist aufgrund ihrer Rauigkeit eher gering. Bei einer weiteren Probe wurde nach der Grundierung aus dem Stärkeleim eine zusätzliche Schicht Latex mittels Farbspritzpistole aufgetragen. Auf der leicht rauen, matten, gummierten Oberfläche bildeten sich leichte Unebenheiten. Der Beton ließ sich sehr gut von der deutlich versiegelten Schalung lösen. Dabei verblieb die Latexschicht am Beton selbst, welche sich problemlos abziehen ließ, ohne dass Rückstände an Schalung oder Beton zurückblieben. Die Oberfläche ist relativ glatt und sehr homogen. Beide Schalungen wurden vor der Betonage mit Schalöl (Ortolan Classic 712) behandelt.

Drei weitere Prüfkörper wurden mit einem Spezialversiegler der Firma Münch Chemie Versiegler Mikon 399 MC und einer Reckli PUR-Versiegelung behandelt. Die mit dem Versiegler Mikon 399 MC behandelten Oberflächen wirkten sehr glatt, glänzend und insgesamt sehr versiegelt. Als Trennmittel kam bei einer Probe ebenfalls ein Produkt der Firma Münch Chemie zur Anwendung: Trennmittel Mikon Mirror Wax liquid W-99+. Der Betonabguss des hiermit behandelten Prüfkörpers ließ sich ohne weitere Krafteinwirkung unmittelbar von der Schalung lösen. Es blieben keinerlei Rückstände an Abguss oder Schalungsoberfläche zurück. Die Probe besticht durch eine sehr hohe Oberflächengüte – ihre Oberfläche ist durchgehend glatt und sehr homogen, bildet nur sehr geringe Bläschen aus. Weiter ist die Schalungsoberfläche vollständig intakt und kann ohne weitere Oberflächenbehandlung erneut abgegossen werden. Der mit Schalöl behandelte Abguss ließ sich ebenso ohne weitere Hilfsmittel von der Schalung lösen. Die Oberfläche des Abgusses ist etwas rauer als bei der mit dem Spezialtrennmittel behandelten Probe. Die Oberfläche der PUR-Versiegelung der Firma Reckli ist hingegen rauer und matter und wirkte wesentlich weniger versiegelt. Erst nach langer Bearbeitung ließ sich der Abguss von der Schalung lösen.

Mit dem Versiegler Mikon 399 MC ließen sich mit Abstand die besten Ergebnisse hinsichtlich Trennwirkung als auch Oberflächengüte erzielen.

Ein Prüfkörper wurde zu Vergleichszwecken ohne jegliche Versiegelung, ausschließlich mit Trennwachs behandelt und abgegossen. Das Trennwachs zog unmittelbar in die Schalung ein und der Betonabguss ließ sich nicht ausschalen.

STÄRKE + LATEX / SCHALÖL	VERSIEGLER MIKON 399 / MIRROR WAX LIQUID	FASSADENFARBE / TRENNWACHS	FASSADENFARBE + SOLGEL / SCHALÖL	FASSADENFARBE + SCHELLACK / SCHALÖL
SCHALUNG INKL. VERSIEGELUNG // VOR BETONAGE				
				
- optisch sehr versiegelt - leicht raue, matte, gummierte Oberfläche - leichte Unebenheiten (Pickel) zu erkennen	- Oberfläche sehr glatt, glänzend - insgesamt sehr versiegelt	- sehr glatte, matte Oberfläche - wirkt sehr versiegelt	- sehr glatte, glänzende Oberfläche - starke Risse zu erkennen - ansonsten versiegelt	- sehr glatte, glänzende Oberfläche - optisch sehr versiegelt
SCHALUNG INKL. VERSIEGELUNG // NACH BETONAGE				
				
- Latexschicht verbleibt am Beton selbst, lässt sich problemlos abziehen - keinerlei Betonrückstände an der Schalungsoberfläche	- Schalungsoberfläche vollständig intakt - kann ohne weitere Oberflächenbehandlung erneut abgegossen werden	- keinerlei Betonrückstände - Schalungsoberfläche nicht vollständig intakt, leichte Abrisse durch Entschalen	- keinerlei Betonrückstände - Schalungsoberfläche intakt, allerdings unregelmäßige Rückstände der Fassadenfarbe	- keinerlei Betonrückstände an der Schalungsoberfläche - Schalungsoberfläche intakt, allerdings inhomogen aufgrund von Ablösungen
BETONABGUSS				
				
- Beton lässt sich sehr gut von der Schalung lösen - Oberfläche ist relativ glatt und sehr homogen - eine leichte Bläschenbildung ist zu erkennen	- Betonabguss lässt sich ohne jegliche Hilfsmittel oder weitere Krafteinwirkung unmittelbar lösen - keinerlei Rückstände - sehr hohe Oberflächengüte; durchgehend glatt und sehr homogen - fast keine Bläschenbildung, leicht hellere Färbung durch wasserbasiertes Trennmittel	- zunächst nicht lösbar, erst nach sehr langer Bearbeitung möglich - starke Rückstände der Fassadenfarbe auf der gesamten Betonoberfläche - aufgrund der Rückstände eher schlechte Oberflächengüte, restliche Oberfläche homogen, sehr glatt, keine Bläschenbildung	- erst nach aufwendiger Nachbearbeitung lösbar - starke Rückstände der Fassadenfarbe auf der gesamten Betonoberfläche - aufgrund der Rückstände eher schlechte Oberflächengüte, restliche Oberfläche homogen, sehr glatt, kaum Bläschenbildung - Risse der Fassadenfarbe im Beton abgedrückt	- mit leichter Hilfe von Gummihammer und Spachtel lösbar - Schellackschicht reagiert stark mit dem Beton, sodass großflächige Rückstände von Schellack und teils Fassadenfarbe an der Betonoberfläche verbleiben

Abb. 61: Versuchsreihen mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen für Keramiksand-Schalungen / Teil 1

SCHLICHTE / TRENNWACHS	SUPER DURRAFIX / TRENNWACHS	VERSIEGLER MIKON 399 / SCHALÖL	RECKLI PUR / TRENNWACHS	STÄRKE / SCHALÖL
SCHALUNG INKL. VERSIEGELUNG // VOR BETONAGE				
				
- optisch sehr versiegelt - leicht raue, matte, gummierte Oberfläche - leichte Unebenheiten (Pickel) zu erkennen	- leicht raue, matte Oberfläche - wirkt weniger versiegelt, stellenweise fleckig	- Oberfläche wirkt sehr glatt, glänzend und insgesamt sehr versiegelt	- leicht raue, matte Oberfläche - keine deutlich sichtbare Deckschicht zu erkennen	- deutlich sichtbare Deckschicht durch Stärke - Oberfläche leicht rau, matt und etwas klebrig
SCHALUNG INKL. VERSIEGELUNG // NACH BETONAGE				
				
- Latexschicht verbleibt am Beton selbst, lässt sich problemlos abziehen - keinerlei Betonrückstände an der Schalungsoberfläche	- keinerlei Betonrückstände an der Schalungsoberfläche - Schalungsoberfläche intakt, an den Seiten leichte Abrisse durch Entschalen	- Schalungsoberfläche vollständig intakt - kann ohne weitere Oberflächenbehandlung erneut abgegossen werden	- Trennwachs zieht bei Auftrag in Oberfläche ein - Schalungsoberfläche intakt - keine sichtbaren Rückstände erkennbar	- Oberfläche leicht fleckig bei Auftrag des Schalöls - Schalungsoberfläche intakt - keine sichtbaren Rückstände erkennbar
BETONABGUSS				
				
- Beton lässt sich sehr gut von der Schalung lösen - starke Rückstände der Schlichte auf der gesamten Betonoberfläche - aufgrund der Rückstände eher schlechte Oberflächengüte - Oberfläche sonst relativ glatt und sehr homogen - leichte Bläschenbildung zu erkennen	- zunächst nicht lösbar, erst nach sehr langer Nachbehandlung aus-schalbar - keinerlei Schalungs- oder Trennmittelrückstände an der Betonoberfläche - mittlere Oberflächengüte, Oberfläche relativ glatt, relativ hohe Bläschenbildung	- Abguss lässt sich ohne weitere Hilfsmittel von der Schalung lösen - Oberfläche des Abgusses ist etwas rauer als bei der mit Mirror Wax liquid W-99+ behandelten Probe - weist deutlich sichtbare Bläschen auf - Oberfläche verfärbt sich etwas heller, jedoch weniger stark	- erst nach langer Bearbeitung mit dem Spachtel lässt sich der Abguss von der Schalung lösen - es verbleiben keinerlei Rückstände - mittlere Oberflächengüte, Oberfläche leicht rau, matt	- Beton lässt sich gut aus-schalen - es verbleiben nur ganz minimale Schalungsrückstände an der Betonoberfläche - mittlere Oberflächengüte, Oberfläche leicht rau - starke Bläschenbildung zu erkennen

Abb. 62: Versuchsreihen mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen für Keramiksand-Schalungen / Teil 2

5.3. Holzspan-Stärke-Schalungen

Oberflächenbehandlung:

Als Strategie für die Oberflächenversiegelung von Holzspan-Stärke-Schalungen wurde auf Grundlage bereits beschriebener Untersuchungen eine Kombination aus Stärke und Latex entwickelt. Um ein Eindringen des Latex in die Holzspan-Stärke-Schalung zu verhindern, wurde diese zunächst mit mehreren Stärke-Schichten grundiert. Für die Grundierung wurde ein Stärkekleister bestehend aus Stärke und Wasser angemischt. Hierfür hat sich in einer Reihe von Untersuchungen eine Rezeptur von 15% Stärke bei 100% Wasser als optimales Mischungsverhältnis hinsichtlich Homogenität, geringer Klümpchenbildung, Auftragsverhalten sowie Versiegelung erwiesen. Der Stärkeleim wurde mittels Pinsel auf die Schalungsoberfläche aufgetragen und ca. 40-50min angetrocknet. Insgesamt wurden drei Schichten der Stärke-Grundierung aufgetragen. Um die Oberflächenqualität der Schalung und somit auch die des Betonabgusses zu steigern, erfolgte nach jeder Schicht ein Zwischenschliff, zunächst mit einem Schleifpapier (Körnung von 120 im ersten Schritt, 180 im zweiten Schritt) und am Ende mit einem Schleifvlies. Es resultierte eine versiegelte, homogenere Oberfläche mit deutlich weniger Unebenheiten, auf der entweder unmittelbar betoniert oder eine weitere Schicht aus Latex oder Silikon aufgetragen werden kann.

Aus ersten Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass ein Auftrag von Latex mittels Schwamm oder Pinsel deutliche Schlieren auf der Oberfläche bildet, die sich im Beton abdrücken. Diese ließen sich durch den Einsatz einer Farbspritzpistole mit Fließbecher verhindern. Bei einer Druckluft von ca. 3bar wurden insgesamt fünf Schichten in einem Abstand von ca. 30cm gleichmäßig aufgesprüht. Jede Schicht trocknete ca. 20min an. Beim Auftrag bildeten sich leichte Bläschen aus, die sich während der Trocknung auflösten. Die resultierende Oberfläche war deutlich sichtbar und spürbar versiegelt, wies allerdings trotz eines optimierten Auftrags leichte Unebenheiten auf. Aufgrund dessen wurde Silikon als mögliche Versiegelungsschicht in weiteren Untersuchungen getestet. Auch hier kam eine Grundierung aus Stärke zum Einsatz. Der Auftrag gestaltete sich deutlich leichter als bei der zuvor beschriebenen Latex-Versiegelung, da keine Schlieren durch die Verwendung von Schwamm oder Pinsel entstanden. Aufgrund seiner Viskosität verteilte sich das Silikon homogen auf der Oberfläche und trocknete innerhalb von 40min an. Es bildete sich eine starke, leicht glänzende Versiegelungsschicht mit deutlich weniger Unebenheiten als bei der Verwendung von Latex. Die Silikonschicht ließ sich ebenso mühelos von der Schalung abziehen.

Resümee:

Hinsichtlich des Ausschalverhaltens konnten bei beiden o.g. Versiegelungs-Varianten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Die Betonabgüsse ließen sich von der Schalhaut entfernen und es verblieben keine Beton- oder Schalungsrückstände an der Kontaktfläche. Die Betonoberfläche des mit Latex behandelten Schalungskörpers ist grobporiger und weist eine deutlich stärkere Bildung von Lunkern auf als bei der Silikonbeschichtung (Abb. 69). Sie ist dennoch homogen und lässt sich - verglichen mit den restlichen Abgüssen - als mittlere Oberflächengüte (Sichtbetonklasse (SB) 3 – 4 / Siehe Kapitel 6) einstufen. Die außerordentlich glatte, leicht reflektierende Silikonschicht drückt sich unmittelbar auch in der Oberfläche des Betonabgusses ab (Abb. 68). Diese ist durchgehend gleichmäßig und zeigt keinerlei Lunker oder Unebenheiten. Aufgrund der o.g. Eigenschaften des Silikons reflektiert die Oberfläche des Betons ebenso leicht.

Im direkten Vergleich überzeugt die Silikonversiegelung aufgrund ihrer höheren Oberflächengüte, geringerer Lunker im Beton sowie einfacher Anwendung gegenüber der Latexschicht. Ob der resultierende Betonabguss über eine glänzende oder eine matte Oberfläche verfügt, ist vom Glanzgrad des Silikons abhängig.



Abb. 63: Versiegelung mit Latex



Abb. 64: Stärkeversiegelung



Abb. 65: Latexversiegelung



Abb. 66: Ausschalen Betonabguss / Latex Versiegelung



Abb. 67: Ausschalen Betonabguss / Latex Versiegelung im Detail



Abb. 68: Betonabguss und Schalung mit Silikon Versiegelung



Abb. 69: Vergleich von Betonabgüssen. Links: Silikon-Beschichtung, Rechts: Latex-Beschichtung

6. PRÜFVERFAHREN

Die aus den vorgeschalteten Experimenten resultierenden Schalungen und Betonabgüsse wurden sowohl in Zusammenarbeit mit dem Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen als auch der Gießereitechnik der Universität Kassel geprüft, analysiert und ausgewertet, um quantifizierbare und vergleichbare Kennwerte zu generieren. Die Untersuchungen sahen sowohl Prüfungen zur Druckfestigkeit der unterschiedlichen Schalungen vor als auch die Bestimmung von Oberflächenrauigkeiten und Abgleiche zwischen den reellen, Prüfkörpern und digitalen 3D-Modellen zur Definition der Gesamtpräzision.

6.1. Druckfestigkeit von Schalungen

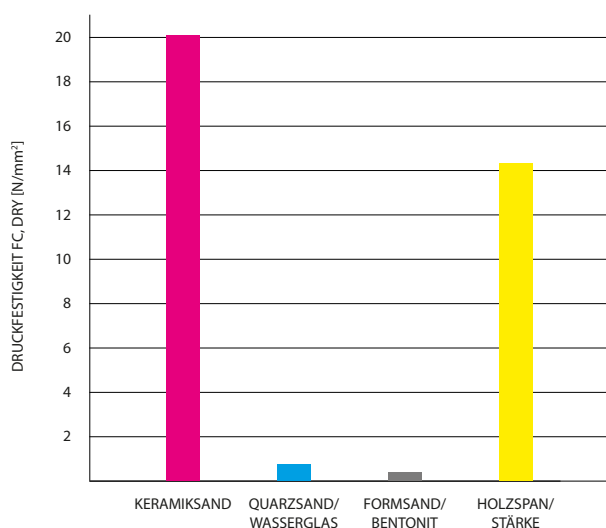


Abb. 70: Vergleich Druckfestigkeiten

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit der einzelnen Schalungen wurden die Prüfkörper einer Prüfung nach DIN/EN 1354 (05-2005) unterzogen.

Die Druckfestigkeit wurde anhand einer Rohrprobe ($\varnothing$ 70 mm, h = 70 mm) gemessen. Aufgrund der Streuung von Messwerten wurden je fünf Prüfkörper der Analyse unterzogen. Der durchschnittliche Festigkeitswert der Stich-

probe wird in nachstehender Abbildung 71 durch einen Mittelwert angegeben. Keramiksand-Schalungen weisen mit einer Druckfestigkeit von 20,1 N/mm² die höchste Standfestigkeit auf, gefolgt von Holzspan-Schalungen mit einer Druckfestigkeit von 14,31 N/mm². Diese Werte bilden einen klaren Abstand zu Quarzsand-Schalungen (mit Stärke gebunden: 1,95 N/mm²; mit Alkalisilikat: 0,74 N/mm²). Am Druckempfindlichsten erwiesen sich Formsand-Schalungen (0,40 N/mm²).

6.2. Bewertung von Oberflächen

EXKURS Sichtbetonoberflächen

Das von dem Deutschen Beton- und Bautechnik Verein (DBV) und Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) erstellte „Sichtbeton-Merkblatt“ unterteilt Sichtflächen in vier Sichtbetonklassen und entsprechende Anforderungen an die jeweilige Sichtbetonoberfläche. Zu jeder Sichtbetonklasse werden Ausführungsbedingungen und Einzelkriterien zur Ergebnisbeurteilung wie folgt laut DBV/VDZ formuliert:

Sichtbetonklasse SB1 gilt für „Betonflächen mit geringen gestalterischen Anforderungen“. Bauteile bzw. Bereiche z. B.: Kellerwände oder Bereiche mit vorwiegend gewerblicher Nutzung

Sichtbetonklasse SB2 gilt für „Betonflächen mit normalen gestalterischen Anforderungen“. Bauteile bzw. Bereiche z. B.: Treppenhäuseräume und Stützwände

Sichtbetonklasse SB3 gilt für „Betonflächen mit hohen gestalterischen Anforderungen“. Bauteile bzw. Bereiche z. B.: Fassaden

Sichtbetonklasse SB4 gilt für „Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung“. Bauteile bzw. Bereiche z. B.: repräsentative Bauteile im Hochbau

Das Merkblatt dient zum Verweis auf wesentliche Regelwerke und der Kommunikation aller an einer Bauaufgabe

	FORMSAND / BENTONIT	QUARZSAND / WASSERGLAS	QUARZSAND / STÄRKE	KERAMIKSAND	HOLZSPAN
Masse [g]	448,6	369,9	395,0	455,9	147,4
Rohdichte [kg/m³]	1534	1485	1427	1622	481
Festigkeit $f_{c, dry}$ [N/mm²]	0,40	0,74	1,95	20,1	14,31

Abb. 71: Prüfung Druckfestigkeit nach DIN/EN 1354 (05-2005) in Rohrprobe ($\varnothing$ 70mm, h =70mm)

Beteiligten durch Systematisierung und Klassifizierung der unterschiedlichen Anforderungen an den Sichtbeton. Eine theoretische Betrachtung kommt bereits ab SB2 stark an seine Grenzen, wenn es dezidiert um Gestaltung geht. In diesem Zusammenhang spielen persönliche ästhetische Empfindungen – unterschiedlicher am Bau Beteiligten – eine große Rolle.

In der Praxis muss zunächst eine klare Leistungsbeschreibung erfolgen, die bildgebende Parameter für die Sichtbetonoberfläche festhalten, wie z.B.:

1.) Die Schalhaut ist von entscheidendem Einfluss auf das Aussehen der Betonoberflächen und in saugende oder nicht saugende Elemente zu kategorisieren als auch in glatte oder bildgebende Trägerflächen.

2.) Die Wahl des Zementes entscheidet nicht nur über Festigkeitswerte, sondern auch über die Farbgebung. So kommen Portlandkalksteinzemente für hellere oder Portlandschieferzement für dunkle Oberflächen zum Einsatz. Für sehr helle Färbungen werden Weißzemente verwendet und für gezielte Farbgebungen, außerhalb der Naturtöne, Pigmente als Additive hinzugegeben.

3.) Bearbeitung von Oberflächen wie Waschen, Säuern, Strahlen. Oder nachgelagerte Arbeiten wie: Stocken, Spitzen, Scharrieren, Polieren etc.

4.) Geometrien und dessen Abmessungen haben Auswirkung auf die Wahl der Bewehrung, Zuschläge und Trennmittel, die ebenso zur Gestaltung der Sichtbetonflächen beitragen.

5.) Die Herstellung im Fertigteilwerk bietet gute Voraussetzungen für eine gleichmäßige und besonders hohe Qualität der Oberfläche (Witterungsunabhängigkeit, gleichbleibende Herstellungsbedingungen, ortsfeste Lage der Schalung, konstantes und routiniertes Personal).

Bereits ab Sichtbetonklasse SB 2 wird im Merkblatt Sichtbeton das Anlegen einer oder mehrerer Erprobungsflächen empfohlen. Diese dienen dazu:

- > die unter den tatsächlichen Randbedingungen der Baustelle herstellbare Qualität festzustellen
- > das technische Vorgehen zu entwickeln oder abzusichern
- > den erforderlichen Aufwand festzulegen und zu optimieren,
- > das Personal einzuweisen

6.2.1. Bewertung von Schalungsoberflächen

Zur Charakterisierung von Schalungsoberflächen kamen mikrostrukturelle Untersuchung via (a) elektronischem Stereomikroskop und (b) Streifenlichtphotometrie zum Einsatz.

(a) Stereomikroskope Untersuchung von Oberflächen

Ein elektronisches Stereomikroskop ist ein spezifisches Lichtmikroskop. Es stehen für beide Augen ein getrennter Strahlengang (geometrischer Verlauf von Lichtstrahlen durch optische Geräte) zur Verfügung. Beide Augen sehen das Präparat daher aus leicht unterschiedlichen Winkeln, so dass ein „Stereo-Effekt“, also ein räumlicher Bildeindruck eintritt. Das Vorgehen ermöglicht eine bildliche Betrachtung von Oberflächen in unterschiedlichen Vergrößerungsschritten. Betrachtet wurden (a) Oberflächen von rohen Formstoffen, (b) Oberflächen von gebundenen und gefrästen Formstoffen, (c) Stichpunktartig auch Oberflächen von gefrästen, oberflächenbehandelten Schalungen. Es wurde eine 0,6 bis 6,6-fache Vergrößerung durchgeführt und diese bildlich festgehalten. Das Verfahren diente einem qualitativen als auch quantitativen optischen Vergleich von Schalungsoberflächen (siehe Abb. 72), die kohärente Rückschlüsse und Bewertungen zu Betonabgüssen liefern konnten.

(b) Ermittlung von Rauheitswerten via Streifenlichtphotometrie

Zur Charakterisierung von Oberflächen können neben makroskopischen Untersuchungen – durch augenscheinliche Betrachtung – auch Oberflächenparameter berechnet werden mit Hilfe eines Streifenlichtphotometers. Bei dieser Methode und zur Ermittlung von Rauheitsstrukturen auf Oberflächen, werden Streifenmuster auf eine Prüffläche projiziert und über deren Verformung – im Vergleich zu einem Referenzmuster – ein Höhenprofil errechnet. Aus dem erstellten und ungefilterten Primärprofil (P-Profil) wird das Rauheitsprofil (R-Profil) berechnet (DIN EN ISO 11562). Zur weiteren Beschreibung der Oberfläche werden aus dem R-Profil die Rauheitskenngrößen R_z (größte Höhendifferenz im Profil), R_a (arithmetischer Mittelwert der Höhe) und R_q (quadratischer Mittelwert der Höhe) nach DIN EN ISO 4287 errechnet. Im Folgenden wurden Flächen- als auch Linienberechnungen durchgeführt. Zudem ist hier zu erwähnen, dass die Berechnung von Flächenparametern noch nicht standardisiert ist und daher eine Annäherung an das Verfahren zur Linienrauheit erfolgte [GF Messtechnik GmbH: Handbuch, Optisches 3D-Messgerät, Software ODSCAD 6.0. Berlin, 2008].

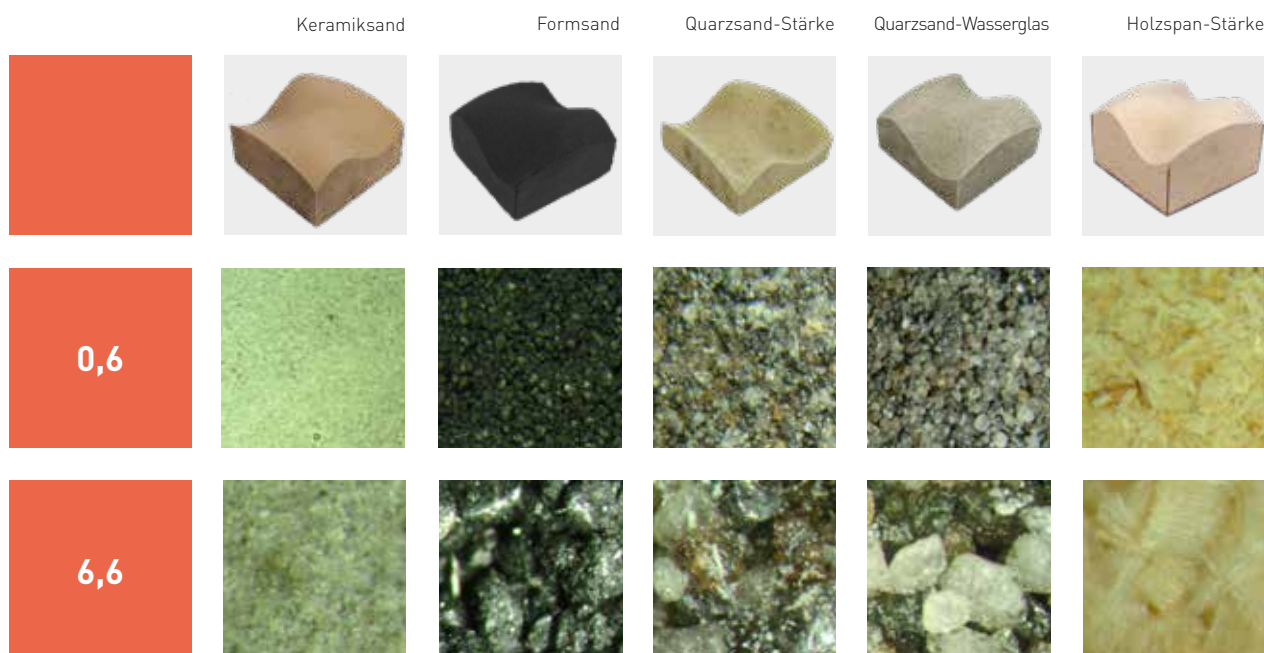


Abb. 72: Gefräste Formstoffe und Vergrößerung der Oberflächen (0,6-fach und 6,6-fach)

Aus dem Prüfverfahren wurden Mikrorauheitswerte generiert, die die Oberflächengüten der Schalungen auch quantitativ beschreiben konnten. Die Prüfung der Rauheitswerte erfolgte an fünf Proben (zur Berechnung eines Mittelwertes) und wurde an bereits subtraktiv bearbeiteten Schalungsdemonstratoren unternommen. Messungen erfolgten an je zwei Stellen mit drei verschiedenen Auflösungen:

Auflösung 1: 50,4 x 38,4 mm

Auflösung 2: 30,0 x 22,8 mm

Auflösung 3: 14,9 x 11,4 mm

Die Abbildungen 74 bis 79 beziehen sich jeweils auf Messungen mit „Auflösung 1“ (50,4 x 38,4 mm). Es wurde ein (a) Flächenmessverfahren und ein (b) Linienmessverfahren angewendet. Die ermittelten Werte unterscheiden sich daher auf Grundlage der gemessenen Flächen- bzw. Linienberechnungen. Im Folgenden wurden die Parameter definiert: Die Rauheitskenngrößen der Oberflächentextur S_a/R_a und S_q/R_q sind standardisierte Parameter zur Angabe der Oberflächenrauigkeit und bilden jeweils unterschiedliche Mittelwerte der Profilabweichungen.

In Abbildung 73 sind beispielsweise diese Parameter bezogen auf eine Linienauswertung dargestellt. Daher werden in dieser Abbildung die Parameter mit dem Buchstaben R gekennzeichnet.

In Abbildung 74 sind die Untersuchungsstellen als Höhenprofil für Probe 1 und 2 in der Auflösung 1 (50,4 x 38,4 mm) abgebildet. Für die Linien- und Flächenuntersuchungen wurden die Daten mit einem sog. Fourier-Filter geglättet. Damit wurde die Welligkeit entfernt, sodass die Oberflächentextur untersucht werden konnte.

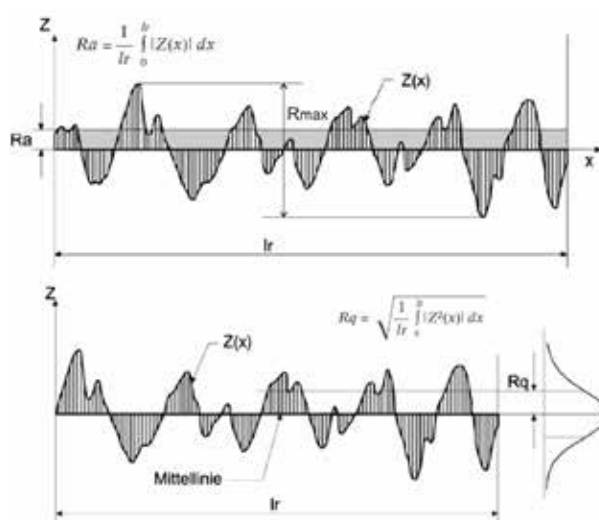


Abb. 73: Rauheitskenngrößen der Oberflächentextur nach DIN EN ISO 4287: 2010 [1] bezogen auf eine Linienauswertung (nach 2).

In Abbildung 79 sind zunächst die Ergebnisse der Linien- und Flächenuntersuchungen zusammengefasst und in Abb. 75 bis 78 die Liniendiagramme der untersuchten Probekörper aufgeführt.

Die Resultate zeigten die feinste Oberflächengüte mit dem Faktor $R_a = 9,1\mu\text{m}$ bei Keramiksand-Schalungen. Mit einer Linienrauheit von $9,8\mu\text{m}$ erzielten Holzspan-Stärke-Schalungen ebenso sehr gute Ergebnisse. Formsand-Schalungen lagen bei den Untersuchungen mit einem Wert von $R_a = 23,8\mu\text{m}$ im mittleren Bereich. Die meisten Unebenheiten und Abrisse wiesen Quarzsand-Schalungen auf, mit einem Rauheitswert von $R_a = 61,4\mu\text{m}$ (wasserglasgebunden) bzw. $R_a = 65,3\mu\text{m}$ (stärkegebunden).

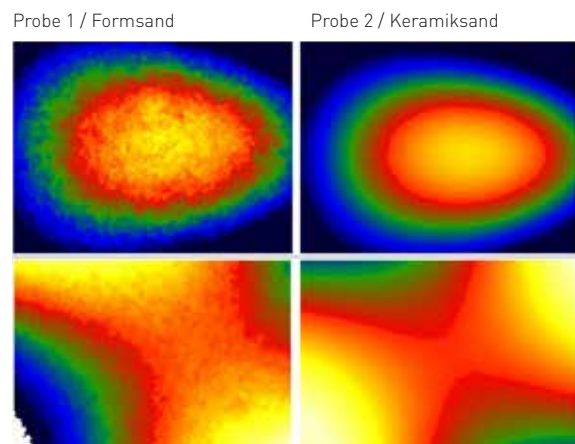


Abb. 74: Höhenprofil. Auflösung 1 (50,4 x 38,4 mm)

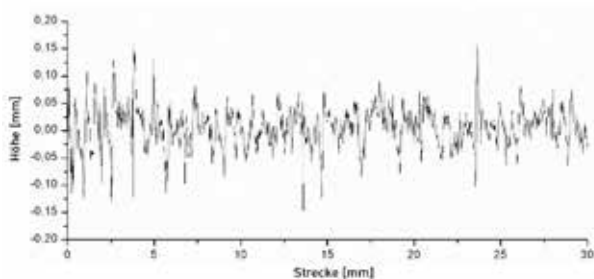


Abb. 75: Rauigkeitsmessung Formsand-Schalungen

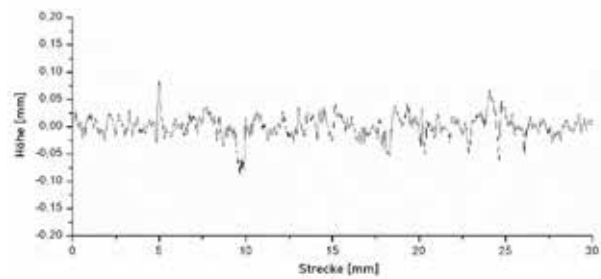


Abb. 76: Rauigkeitsmessung Holzspan-Stärke-Schalungen

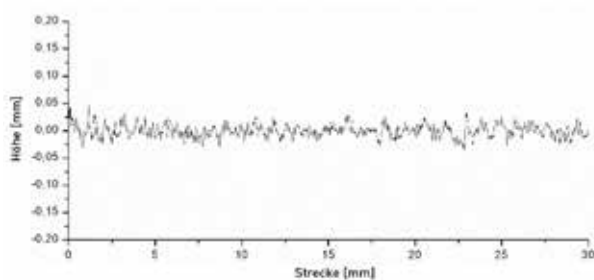


Abb. 77: Rauigkeitsmessung Keramiksand-Schalungen

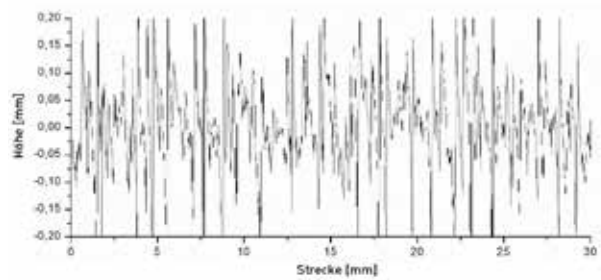


Abb. 78: Rauigkeitsmessung Quarzsand-Wasserglas-Schalung

	FORMSAND / BENTONIT	QUARZSAND / WASSERGLAS	QUARZSAND / STÄRKE	KERAMIKSAND	HOLZSPAN
Linienrauheit $R_a [\mu\text{m}]$	23,8	61,4	65,3	9,1	9,8
Flächenrauheit $S_a [\mu\text{m}]$	56,2	80,3	75,2	8,9	9,1

Abb. 79: Prüfung Rauheitswerte (Linien- und Flächenuntersuchungen). Gemittelte Rauheitswerte (Auflösung 1)

6.2.2. Bewertung resultierender Betonoberflächen

	KERAMIKSAND	HOLZSPAN
Rauheitswert R_a [μm]	14,4	13,5
Rauheitswert R_{max} [μm]	92,8	80,5

Abb. 80: Rauheitsmessungen mittels Digital-Mikroskopie

Zur Charakterisierung von Betonoberflächen kamen mikrostrukturelle Rauheitsmessungen mittels Digital-Mikroskopie zum Einsatz. Es wurden Betonabgüsse folgender versiegelter Schalungen untersucht:

- 1.) Keramiksand-Schalung mit einem Spezialversiegelungsprodukt der Firma Münch
- 2.) Holzspan-Stärke-Schalungen mit einer Silikonbeschichtung

Ähnlich der in "6.2.1. Bewertung von Schalungsoberflächen" beschriebenen Untersuchungen via Streifenlichtphotometrie wurden auch hier die Rauheitskenngrößen R_a und R_{max} anhand mehrerer Messungen ermittelt, um ein Oberflächenprofil der Betonabgüsse zu erstellen. Zur Berechnung eines Mittelwerts (siehe Abb. 80) erfolgten pro Prüfobjekt je vier Messungen an zwei unterschiedlichen Stellen der Oberfläche. Für die Vermessung kam das Mikroskop "Keyence VHX-5000" mit einem Objektiv "Keyence VH-Z20UR" zum Einsatz.

Alle Messungen wurden mit einer 200-fachen Vergrößerung durchgeführt. Dafür wurde ein Bereich aus mindestens 9×9 Feldern aufgenommen, auf dem das Oberflächenprofil gemessen wurde. Jede Messung besteht aus 10 parallelen Linien mit einem Abstand von $1,1 \mu\text{m}$ zueinander, wodurch starke lokal auftretende Maxima und Minima statistisch weniger ins Gewicht fallen.

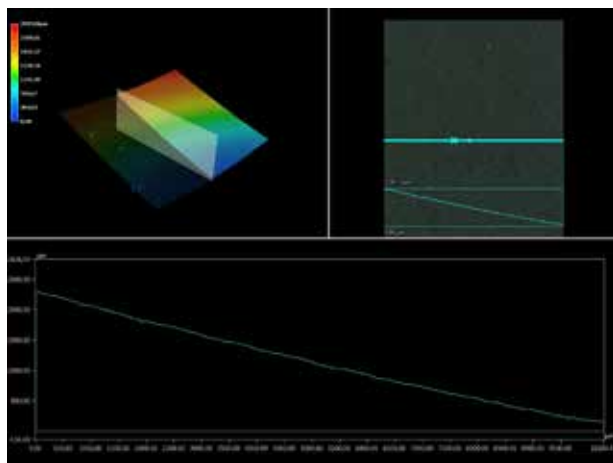


Abb. 81: Rauheitsmessungen Betonabguss Keramiksand-Schalung

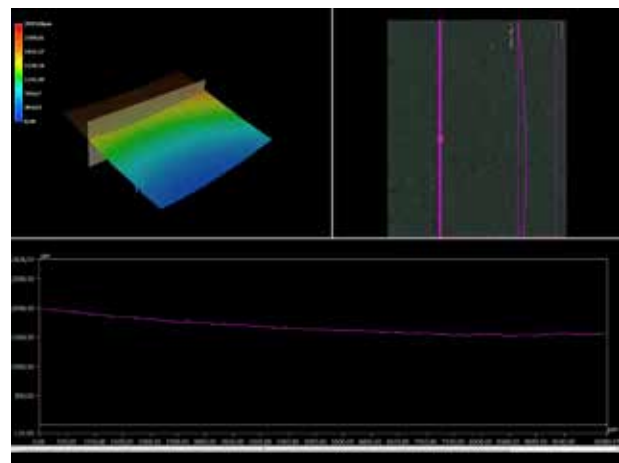


Abb. 82: Rauheitsmessungen Betonabguss Keramiksand-Schalung

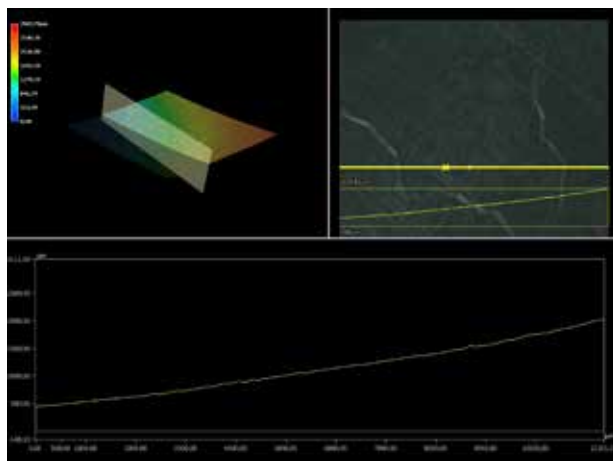


Abb. 83: Rauheitsmessungen Betonabguss Holzspan-Stärke-Schalung

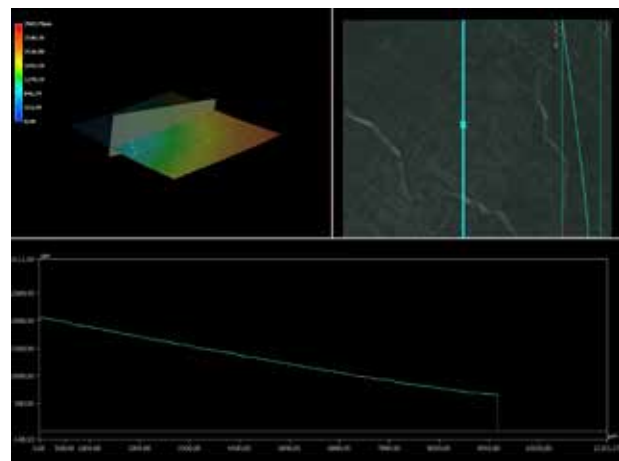


Abb. 84: Rauheitsmessungen Betonabguss Holzspan-Stärke-Schalung

Gemäß Norm EN ISO 4288 wird für diesen Rauigkeitsbereich eine Messlänge von fünf aufeinanderfolgenden Einzelmessstrecken von 2,5 mm und insgesamt 12,5 mm benötigt. Das Messfeld des Mikroskops beträgt ca. 10 mm.

Es resultierten bei beiden Prüfobjekten sehr feine Oberflächen in einem durchschnittlichen Bereich des Rauheitswerts R_a von ca. $14 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 80). Durch die Silikonbeschichtung der Holzspan-Stärke-Schalung konnte die Oberflächenrauheit minimiert und – bezogen auf die Rauheitswerte – gleichwertige Ergebnisse zur Keramiksand-Schalung erzielt werden. Beide Oberflächengüten entsprechen der höchsten Sichtbetonklasse 4 (Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung) (siehe "Exkurs Sichtbetonoberflächen").

6.3. Toleranzabgleich

Zur Präzisionsbetrachtung von Schalungs- und Betonkörpern wurden die Geometrien mit Hilfe einer 3D-Messtechnik analysiert und mit dem digitalen 3D-Modell verglichen. Die Vermessung der Prüfkörper fand mit einem "GOM ATOS Core 500" statt; die Genauigkeit liegt bei $0,053 \text{ mm}$. Das Prüfgerät kommt für die dreidimensionale Vermessung von kleinen und mittleren Objekten wie Keramikkerne, Guss- oder Kunststoffteilen zum Einsatz. Durch die ermittelten dreidimensionalen und flächenhaften Messdaten kann die gesamte Bauteilgeometrie erfasst werden.

Im weiteren Prozess wurde die dreidimensional vermessene Bauteilgeometrie mit dem digitalen 3D-Modell abgeglichen. Eine Farbskala zeigt die Abweichungen zwischen realem und digitalem Modell (Abb. 85-90).¹⁷

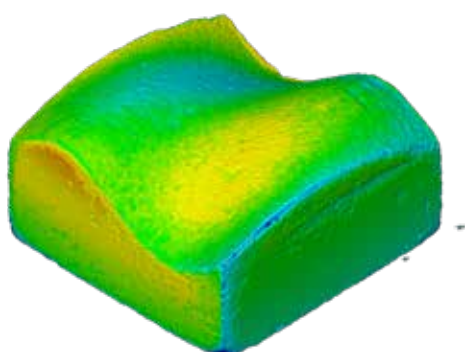


Abb. 85: Formsand-Schalung

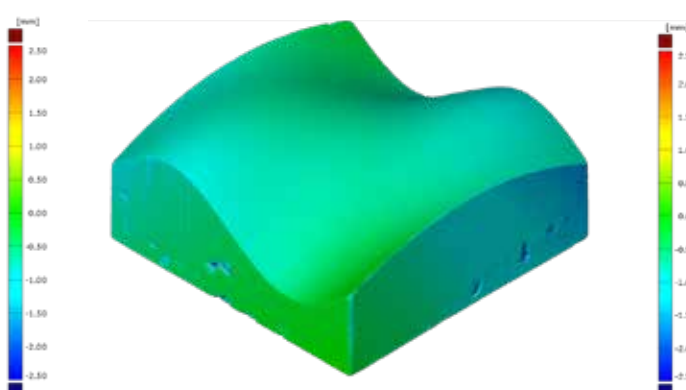


Abb. 86: Keramiksand-Schalung

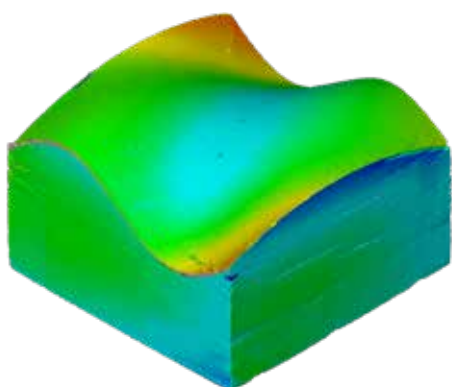


Abb. 87: Holzspan-Stärkeschalung

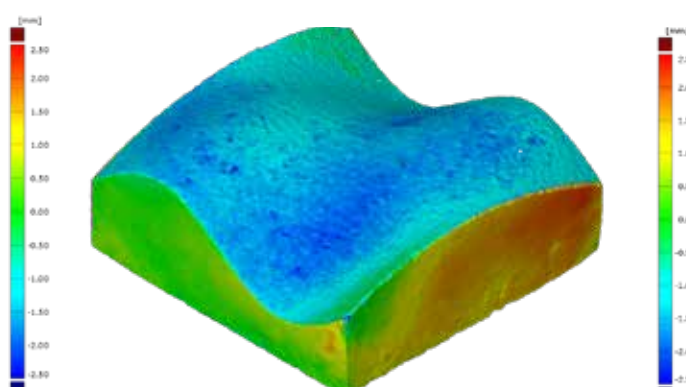


Abb. 88: Quarzsand-Schalungen

¹⁷ : GOM GmbH: ATOS Core

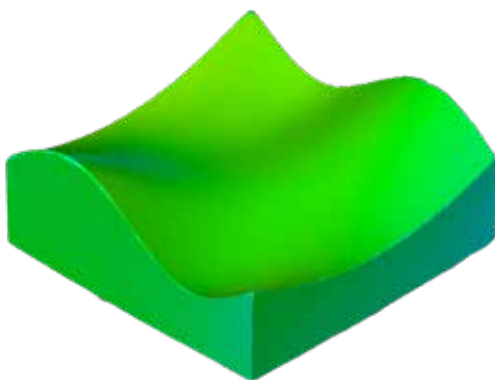


Abb. 89: Betonabguss Keramiksand-Schalung

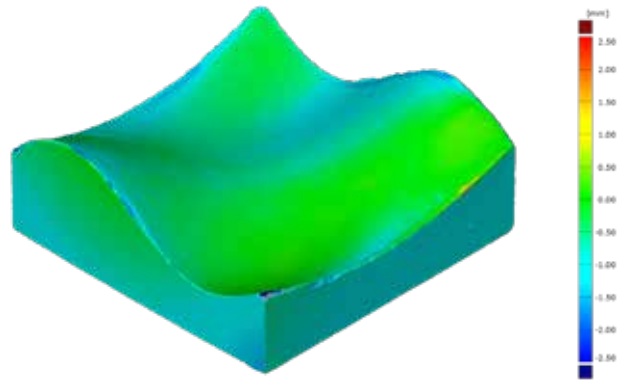


Abb. 90: Betonabguss Holzspan-Stärke-Schalung

6.3.1. Toleranzabgleich von Schalungen

Wie in den Abbildungen 85-88 zu sehen, weisen Keramikschalungen die geringsten Abweichungen zum digitalen 3D-Modell auf. Ebenso besitzt die gefräste Holzspan-Stärke-Schalung eine sehr hohe Gesamtpräzision. Formsand- und Quarzsand-Schalungen zeigen die stärksten Abweichungen zu dem digital erstellen Ausgangsmodell. Bereits augenscheinlich sind an der Oberfläche starke Unebenheiten zu erkennen, was auf die grobe Formstoffstruktur der Einzelkörner rückschließen lässt.

6.3.2. Toleranzabgleich von Betonabgüssen

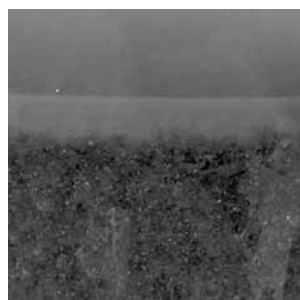
Untersuchungen zum Toleranzabgleich fanden ebenso an Betonabgüssen (Abb. 89 - 90) der o.g. Schalungskörper (6.2.2. Bewertung resultierender Betonoberflächen) statt.

Durch beide Oberflächenversiegelungen ließen sich leichte Strukturunebenheiten ausgleichen, die den Toleranzbereich zwischen Schalung und Abguss weitestgehend minimierten und somit die Gesamtpräzision des Betonelements steigerten. Insbesondere der Betonabguss der silikonbeschichteten Holzspan-Stärke-Schalung weist einen geringeren Toleranzbereich auf als der unversiegelte Schalungskörper (siehe Kapitel 6.2.1. Bewertung von Schalungsoberflächen).

7. RÜCKFÜHRUNG



Formsand



Quarzsand



Keramiksand



Holzspan

Abb. 91: Formstoffrückführung

Im Forschungsprojekt kam der Rückführung der Formstoffe eine besondere Bedeutung zu, denn erst durch diese wird aus den verwendeten Materialien ein Produktionskreislauf im Sinne des Zero-Waste-Gedankens.

Die Rückführung selbst besteht zum Teil aus dem Auflösen bzw. Zerkleinern des Materialverbunds, dem Trennen von Formgrundstoff und Bindersystem, sowie dem erneuten Einspeisen der Komponenten in den Verfahrensprozess. Die Art der Rückführung richtet sich dabei nach dem jeweiligen Stoffgemisch.

Das Zerlegen der Schalungen in ihre Bestandteile kann mechanisch (Reiben, Zerschlagen, Brechen), chemisch (Auflösen mittels Chemikalien oder Wasser) oder thermisch (Hitze, Kälte) passieren. Um ein ökologisch-nachhaltiges Verfahren zu entwickeln, sollte der Energieaufwand für die Rückführung der Formstoffe möglichst gering gehalten werden. Außerdem sollte Abstand genommen werden von Verfahren, die Emissionen bzw. gesundheitsschädliche Stoffe einsetzen, freisetzen oder schwer zu reinigendes Abwasser produzieren.

Daher setzte das Projekt auf den Verzicht von schädlichen Additiven und weiteren Zusätzen – die eine sortenreine Rückführung erschweren oder gar verhindern – um die Recyclingfähigkeit zu vereinfachen und zu garantieren. Wie folgt werden Rückführungsstrategien für die einzelnen Formstoffschalungen erläutert:

7.1. Formsand-Schalungen

Formsand wird bei einem Feuchteanteil von 5% verarbeitet. Trocknen die erzeugten Schalungen weiter aus, lassen sie sich unter geringem Energieaufwand (händisch) zerschlagen und leicht zurückführen. Zunächst entstehen größere Bruchstücke, die bei erneuter Krafteinwirkung schnell sandig zerfallen. Abschließend kann der gewonnene Sand gesiebt und so von verbliebenen Konglomeraten befreit werden. Es resultiert ein feiner, loser Sand, der etliche Male wiederverwendet, d.h. mit Wasser reaktiviert werden kann. Eine erneute Zugabe von Bentonit ist i.d.R. nicht notwendig, wäre aber bei Bedarf unproblematisch durchzuführen. Bei der Rückführung des Formsands entstehen weder Emissionen, gesundheitsschädliche Stoffe noch problematische Abwässer.

7.2. Quarzsand-Stärke-Schalungen

Auch beim Quarzsand-Stärke-Gemisch besteht der erste Schritt der Rückführung im Zerschlagen bzw. Aufbrechen. Die extrem harten Proben müssen dabei mit deutlich mehr Energieaufwand zerkleinert werden, als es beispielsweise beim Formsand der Fall ist. Ein händisches Aufbrechen ist zeitintensiv und es empfiehlt sich einen geeigneten (Gesteins-) Brecher einzusetzen. Es entstehen große Bruchstücke, die durch weitere Krafteinwirkung zerfallen. Abschließend kann das zerkleinerte Sand-Stärke-Gemisch gesiebt und unter erneuter Zugabe von Wasser und ggf. auch Stärke wiederverwendet werden. Problematisch an diesem Vorgehen ist, dass die einzelnen Sandkörner durch das Zerschlagen brechen und der Formstoff immer weiter verstaubt. Diese feinen Stäube sind im Umgang nicht unproblematisch und für das Verfahren nachteilig.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die intakte Schalung, ohne vorheriges mechanisches Aufbrechen, in einem Wasserbad aufzulösen. Dazu wird die Schalung in ein Wasserbad gegeben und nach wenigen Minuten bzw. Stunden (abhängig von der Größe der Schalung) zerfällt diese in Sedimentschichten. Die Komponenten Sand und Stärke trennen sich, wobei der Sand den Bodensatz bildet und die Stärke sich auf diesem absetzt. Nachteilig an diesem Vorgehen ist, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass Bestandteile des Altsandes (Quarzsand mit Phenolharz gebunden) sich ebenfalls im Wasser lösen und ein problematisches Abwasser erzeugen. Außerdem wird die positive Energiebilanz des energetisch unaufwendigen Auflösens in Wasser durch die Tatsache überlagert, dass zur benötigten Trocknung des nunmehr nassen Sands viel Energie (Wärme) benötigt wird. Aufgrund der vollständigen Trennung von Formgrundstoff und Formstoffbinder ist

das Verfahren theoretisch unbegrenzt einsetzbar, jedoch ist von einer immerwährenden Zugabe von neuwertiger Stärke auszugehen.

Eine thermische Aufbereitung des Formgrundstoffs durch Abbrennen der Stärke ist denkbar, wirkt sich aber potentiell nachteilig auf den verwendeten Quarzsand (Aufbrechen zu feinen Stäuben) aus, produziert Emissionen, schädliche Abgase (Phenolharzreste) und ist energetisch aufwendig.

7.3. Quarzsand-Wasserglas-Schalungen

Auch bei wasserglasgebundenen Schalungen bieten sich verschiedene Möglichkeiten der Rückführung mit jeweiligen Vor- und Nachteilen. Bei der rein mechanischen Rückführung, also dem händischen oder maschinellen Zerschlagen der Schalungen, wird die Form in immer feinere Bestandteile aufgebrochen. Hier ergeben sich zunächst gröbere Stücke, die allmählich in ein sandiges Formstoff-Binder-Gemisch zerfallen. Nach dem Sieben des Gemischs und dem Aussondern von größeren Rückständen, kann der Rückgewonnene Sand erneut für die Formherstellung verwendet werden.

Nachteilig an diesem Vorgehen ist zum einen das immer weitere Aufbrechen der Sande zu feinen Stäuben, zum anderen die eingeschränkte Wiederholbarkeit. Durch die Zugabe des Bindersystems reichert sich das Wasserglas in zunehmendem Maße im Formstoff an. Dies bedeutet ein allmähliches „Verglasen“, also die Bildung von Binderhüllen um das Sandkorn. Diese zunehmende Anreicherung führt dazu, dass das Wasserglas nach maximal drei Durchgängen nicht länger in der Lage ist, den Formgrundstoff in zufriedenstellendem Maße zu binden. Um den Formstoff dennoch weiter zu verwenden, besteht neben der mechanischen Aufbereitung auch die Möglichkeit der Lösung in Wasser. Bei der Nassregenerierung werden die Formen zunächst grob zerkleinert und mit Wasser aufgeschlämmt. Leicht auflösbare Bestandteile des wasserlöslichen Bindersystems werden direkt abgetrennt, anhaftende Bindemittelreste werden danach durch Reiben der Sandkörner untereinander abgelöst (Reibwäsche). Der als Bodensatz abfallende Sand wird nochmals gespült und getrocknet; das gelöste Bindemittel wird als Suspension abgeschieden, weiter aufbereitet und deponiert. Die Nassregenerierung erzielt zwar gute Ergebnisse, was die Aufbereitung des Formgrundstoffs anbelangt, gleichzeitig ist es aber ein energetisch hochaufwendiges und ökologisch nicht unbedenkliches Verfahren.¹⁸

Eine rein thermische Aufbereitung des Formstoffs ist ungeeignet, da die anorganischen Bestandteile des Wasserglases, ab Temperaturen von 670 °C, auf die Sandkörner schmelzen und sich nicht von diesen trennen lassen.¹⁹

7.4. Keramiksand-Schalungen

Die mit Harz gebundenen Schalungen weisen die höchsten Festigkeitswerte (20N/mm²) auf.

Die Rückführung der Schalungen ist händisch nicht möglich. Eine mechanische Regeneration im Sandbrecher (Abb. 93), mittels Rüttelns, ist hier erforderlich. Auf der Oberfläche des Sandbrechers befinden sich Stahlspitzen, die zunächst für eine grobe Zerkleinerung sorgen. Im unteren Bereich der Maschine wird der Sand über feine Siebe ausgesiebt. Im industriellen Prozess werden pro Jahr lediglich ca. 3% des Formgrundstoffs ausgesondert und dementsprechend nachgesetzt. Die Rückführung des Formstoffes ist endlich. Der Sand ist ca. 30 bis 40-mal im Kreislauf verwendbar, bevor dieser mit Harz gesättigt ist und durch eine thermische Regeneration ausgebrannt werden muss. Ist dies geschehen, kann der Sand erneut in den Kreislauf gegeben werden.



Abb. 92: Keramiksand-Schalungen vor und nach mechanischer Rückführung (links: Neusand; rechts: Altsand)



Abb. 93: Mechanische Regeneration von Keramiksand im Sandbrecher

¹⁸ : Vgl. Winterhalter et al. (1992), S. 79 ¹⁹ : Vgl. Winterhalter et al. (1992), S. 76 + 79



Abb. 94: (1) Span im Ausgangszustand (WEHO 500) (2) Rückführung mit Schredder-Werkzeug A (3) Schredder-Werkzeug B (4) Schredder-Werkzeug C

7.5. Holzspan-Stärke-Schalungen

Studien haben aufgezeigt, dass zwei Rückführungsweisen möglich sind: Eine mechanische Aufbereitung durch Schreddern sowie das Auflösen der Schalungen in einem Wasserbad.

7.5.1. Rückführung durch Schreddern

Eine Rückführung der gebundenen Holz-Stärke-Schalung, in ihren ursprünglichen Formstoffzustand kann durch Schreddern erfolgen. Bei der Zerkleinerungsweise können durch die Wahl und einen Wechsel des Schredderwerkzeuges unterschiedliche Spangeometrien und Längen erzeugt werden (siehe Abbildung 94). Der lose, trockene Formstoff muss zur erneuten Formung mit Wasser angereichert werden.

Zur Evaluierung der Rückführbarkeit der Schalungen wurden Untersuchungen an zwei kleinmaßstäblichen Probekörpern (Rohrprobe Ø75 mm, Höhe ca. 34 mm) durchgeführt. Diese wurden zunächst mit einem geeigneten Schredderwerkzeug zerkleinert, um den losen Formstoff unter Beigabe von Wasser erneut zu mischen, pressen und abschließend auf einem Gitterrost an der Luft zu trocknen. Ziel war es, folgende Parameter und Fragestellungen zu erforschen: (a) Wie muss die Schalung zerkleinert werden? (b) Wie fein muss der gemahlene Span sein? (c) Wie groß ist der prozentuale Materialausschuss pro Zyklus? (d) Ab welcher Wiederholungsrate muss erneut Stärke hinzugefügt werden? (e) Lassen sich die Proben auch ohne erneute Beigabe von Stärke rückführen? (f) Ist der Probekörper bei einer Zugabe von Stärke ab einer bestimmten Wiederholungsrate mit dem Formstoffbinder übersättigt? (g) Wie wirkt sich eine Rückführung auf die Druckfestigkeit und Oberflächengüte der Schalung aus?

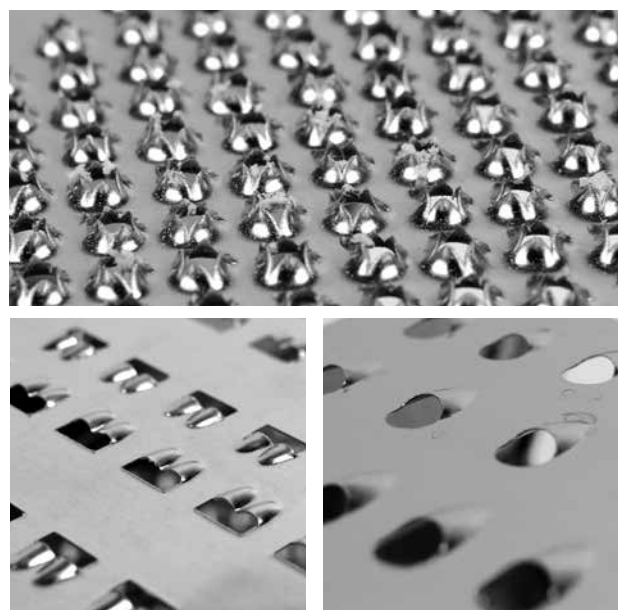


Abb. 95: Schredder-Werkzeug. Oben Werkzeug A. Unten links Werkzeug B. Unten rechts Werkzeug C.

Zur näheren Betrachtung der genannten Parameter wurde das Ausgangsgewicht der Proben in getrocknetem Zustand, das Gewicht des geschredderten Spans, der Verlust nach dem Zerkleinern sowie das Gewicht der verpressten Proben in feuchtem und getrocknetem Zustand gemessen.

Um geeignete Spangeometrien und -längen zu erzeugen, wurden unterschiedliche Schredderwerkzeuge untersucht (siehe Abb. 95). Studien zeigten, dass sich sowohl feineres Mehl als auch längliche Fasern für ein erneutes Verpressen eignen. Beim Zerkleinern der Probekörper ergab sich ein durchschnittlicher Materialausschuss von 1-2% pro Zyklus.

Um den Materialausschuss zu kompensieren und gleichzeitig zu erforschen, wie sich ein zusätzlicher Anteil an Stärke auf das Resultat auswirkt, wurde ein rezepturentsprechendes, prozentuales Maß von frischem Span und Stärke bei gleichbleibendem, vollem Wasseranteil hinzugegeben. Die Beigabe erfolgte lediglich an einem der beiden untersuchten Proben (Probe 1); der andere Probekörper (Probe 2) wurde ohne Zusätze mit gleichbleibendem Wasseranteil neu angemischt, um Aussagen über eine maximale Wiederverwendbarkeit im Ursprungszustand zu liefern. Durch den Zusatz frischer Stärke und Span konnte das Gesamtgewicht bei Probe 1 auch nach zehn Rückführungszyklen nahezu auf einem gleichbleibenden Niveau gehalten werden, ohne feststellbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit. Eine Übersättigung der Stärke konnte in den erforschten Zyklen nicht festgestellt werden.

Bei Probe 1 war auch nach zehn Fertigungszyklen noch genügend Stärke im Formstoff vorhanden und keine weitere Zugabe des Formstoffbinders nötig. Die Festigkeit der Probe nahm nach der ersten Rückführung zunächst ab und blieb in weiteren Zyklen nahezu kongruent. Gleichzeitig stieg die Porosität des untersuchten Probekörpers leicht an.

Beide Probekörper zeigten keinerlei Beeinträchtigungen der Oberflächengüte auf. Auch Rissbildungen oder größere Abrisse konnten nicht festgestellt werden.

Abschließend lässt sich festhalten: Je nach geforderter Festigkeit der Schalung lassen sich die Werte durch Zugabe von Stärke einstellen, um auf spezifische Anforderungen reagieren zu können. Das Zerkleinern sowie erneute Anmischen und Verpressen der Formstoffmischung erfolgt ebenso umstandslos wie bei der Herstellung einer neuen Schalung.

7.5.2. Rückführung im Wasserbad

Neben einer mechanischen Rückführung durch Schreddern, kann ein Trennen von Holzspan und Stärke in einem Wasserbad stattfinden. Bei der Nassregenerierung entmischen sich Span und Stärke. Der Stärkekleister lagert sich dabei im oberen Bereich ab, der ausfällende Holzspan sinkt in die Bodenebene des Wasserbads, kann entnommen und wieder feucht verpresst werden (Abb. 96).

Aufgrund der in Kapitel "7.2. Quarzsand-Stärke-Schalungen" bereits beschriebenen Problematik hinsichtlich möglicher Verunreinigungen des Abwassers sowie dem vollständigen Verlust der in der Schalung enthaltenen Stärke, wurde eine Rückführung im Wasserbad in den weiteren Forschungsarbeiten ausgeschlossen. Die Studien konzentrierten sich stattdessen auf eine o.g. Rückführung durch Schreddern.



Abb. 96: Rückführung einer Holzspan-Stärke-Probe im Wasserbad

8. VERFAHRENSVERGLEICH

Druckfestigkeit

Keramiksand-Schalungen weisen mit einer Druckfestigkeit von 20,1 N/mm² die höchste Standfestigkeit auf. Gefolgt von Span-Schalungen mit einer Druckfestigkeit von 14,31 N/mm². Diese Werte bilden einen klaren Abstand zu Quarzsand-Schalungen (mit Stärke gebunden: 1,95 N/mm²; mit Alkalisilikat: 0,74 N/mm²). Am Druckempfindlichsten erwiesen sich Formsand-Schalungen (0,40 N/mm²).

Trocknungszeit & Vernetzen

Die schnellste Trocknungszeit war bei den Verfahren zu verzeichnen, bei denen Formstoffe durch Vernetzung gebunden wurden. Mit Alkalisilikat gebundene Quarzsand-Schalungen konnten nach 45 Minuten bereits ausgeschalt und in Verwendung gebracht werden. Dabei war die Größe der Schalung nicht ausschlaggebend auf die Vernetzungszeit. Kleinere Keramiksand-Schalungen wurden nach ca. 40 bis 60 Minuten mit Polyurethanharz vernetzt. Größere Sandformteile konnten frühesten nach 3 Stunden gewendet oder entformt werden.

Deutlich längere Trocknungszeiten resultierten bei Holzspan-Stärke-Schalungen: Hier bewegen sich die Zeiten zwischen neun Tagen bei einer Lufttrocknung, fünf Tagen bei thermischer Trocknung (45° im Trockenschrank) und drei Tagen beim innovativen, energieeffizienten Verfahren von "drywoodboxx". Die Trocknungszeiten sind hierbei maßgeblich von der Größe, insbesondere von der Höhe, der Schalung abhängig.

Schimmelbildung

Schimmelbildung trat im Zusammenhang mit dem Formstoffbinder Stärke auf. Der in der Rezeptur, zum Verkleistern benötigte, hohe Anteil an Wasser und ein schlechtes Abführen des überschüssigen Wassergehalts führten zu Schimmelbildung. Dies betraf mit Stärke gebundene Holz-

span- und Quarzsand-Schalungen. Untersuchungen zeigten, dass der Schimmelbefall in hohem Maße abhängig ist von dem verwendeten Stärkeprodukt. Schimmelbildung konnte insbesondere bei dem Produkt "AllStarch Swellstar CWS12" festgestellt werden; das Produkt "Tecgel" der Firma Kröner-Stärke blieb weitestgehend frei von Schimmelbefall. Beide gehören zu den kaltquellenden Stärken auf Weizenbasis. Eine Schimmelbildung konnte sowohl bei Holzspan- als auch Quarzsand-Schalungen mit anderen Stärkesorten sowie Calciumpropionat vermieden werden. Ebenso wurden optimierte Trocknungsstrategien und ein Konzept aus dünnen Halbzeuglagen entwickelt, die einem Befall zusätzlich entgegenwirken. Vernetzende und mit Bentonit gebundene Schalungen waren von Schimmelbefall nicht betroffen.

Fräsbarkeit

Das CNC-Fräsen von Sand wurde als nachteilig bewertet. Der Verschleiß des Zerspanungswerkzeuges war aufgrund des aggressiv-abrasiven Sandes höher. Ebenso mussten besondere Zerspanungswerkzeuge gefertigt werden und die Fräsdauer war aufgrund des festen Formstoffes länger. Der beim Zerspanen aufkommende Sandspan ist nicht für Fräsmaschinen geeignet und schränkte die Wahl der bearbeitenden Betriebe ein. Nur wenige sind darauf eingestellt und haben entsprechende Maschinen und Schutzvorrichtungen. Das Fräsen von gebundenen Holzspan-Schalungen war hinsichtlich Werkzeugwahl, Werkzeugverschleiß und Fräsdauer unaufwändig und etabliert.

Oberflächengüte

Gemäß der Rauigkeitsmessungen mittels Streifenlichtphotometer resultierte die feinste Oberflächengüte mit dem Faktor Ra = 9,1 µm bei Keramiksand-Schalungen. Mit einer Linienrauheit von 9,8 µm erzielten Holzspan-Stärke-Schalungen ebenso sehr gut Ergebnisse. Formsand-Schalungen lagen bei den Untersuchungen mit einem

	FORMSAND / BENTONIT	QUARZSAND / WASSERGLAS	QUARZSAND / STÄRKE	KERAMIKSAND	HOLZSPAN
Gewicht (15x15x15cm) [g]	5.160	5.000	4.820	5.400	1.620g
Spezifische Dichte [g/cm³]	1,53	1,48	1,43	1,60	0,48
Körnung / Spanlänge [mm]	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5	0,05 - 0,1	0,05 - 0,5
Pressen	Betonstampfer / mechanisch	nicht nötig	Betonstampfer / mechanisch	Betonstampfer	mechanisch
Trocknung	Lufttrocknung	Lufttrocknung	thermische Trocknung	Lufttrocknung	thermische Trocknung

Abb. 97: Spezifikationen der unterschiedlichen Verfahren

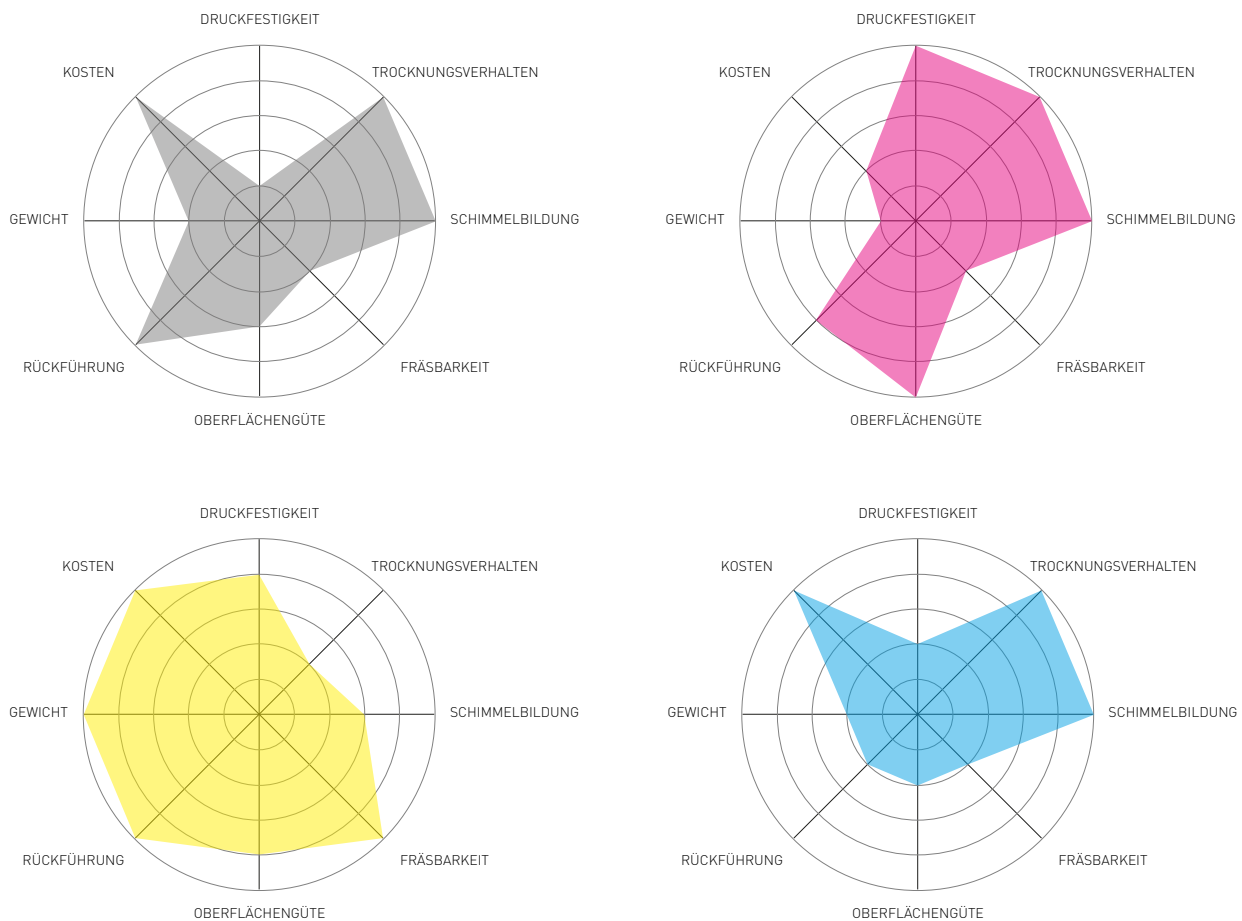


Abb. 98: Verfahrensvergleich

Wert von $R_a = 23,8\mu\text{m}$ im mittleren Bereich. Die meisten Unebenheiten und Abrisse wiesen Quarzsand-Schalungen auf, mit einem Rauigkeitswert von $R_a = 61,4\mu\text{m}$.

Rückführbarkeit

Da die Bindefähigkeit des Bentonits durch Wasser aktiviert wurde und mit schwindendem Wasseranteil nachließ, hat dieses Schalungsverfahren die bestmögliche Rückführbarkeit. Mit Stärke gebundene Holzspan-Schalungen konnten mit Wasserzugabe erneut angesetzt werden. Evaluiert wurden zehn Rückführungszyklen, die keine negativen Auswirkungen auf die regenerierten Testkörper zeigten, was ein vielfaches mehr an Zyklen zulässt. Keramiksand-Schalungen konnten 30 bis 40-mal im Kreislauf verwendet werden, bevor sie thermisch regeneriert werden musste. Das schlechteste Rückführverhalten hatten

mit Wasserglas gebundene Schalungen, da sie lediglich dreimal aufbereitet werden konnten, bevor eine Regeneration des Formstoffs stattfinden konnte.

Schalungsgewicht

Keramiksand-Schalungen weisen das höchste Eigengewicht auf. Eine Schalung mit den Maßen 150 mm x 150 mm x 150 mm hat ein Gewicht von 5.400g. Formsand-Schalungen haben mit den gleichen Abmaßen ein Gewicht von 5.160g gefolgt von Quarzsand-Schalungen mit ca. 5.000g. Am leichtesten sind Holzspan-Schalungen mit nur 1.620g.

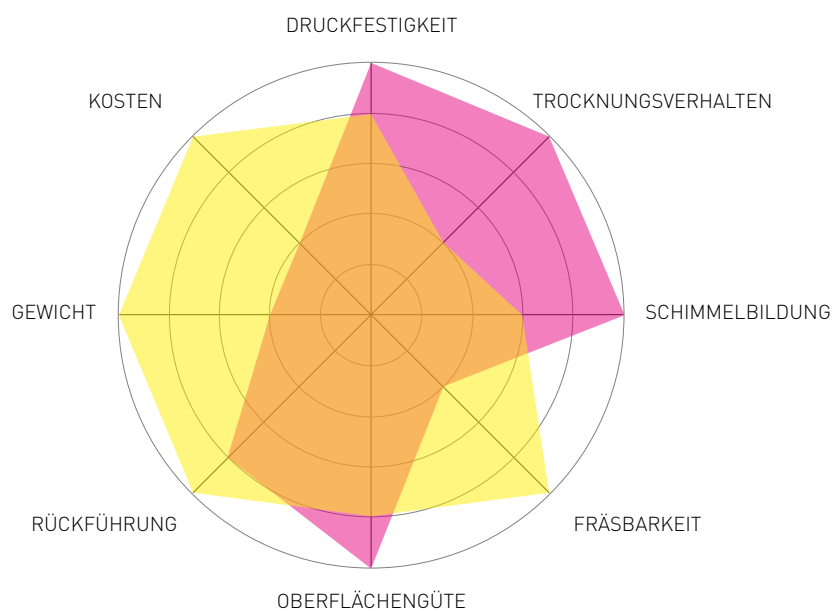
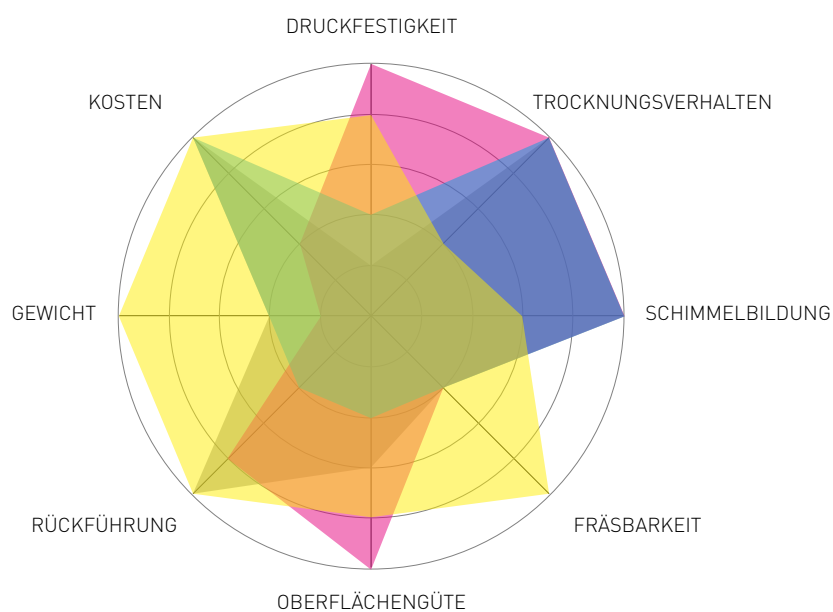


Abb. 99: Vergleich zwischen Keramiksand- und Holzspan-Verfahren



9. UMSETZUNG 1:1 DEMONSTRATOR

Um gewonnene theoretische Ergebnisse in die Praxis zu transferieren, wurde zum Ende der Projektlaufzeit – mit Hilfe von kooperierenden Industriepartnern aus dem Bereich Betonteilfertig- und Modellbau – ein 1:1 Demonstrator umgesetzt. Zur Schalungsherstellung wurde das potenteste Verfahren auf Formstoffbasis von Keramiksand ausgewählt.

Während der laufenden Forschungsarbeiten wurden bereits mögliche Eventualitäten abgebildet, die bei einem Skalierungssprung und/ oder der Bearbeitung durch Betonfertigteilewerke auftreten können:

Oberflächengrundierungen reagieren jeweils unterschiedlich auf (a) Trennmittel und (b) Betonmixturen, was sich auf das Ausschalverhalten als auch die Kontaktfläche von Schalung zu resultierendem Betonelement auswirkt. Um die genannten Problematiken für die Umsetzung des Versuchsdemonstrators einzudämmen, wurden in den Betonfertigteilewerken "Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG" und "Runkel Fertigteilebau GmbH" Vorstudien mit kleindimensionierten Testdemonstratoren unternommen.

9.1. Vorstudien in den Betonfertigteilewerken zur Umsetzung eines 1:1 Demonstrators

In Testbetonagen wurden jeweils firmeneigene Betone und Trennmittel in den Einsatz gebracht und geprüft, wie diese auf das von der Universität Kassel vorausgewählte Grundierungsmittel (Mikon 399 MC) reagieren. Die Schalungen wurden den Werken bereits gefräst und oberflächenversiegelt von "Maus GmbH Modell- und Formenbau" angeliefert. Die Resultate wurden dokumentiert und mit den zuvor gewonnenen Erkenntnissen bei Einsatz des UHPC-Betons der Universität Kassel wie folgt verglichen:

Aus den bereits erzielten Resultaten der Universität Kassel ging hervor, dass sich das o.g. Grundierungsprodukt "Mikon 399 MC" zur Oberflächenversiegelung von Keramischalungen eignete in Kombination mit dem kohärenten Trennmittel "Mirror Wax liquid". Es wurden je zwei Schalungen mit dem o.g. Versiegelungsprodukt behandelt. Bei je einem Schalungskörper wurde die versiegelte Oberfläche vor der Betonage mit dem Trennwachs "Mirror Wax liquid" versehen. Die andere Schalung wurde mit einem vom jeweiligen Gewerk ausgewählten Schalöl behandelt.

Entgegen der Erwartung reagierten die firmeneigenen Betone beider Betonfertigteilewerke mit dem Trennwachs "Mirror Wax liquid", sodass sich der Betonabguss nur nach aufwendiger Nachbearbeitung von der Sandschalung lösen ließ (siehe Abb. 101).



Abb. 100: Abguss Trennmittel „SOK Aqua“ (Elo Beton)



Abb. 101: Abguss Trennmittel „Mirror Wax liquid“ (Elo Beton)



Abb. 102: Abguss mit Versiegelung



Abb. 103: Abguss ohne Versiegelung

Parallel wurden anstelle des Trennwaxes gebräuchliche Schalöle der Kooperationspartner (welche bereits abgestimmt sind auf jeweilige Betonrezepturen) auf der gleichen o.g. Grundierung erprobt. In beiden Gewerken wurden hiermit deutlich bessere Ergebnisse erzielt, sowohl hinsichtlich der Trennwirkung als auch im Hinblick auf die resultierende Oberflächenbeschaffenheit des Betonde-monstrators (siehe Abb 100). Die Schalungsoberfläche ist nach der Betonage vollständig intakt und kann ohne weitere Versiegelung, lediglich unter erneutem Auftrag des Schalöls sofort wiederverwendet und abgegossen werden.

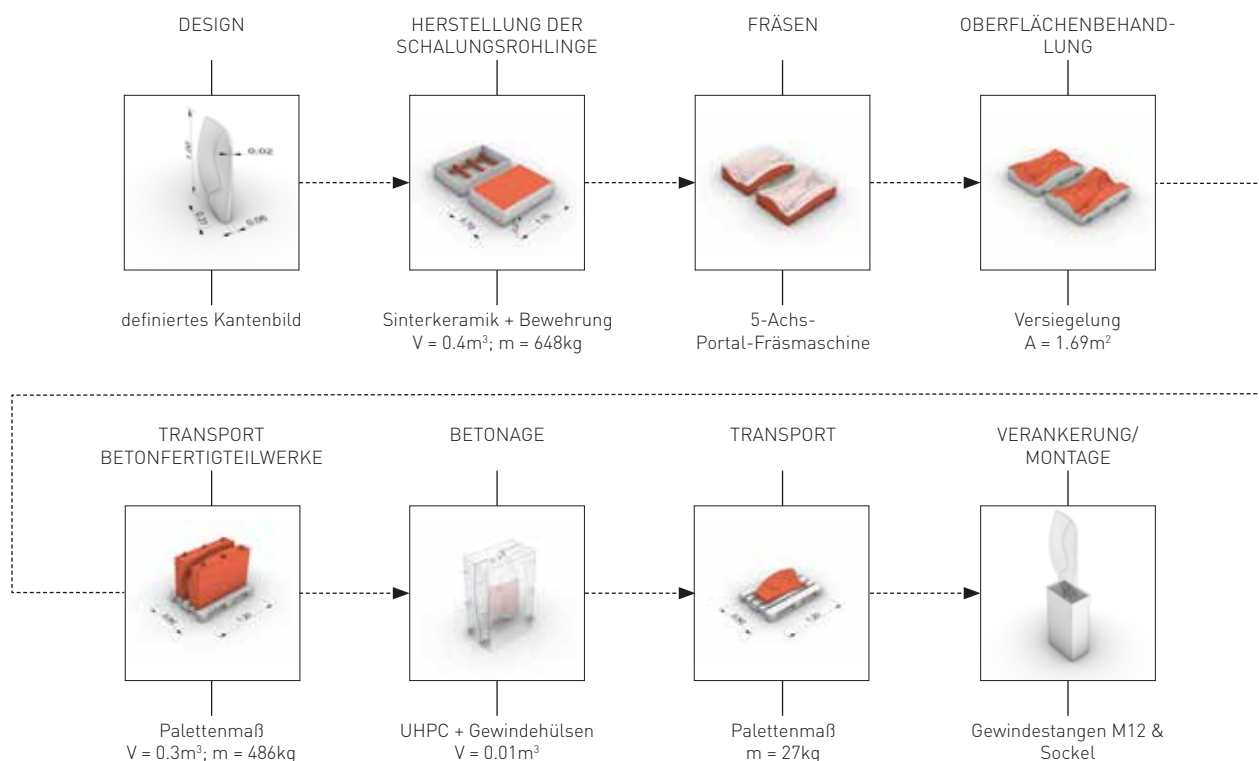


Abb. 104: Fertigungsstrategie Demonstrator

9.2. Entwurf und Fertigung eines 1:1 Demonstrators

Der Entwurf zu einem 1:1 Demonstrator hatte gemäß der bereits zu Anfang des Projektes definierten Parameter den Anspruch an eine komplexe Geometrie in Form einer doppelseitig gekrümmten, dünnwandigen Betonschale in Form eines Ausstellungsstücks. Für Präsentationszwecke wie z.B. auf Messen etc. wurde für dessen Anwendung ein zusätzlicher Sockel inkl. adaptiver Verankerungsmöglichkeit geplant.

Zur Umsetzung der komplex geformten Geometrie wurden zwei Schalungselemente (Schalung und Konterschaltung) hergestellt, welche die technischen Möglichkeiten, Detailausbildung, Präzision sowie Oberflächengüte des Schalungsverfahrens widerspiegeln sollten. Als Analogie zu Sanddünen thematisiert das Design mit weichen, gerundeten Formen und einem stellenweisen spitz zulaufen-

den, definierten Kantenbild die Verwendung des Abfallprodukts Sand als Formgrundstoff und zeigt dabei gleichzeitig die o.g. Möglichkeiten auf (Abb. 105).

Maßgebend für den Entwurf war die Dimensionierung des Bauteils. Für einen praktikablen und energiegerechten Transport wurde ein standardisiertes Palettenmaß (1.20 x 0.80 m) als Vorgabe festgelegt. Somit lassen sich sowohl die Schalungselemente als auch der Demonstrator ökonomisch zwischen den einzelnen Gewerken und möglichen Ausstellungsorten transportieren. Der geschwungene freistehende Körper misst eine Höhe von einem Meter und bildet eine Materialstärke von 60 mm im Fußbereich, die sich nach oben auf sehr schlanken 20 mm verjüngt. Die Herstellung der Schalungsröhle, Fräsarbeiten sowie Oberflächenbehandlungen erfolgten werksseitig bei dem Industriepartner "Maus GmbH Modell- und Formen-

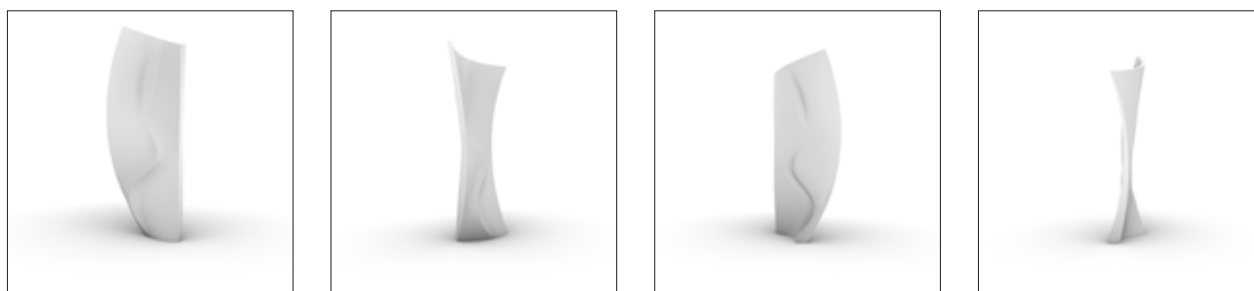


Abb. 105: Entwurf großmaßstäblicher Demonstrator

bau“ in Karlsruhe. Zur fachgerechten Bewegung innerhalb der firmeneigenen Produktionshallen wurde bei der Fertigung eine Bewehrung, in die je 325kg schweren Schalungsrohlinge integriert. Diese ergaben die nötigen Anlagestellen für die Krananlagen. Das Gesamtgewicht beider gefrästen Schalungskörper betrug ca. 480kg.

Das Fräsen erfolgte in mehreren Schritten auf einer 5-achsigen Portal-Fräsmaschine mit Kugelfräser. Zur Behandlung der insgesamt 1.69m² großen Oberflächen kamen die beiden Versiegler “Mikon 399 MC” und “Mikon 397 MC” der Firma “Münch Chemie” zum Einsatz (siehe Kapitel 5.2). Dabei wurde zunächst ein 3-facher Auftrag des Versiegelungsproduktes 399 – welches speziell für poröse Oberflächen entwickelt wurde – vorgenommen. Der Auftrag erfolgte mittels Pinsel. Zwischen den einzelnen Schichten wurde die Oberfläche mit einem feinen Schleifpapier leicht nachpoliert. Die letzte Schicht bildete der Versiegler Mikon 397 MC, der insbesondere für hohe Materialdichten geeignet ist und die Oberfläche mit einem hochwertigen Finish versiegelt.

Die Betonfertigteilewerke “Runkel Fertigteilbau GmbH” und “Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG” haben je ein Exemplar des Versuchsbauteils mit firmeneigenen Betonrezepturen produziert.

Als Trennmittel kamen je nach Werk, die bereits in Kapitel 9.1 erproben und zu den jeweiligen Betonmischungen abgestimmten Schalöle zum Einsatz. Zur Stabilisierung und zum Abbilden der komplex geformten Geometrie wurden spezielle und flexible Glasfasern als Bewehrungsmittel verwendet, da Bewehrungsmatten oder Gitter durch zu grobe oder starre Eigenschaften ein Abbilden hoher Krümmungsgrade verhindern.

Um den Demonstrator auf dem Sockel montieren zu können und damit für ausreichend Standsicherheit zu sorgen sowie den Demonstrator gegen aufkommende Wind- und mögliche Stoßlasten zu sichern, wurde eine Verankerung im Betonelement integriert. Hierfür kam eine Kombination aus Gewindehülsen und –stangen zum Einsatz, um die Präsentationsform des Demonstrators (stehend oder hängend) möglichst flexibel zu gestalten und gleichzeitig gegen eventuelle Schäden beim Transport zu sichern.

Das Einlegen und Fixieren der Gewindehülsen stellte eine besondere Herausforderung an den Fertigungsprozess, da diese in vorher digital berechneten und somit vorgegeben Winkeln justiert werden mussten. Gleichzeitig war bei der hohen Schlankheit des Versuchsbauteils auf eine ausreichende Betondeckung zu achten. In Kooperation mit den Industriepartnern wurde eine Strategie entwickelt, die mit Hilfe einer speziell angefertigten Schablone eine Lage-

positionierung der Gewindehülsen bei gleichzeitiger Gewährleistung des Einfüllens und Glättens des Betons im Sockelbereich ermöglichte (Abb. 106-107).

Nach erfolgreichem Ausschalen des Betonabgusses konnte der Demonstrator mit einem Gewicht von lediglich 27kg problemlos versendet werden. Ein Aufbau auf Messen kann unter anderem mittels eingeschraubten Gewindestangen und vorgefertigten Winkelausgleichselementen auf einem Sockel erfolgen.

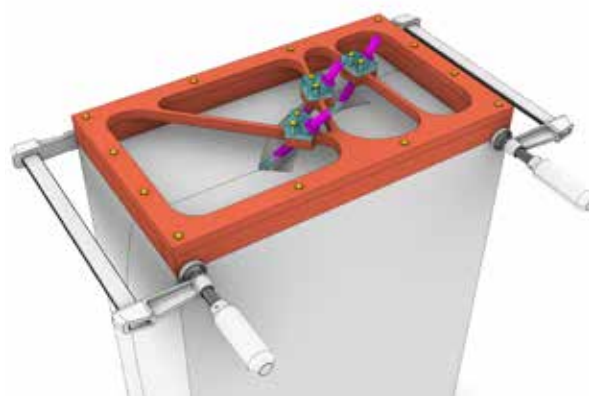


Abb. 106: Schablone zur temporären Unterstützung der Verankerung

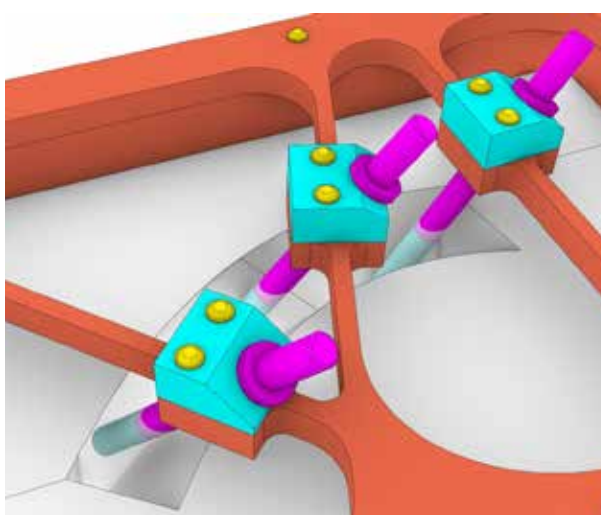


Abb. 107: Schablone im Detail



Abb. 108: Herstellung des Schalungsrohlings aus Keramiksand

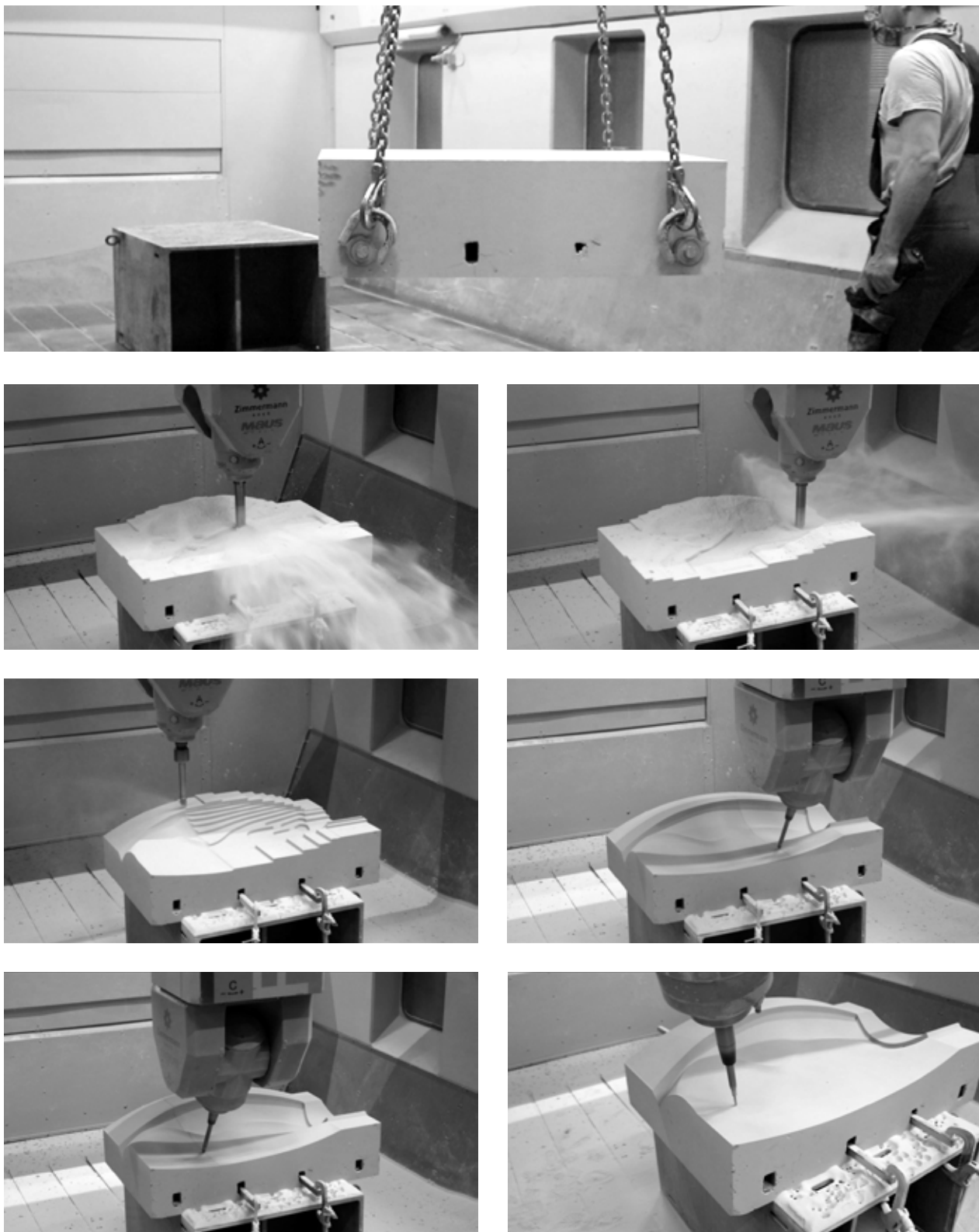


Abb. 109: Subtraktive Bearbeitung von Schalungsrohlings für die Umsetzung von 1:1 Demonstratoren

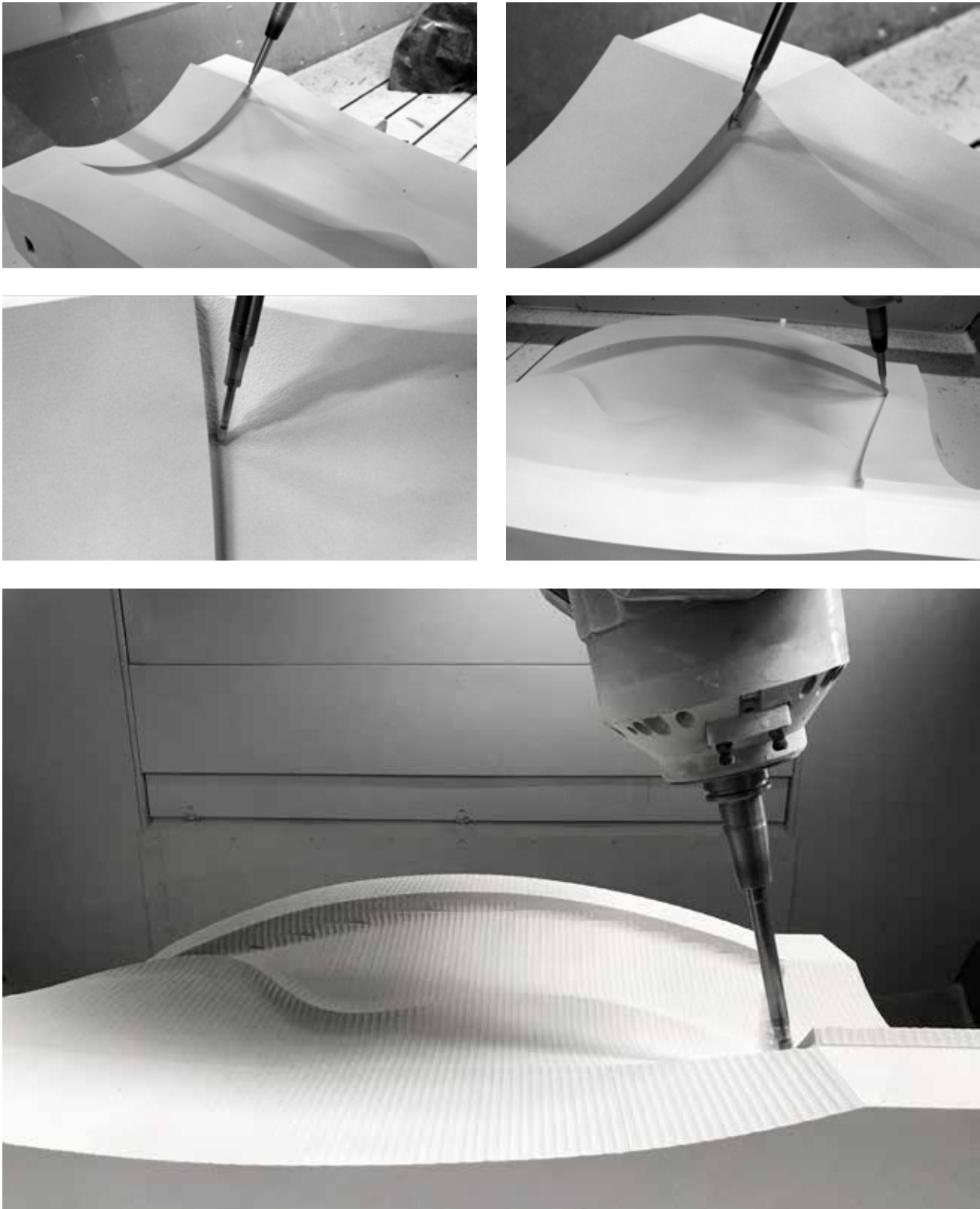


Abb. 110: Subtraktive Bearbeitung von Schalungsrohlingsen für die Umsetzung von 1:1 Demonstratoren



Abb. 111: Gefrästes 1:1 Schalungselement

EXKURS Reduzierung des Eigengewichts von Sandschalungen

Um hohe Materialaufwendungen und damit einhergehende hohe Eigenlasten von Keramiksand-Schalungen zu reduzieren, wurden im Zuge der Forschungsarbeiten folgende mögliche Lösungsansätze entwickelt: (1) kontrollierte Vorformung der Schalungsrohlinge, (2) Segmentierung von Schalungseinheiten, (3) Füllstoffe im Schalungs-

aufbau, (4) Adaptive Unterstützungskonstruktionen von Schalungselementen. Die entwickelten Lösungsansätze wurden anhand der 1:1 Demonstrator-Geometrie digital simuliert, miteinander verglichen und die resultierende Gewichtsreduktion gegenüber der ursprünglichen Vollschalung kalkuliert.

(1) kontrollierte Vorformung der Schalungsrohlinge:



Abb. 112: Kontrollierte Vorformung der Schalungsrohlinge

Unvorteilhafte Ausrichtung:
 $V=0,36\text{m}^3$; $m=590\text{kg}$

Durch Algorithmus optimierte Ausrichtung:
 $V=0,31\text{m}^3$; $m=495\text{kg}$



Durch eine kontrollierte Vorformung bzw. Ausrichtung der beiden Schalungselemente in Abhängigkeit von Krümmungsgrad und Komplexität der individuellen Bauteilgeometrie, lassen sich bereits in einer frühen Planungsphase unnötige Materialaufwendungen einsparen. Hierfür wird die Schalung mit Hilfe eines evolutionären Algorithmus zwischen 0 und 90° rotiert, um das minimale Volumen der Schalungskörper zu ermitteln. Im Fall des Demonstrators konnten so bereits bis zu 14% des verwendeten Materials eingespart werden.

(2) Segmentierung von Schalungseinheiten



Abb. 113: Segmentierung von Schalungseinheiten

Materialvollschalung (beidseitig):
 $V=0,31\text{m}^3$; $m=495\text{kg}$

Schalung segmentiert (beidseitig, 4 Elemente):
 $V=0,10\text{m}^3$; $m=170\text{kg}$



Insbesondere bei geometrisch komplexen, stark gekrümmten Formteilen erweist sich eine Segmentierung der Schalungseinheiten als sinnvoll, um die o.g. Ausrichtung nicht anhand einer großformatigen Geometrie durchzuführen, sondern einzelne Schalungseinheiten segmentweise entlang der Krümmung zu orientieren. In Folge ergibt sich eine Gewichts- und Materialersparnis von rund 65%. Kleinere Schalungskörper ermöglichen zusätzlich ein komfortableres Handling, sowohl in den Gewerken als auch beim Transport. Entstehende Fugen und ein möglicher Mehraufwand durch eine höhere Anzahl an zu erstellenden und subtraktiv zu bearbeitenden Schalungsrohlingen sowie ein mehrfaches Betonieren, sind Kehrseiten dieses Verfahrens.

(3) Füllstoffe im Schalungsaufbau

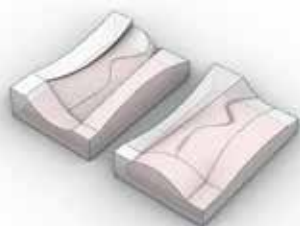


Abb. 114: Füllstoffe im Schalungsbau

Materialvollschalung (beidseitig):
 $V=0,31\text{m}^3$; $m=495\text{kg}$

Schalung abzüglich Füllstoff (60x100x7cm):
 $V=0,22\text{m}^3$; $m=350\text{kg}$



Neben einer algorithmisch optimierten Orientierung und Unterteilung von Schalungseinheiten sind darüber hinaus Füllstoffe im Schalungsaufbau für eine Gewichtsreduzierung denkbar. Die resultierende Materialeinsparung ist hierbei ebenso abhängig von dem Krümmungsgrad der Geometrie; im Falle der gewählten Freiform könnten 30% des ursprünglichen Gewichts eingespart werden.

Dabei muss allerdings sichergestellt werden, dass sich der Füllstoff während des Fräs- und Betonagevorgangs nicht aus dem Schalungskörper löst, gleichzeitig jedoch am Ende des Zyklus sortenrein wieder entfernen lässt. Außerdem muss gewährleistet werden, dass keine Beeinträchtigungen der Festigkeitseigenschaften oder mögliche Rissbildungen in der Schalung entstehen.

(4) Adaptive Unterstützungskonstruktionen von Schalungselementen:

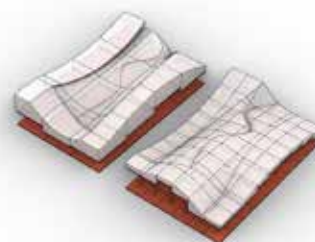


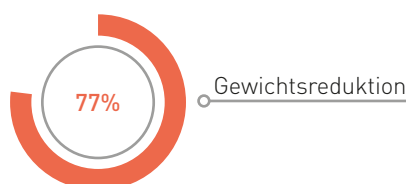
Abb. 115: Adaptive Unterstützungskonstruktion

Materialvollschalung (beidseitig):
 $V=0,31\text{m}^3$; $m=495\text{kg}$

Schalung Unterkonstruktion // 250mm Elemente (3x4):
 $V=0,13\text{m}^3$; $m=215\text{kg}$



Schalung Unterkonstruktion // 125mm Elemente (6x9):
 $V=0,07\text{m}^3$; $m=113\text{kg}$



Anstelle von weiteren Füllstoffen könnte mit Hilfe eines adaptiven Unterstützungssystems gänzlich auf Material im Bodenbereich verzichtet werden. Hierbei werden im Raster angeordnete Plattformen auf höhenverstellbaren Hubeinheiten montiert, die die Unterkonstruktion für das darauffolgende Schalungsmaterial bilden. Die einzelnen Glieder der Basis können CNC-gesteuert oder händisch individuell ein- und ausgefahren werden und tragen die Sandfelder, welche nach dem Fräsprozess die definierte Form des Bauteils abbilden. Je nach Segmentgröße könnte das Gewicht der Schalungskörper um 57 (250 mm Elemente, 3 x 4 Raster) bis 77% (125 mm Elemente, 6 x 9 Raster) reduziert werden.

9.3. Produktion, Ergebnisse und Auswertung von Betondemonstratoren

9.3.1. Betonage in den Betonfertigteilverwerken



Abb. 116: Oberflächenversiegeltes Schalungselement A vor Ort im Betonfertigteilverwerk „Runkel Fertigteilbau GmbH“



Abb. 117: Oberflächenversiegeltes Schalungselement B vor Ort im Betonfertigteilverwerk „Runkel Fertigteilbau GmbH“



Abb. 118: Mit Trennmittel versehenes Schalungselement (Runkel)



Abb. 119: Justierung der Schalungen zur Betonage (Runkel)



Abb. 120: Vorbereitung der Schalungen zur Betonage (ELO)



Abb. 121: Spanngurte fixieren die Schalungen in Position (ELO)



Abb. 122: Zum Schutz der Schalung: Gummimatten (ELO)



Abb. 123: Positionierung mit Schraubzwingen (ELO)



Abb. 124: Bewehrungselemente als Anführungspunkte für Krananlagen (ELO)



Abb. 125: Justierung der Schablone zur Implementierung der Verankerung (ELO)



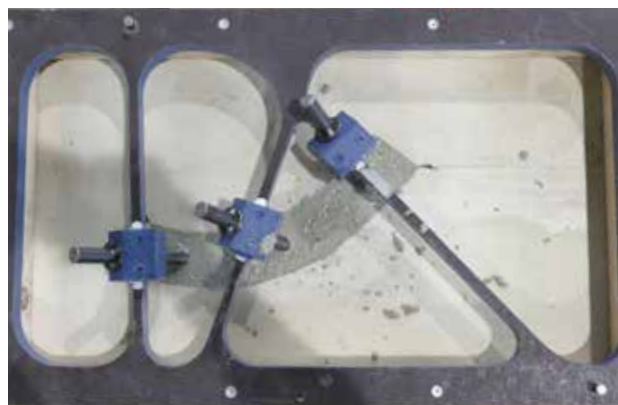
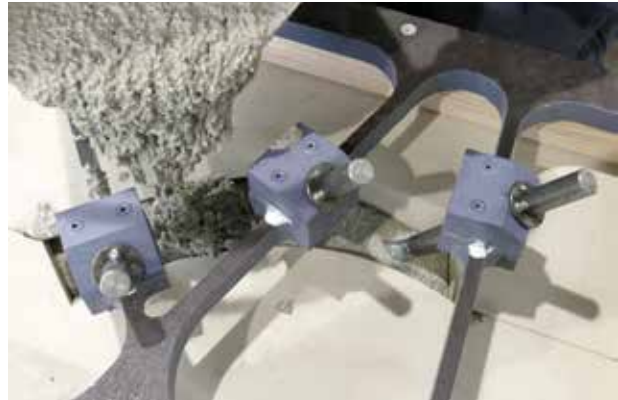


Abb. 126: Einfüllen des Frischbetons (ELO)



Abb. 127: Abziehen des überschüssigen Betons (ELO)

9.3. Produktion, Ergebnisse und Auswertung von Betondemonstratoren

9.3.2. Ergebnisse der Betonage von „Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG“



Abb. 128: V. 1 / Frontansicht



Abb. 131: V. 2 / Frontansicht



Abb. 134: V. 3 / Frontansicht



Abb. 129: V. 1 / Rückansicht



Abb. 132: V. 2 / Rückansicht



Abb. 135: V. 3 / Rückansicht



Abb. 130: V. 1 / Seitenansicht



Abb. 133: V. 2 / Seitenansicht



Abb. 136: V. 3 / Seitenansicht

Resultierende Betondemonstratoren (ELO) in drei Varianten (von links nach rechts chronologisch nach Datum der Betonage)



Abb. 137: Bestes Ergebniss der Frontansicht/ V1 (ELO)



Abb. 138: Bestes Ergebniss der Rückansicht/ V3 (ELO)



Abb. 138: Bestes Ergebniss der Seitenansicht/ V1 (ELO)



Abb. 139: Detail Betondemonstrator (ELO)



Abb. 140: Detail Betondemonstrator (ELO)



Abb. 141: Detail Betondemonstrator (ELO)

9.3. Produktion, Ergebnisse und Auswertung von Betondemonstratoren

9.3.3. Ergebnisse der Betonage von „Runkel Fertigteilbau GmbH“



Abb. 142: V. 1 / Frontansicht



Abb. 145: V. 2 / Frontansicht



Abb. 148: V. 3 / Frontansicht



Abb. 143: V. 1 / Rückansicht



Abb. 146: V. 2 / Rückansicht



Abb. 149: V. 3 / Rückansicht



Abb. 144: V. 1 / Seitenansicht



Abb. 147: V. 2 / Seitenansicht



Abb. 150: V. 3 / Seitenansicht

Resultierende Betondemonstratoren (Runkel) in drei Varianten (von links nach rechts chronologisch nach Datum der Betonage)



Abb. 151: Ausschalen eines Demonstrators (Runkel)



Abb. 152: Bestes Ergebniss der Frontansicht/ V3 (Runkel)



Abb. 153: Bestes Ergebniss der Rückansicht/ V3 (Runkel)



Abb. 154: Bestes Ergebniss der Seitenansicht/ V3 (Runkel)



Abb. 155: Detail Betondemonstrator (Runkel)



Abb. 156: Detail Betondemonstrator (Runkel)



Abb. 157: Detail Betondemonstrator (Runkel)



Abb. 158: Detail Betondemonstrator (Runkel)



Abb. 159: Detail Betondemonstrator (Runkel)

9.3. Produktion, Ergebnisse und Auswertung von Betondemonstratoren

9.3.4. Auswertung der Betondemonstratoren

Die Betonagen wurden in den Betonfertigteilwerken zeitversetzt durchgeführt, um auf erste Erfahrungswerte aufbauen zu können. Die ersten Resultate von „Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG“ wurden in einem Expertengespräch erörtert, um optimierte Lösungen für weitere Umsetzungsmaßnahmen in dem Werk von „Runkel Fertigteilbau GmbH“ zu finden.

Die Schalungsträger wurden von der „Firma Maus GmbH Modell- und Formenbau“ gefräst und oberflächenversiegelt den Betonfertigteilwerken zur weiteren Verarbeitung zugestellt.

Um ein Ergebnis mit präzisen, ebenen Sichtbetonoberflächen zu erreichen, musste zunächst eine adäquate Verpackung für die Transportwege sichergestellt werden, so dass die Sandschalungen intakt bleiben.

Trotzdem haben sich stellenweise kleine Risse im äußeren Bereich der Sandschalungen gezeigt (nicht auf der Schalhaut). Marginal konnten auch kleine Spannungsrisse in der Oberflächenversiegelung ausgemacht werden.

Die Handhabung der Schalungen (pro Element ca. 245kg) wurde durch den Einbau von Bewehrungselementen erleichtert, welche Anführungspunkte für die Krananlagen bieten. Die Firma Runkel hat zusätzlich – für eine höhere Flexibilität zur Justierung der Schalungen – die Elemente auf eine mit Trennmittel versehene und beschichtete Holzplatte positioniert.

Die vorversiegelte Schalhaut wurde kurz vor der Betonage mit werkseigenem Trennmittel versehen. Zur Wahl des richtigen Mittels wurde im Vorfeld eine Testreihe durchgeführt (siehe Kapitel 9.1.).

Zur vertikalen Aufstellung und einer passgenauen Zusammenführung als auch Fixierung der Position wurden Spanngurte und Schraubzwingen verwendet. Stellenweise traten beim Zusammenführen von Schalung und Konter Schalungen geringe Toleranzen auf. Diese Ungenauigkeiten mussten mit Füllmaterial abgedichtet werden, um das Austreten des Frischbetons zu verhindern. Einfluss trägt die Abdichtung auf das spätere Kantenbild (Scharfkantigkeit) der resultierenden Betonelemente.

Die Wahl der Betonrezeptur war werksabhängig. Aufgrund der gewünschten feinen Sichtbetonoberfläche, sowie Schlankheit und Form der Geometrie, fiel die Schnittmenge beider Betonfertigteilwerke auf eine Feinkornmischung (Größtkorn 2mm (Sand 0-2)). Abhängig von diesen Faktoren war ebenso die beidseitige Entscheidung (1), ein Fließmittel (2), Entschäumer (3,) Selbstverdichter bzw. leichtverdichtbaren Beton zu verwenden.

Unterschiede gab es in der Wahl des Zements. „Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG“ entschied sich für eine werkseigene UHPC-Compound-Rezeptur mit einem w/z-Wert von 0,17 und einer Beimengung von feinen Stahlfasern (Weidacon FM 015/9). Die Einfüllung des Betons erfolgte von oben. Verdichtet wurde zusätzlich durch den Einsatz eines Rütteltisches.

„Runkel Fertigteilbau GmbH“ verwendete einen frühhochfesten Portland-Normalzement „CEM I 52,5 R“ (Beton DIN EN 206-1/DIN 1045-2) der Firma „Wittekindzement“. Dieser Zement zeichnet sich durch kurze Ausschalfristen und Abbildung von Sichtbetonoberflächen aus. Eingefüllt wurde der Beton ebenfalls von oben. Zur Vermeidung von Lunkern wurde versucht, mit einem Trichter und einem schmalen Kunststoffschlauch die Mischung von unten nach oben in den Schalungen aufzufüllen, um die Fallhöhe der Betonmasse zu umgehen. Durch dieses Verfahren ließen sich keine wertigeren Ergebnisse einstellen und wurde verworfen.

Aufgrund geringer Anforderungen an den Ausstellungs-demonstrator wurde hier im Gegensatz zur Rezeptur von „ELO KG“ auf eine Faserbewehrung verzichtet. Es besteht die Gefahr, dass Fasern aus dem Objekt hervorschauen und damit Angriffsfläche für Korrosion bieten. Auf eine zusätzliche Verdichtungsvariante wurde verzichtet.

Nach ca. 20 Stunden wurden die Betonelemente mit mittlerer Krafteinwirkung aus den Schalungen genommen. Um beim Entschalen ein Ausbrechen der Sandschalungen zu vermeiden und um ein weiteres Abgießen zu gewährleisten, mussten die Betondemonstratoren mit einem Kantenschutz aus den Schalungen gehebelt werden.

Pro Schalungspaar konnten je fünf Demonstratoren betoniert werden. Chronologisch der Intervalle aufsteigend ließ sich allerdings eine Verschlechterung der Oberflächenqualität auf der Schalhaut und im Beton ablesen. Durch ein erneutes Aufsprühen des Schalungsversiegelungsproduktes könnte hier eine weitere und höhere Anzahl an Abformungen durch eine Schalung (bei gleichbleibender Qualität) stattfinden. Es ist empfehlenswert, Oberflächenbearbeitung und Betonage an einem Ort stattfinden zu lassen, um ein schnelles und flexibles Agieren gewährleisten zu können.

Ein stellenweise unruhiges Sichtbetonergebnis (siehe Abb. 119) ist nach Rücksprache mit Experten der Betonfertigteilwerke auf eine instabile Betonmischung und nicht wie eingangs vermutet, auf die Wahl oder Dosierung des Trennmittels zurückzuführen.

Hier konnten innerhalb der Rezepturherstellung und Verbesserung sehr gute Sichtbetonoberflächen erzielt werden (Siehe Abb. 152). Es ist stark davon auszugehen, dass weiteren Abformungen und Optimierungen noch bessere Qualitäten erzielen können.

Die Ausführung der Kantenschärfe, eine geringe Anzahl an Lunkern – trotz der Herausforderung an eine anspruchsvolle und beidseitig gekrümmte Geometrie – ein ebenmäßiger Gesamteindruck der Sichtbetonflächen, Wiederverwendbarkeit und Rückführung der Schalungen als auch die Abbildung extrem schlanker und belastbarer Betonfertigteile sind ein klarer Vorteil des Verfahrens, was in einer 1:1 Umsetzung durch die Realwirtschaft bekräftigt werden konnte.

10. AUSWERTUNG/FAZIT/RESÜMEE

10.1. Ökobilanzierung

In Kooperation mit dem Center for Environmental Systems Research (CESR) der Universität Kassel wurde eine Bewertung der Ökobilanz der Schalungsverfahren im Zuge einer Seminararbeit durch Herrn Jonathan Scheifele erstellt, die von Herrn Dr. Clemens Mostert betreut wurde. Hierfür wurden projektrelevante Parameter erstellt, die folgend auszugsweise abgebildet und zusammengefasst wurden:

10.1.1. Methodischer Rahmen

In der ökobilanziellen Untersuchung wurden drei Verfahren zur Herstellung von Schalungen miteinander verglichen, basierend auf folgenden Formstoffen und zugehörigen Bindern: (1) Holzspan-Stärke, (2) Keramiksand-PU-Harz und (3) Quarzsand-PU-Harz. Als funktionelle Einheit (FE) wurde hierfür eine Freiformschalung mit der in den vorangegangenen Untersuchungen verwendeten Geometrie (siehe z.B. Abb. 92) gewählt, die aus einem Materialblock von 150 x 150 x 150 mm (Volumen: 0,003375m³) gefräst wurde. Die durchschnittliche Umwelteinwirkung der verschiedenen Schalungskörper wurde bei 1.000 Fertigungszyklen herangezogen. Darüber hinaus wurde - zwecks Vergleichbarkeit der Produktsysteme - angenommen, dass die Qualität des resultierenden Betonabgusses von gleicher Qualität ist. Der ökobilanzielle Vergleich wurde auf Grundlage einer lebenszyklusweiten Betrachtung (Cradle to grave) angestellt.

Zur ökobilanziellen Bewertung der Schalungen wurden folgende Wirkungskategorien und -indikatoren herangezogen:

- > Produkt-Klimafußabdruck (PCF) mit zugewiesenem Global Warming Potential (GWP)
- > Produkt-Energiefußabdruck gemessen durch den Kumulierten Energieaufwand (KEA)
- > Produkt-Materialfußabdruck (PMF) mit Indikatoren Raw Material Input (RMI) und Total Material Requirement (TMR)
- > Produkt-Wasserfußabdruck bestimmt mit dem Available Water Remaining (AWARE)-Bewertungsverfahren

Für die Modellierung und Bewertung wurde die open-source Software openLCA, Version 1.10.2 verwendet. Für die Bereitstellung von Hintergrunddaten kam die Ökobilanzdatenbank ecoinvent (version 3.5 cut off units) zum Einsatz. Werte außerhalb der Datenbanken mussten zeitintensiv erarbeitet werden.

10.1.2. Lebenszyklusanalyse

Folgend wurden grundsätzliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Lebenszyklus der verschiedenen Verfahren betrachtet und die Schalungssysteme in ihre Lebenszyklusphasen nach Norm EN 15804:2012+A1:2013 unterteilt: Herstellungsphase (A), Nutzungsphase (B) und Entsorgungsphase (C) (Abb.160).

In Phase A1 (Rohstoffgewinnung) kommen neben Primärrohstoffen auch Rest- und Abfallstoffe aus der Industrie als Sekundärrohstoffe als auch ein Teil, der aus dem Recycling zuvor verwendeter Schalungen stammt, zum Einsatz. Phase A3.1 (Material-Herstellung) beinhaltet die Herstel-

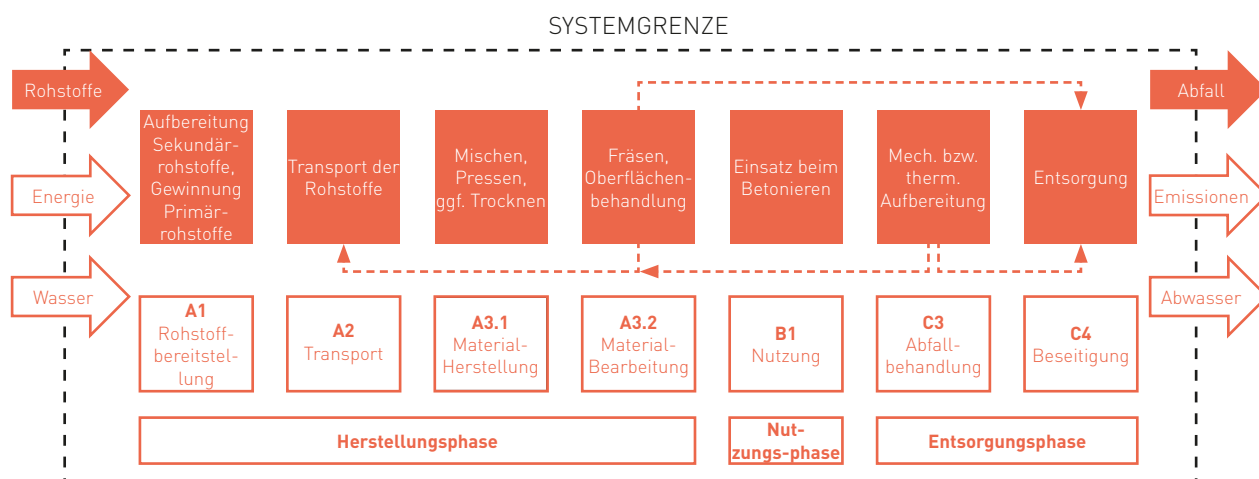


Abb. 160: Lebenszyklusanalyse der betrachteten Schalungssysteme nach den Lebenszyklusphasen der DIN EN 15804 mit Darstellung der Materialflüsse

lung der Schalungsrohlinge, die sich je nach Verfahren unterscheiden (siehe Kapitel "3. Verfahrensprozesse & Rezepturen zur Herstellung von Schalungsrohlingen"). In Phase A3.2 (Materialbearbeitung) wird die Schalung gefräst und die dabei entstehenden Späne werden recycelt und fließen in die Produktion einer neuen Schalung ein. Der Prozess der Betonage (Nutzungsphase B1) wurde nicht betrachtet, da nicht der resultierende Betonabguss, sondern seine Schalung bilanziert wurde. Das bei der mechanischen und/oder thermischen Aufbereitung zurückgewonnene Material fließt als Sekundärrohstoff zur Herstellung neuer Schalungsrohlinge in den Materialkreislauf ein. Dabei fällt ein geringer Teil im Recyclingprozess als Materialausschuss an und wird entsorgt.

10.1.3. Sachbilanz

Der überwiegende Teil der Daten (z.B. Gewicht, Rezepturzusammensetzung, Laufzeiten der verwendeten Maschinen, Anpressdruck etc.) stammen aus den Forschungsuntersuchungen. Weitere Parameter wie die stoffliche Zusammensetzung der eingesetzten Produkte wurden den jeweiligen Produktdatenblättern entnommen oder durch Angaben beim Hersteller eingeholt. Für einige Stoffe musste bei der Modellierung dennoch auf chemische Vorprodukte zurückgegriffen werden, da nicht alle Stoffe und Prozesse in der Datenbank vorhanden waren.

Für den Holzspan wurde definiert, dass es sich um ein Abfallprodukt aus der zerspanenden Industrie handelt und dieser somit belastungsfrei zur Verfügung steht. Die Annahmen für die in Einsatz kommenden Maschinen wie Mischer, Presse, CNC-Fräsmaschine, Brecher und thermische Aufbereitungsanlage basieren auf Energieverbräuchen von gängigen Modellen. Der Energieverbrauch der Fräsmaschine wurde für alle betrachteten Verfahren vereinheitlicht. Des Weiteren wurden für die Materialverluste Annahmen getroffen, da diese u.a. von Einstellungen der Brecher abhängen (Abb. 161).

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die durchschnittlichen Materialaufwendungen der einzelnen Verfahren in kg pro Schalung bei 1.000 Fertigungszyklen. Darunter veranschaulicht eine Grafik die Unterschiede der Materialaufwendungen pro FE (Abb. 162-163).

Die Energieaufwendungen lassen sich in die Bereiche Transport der Vorprodukte, Herstellung der Schalungsrohlinge und Rückführung der Schalungen kategorisieren. Dabei wurden die Transporte nur für die Formgrundstoffe modelliert. Die Energieverbräuche für die Produktion der Vorprodukte konnten nur für den Keramiksand ermittelt werden. In Abbildung 164 sind die Energiedaten für die relevanten Prozesse mit den jeweiligen Strominputs in kWh aufgeführt. Abbildung 165 zeigt darüber hinaus die Materialmenge, die pro Schalung thermisch verwertet bzw. deponiert werden.

SCHALUNG	HOLZSPAN	QUARZSAND	KERAMIKSAND
Formgrundstoff	Reststoff	Reststoff	Produkt
Materialverlust pro Fertigungszyklus	Versiegelung: 100% Wasser: fast 100% Rest: 2%	Sand: 2,5% Binder: 50% Versiegelung: 50%	Sand: 2,5% Binder: 50% Versiegelung: 50%
mechanische Aufbereitung	nach jedem Fertigungszyklus	nach jedem Fertigungszyklus	nach jedem Fertigungszyklus
thermische Aufbereitung	nein	nach 40 Fertigungszyklen	nach 40 Fertigungszyklen

Abb. 161: Wiederverwendbarkeit, Materialverlust und Aufbereitung für die betrachteten Schalungsvarianten

MATERIAL	HOLZSPAN	MAISSTÄRKE	PROPIONSÄURE	CALCIUM-CARBONAT	LATEX	WASSER
[kg]	0,02494	0,00748	0,00052	0,00035	0,00850	1,72004

Abb. 162: Materialaufwendungen pro FE Holzspan-Schalung bei 1.000 Fertigungszyklen

MATERIAL	KERAMIKSAND / QUARZSAND	PUROLIT-HARZ	PENTEX-HÄRTER	(MUENCH-VERSIEGLER)
[kg]	0,13765	0,05294	0,05294	(0,04)

Abb. 163: Materialaufwendungen pro FE Sand-Schalung bei 1.000 Fertigungszyklen

PROZESS	HOLZSPAN	QUARZSAND	KERAMIKSAND
Produktion Vorprodukte	-	-	0,12585 kWh
Transport Vorprodukte	0,11886 tkm	0,01349 tkm	2,65978 tkm
Produktion der Schalungen	Zwangsmischer: 0,0028 kWh Hydraulikpresse: 0,025 kWh CNC-Fräsmaschine: 0,7 kWh	Zwangsmischer: 0,00189 kWh Hydraulikpresse: - CNC-Fräsmaschine: 0,7 kWh	Zwangsmischer: 0,00189 kWh Hydraulikpresse: - CNC-Fräsmaschine: 0,7 kWh
Recycling	Schredder: 0,0258 kWh	Brecher: 0,00577 kWh Therm. Aufbereitungsanlage: 0,01534 kWh +0,01063 m³ Erdgas	Brecher: 0,00577 kWh Therm. Aufbereitungsanlage: 0,01534 kWh +0,01063 m³ Erdgas

Abb. 164: Energiedaten pro FE für die betrachteten Schalungen

PROZESS	HOLZSPAN	QUARZSAND	KERAMIKSAND
Thermische Verwertung	Sämtliches Schalungsmaterial: 0,04178 kg	Binder: (Muench Versiegler: 0,04 kg)	Binder: (Muench Versiegler: 0,04 kg)
Deponierung	-	Quarzsand: 0,13765 kg	Keramiksand: 0,13765 kg

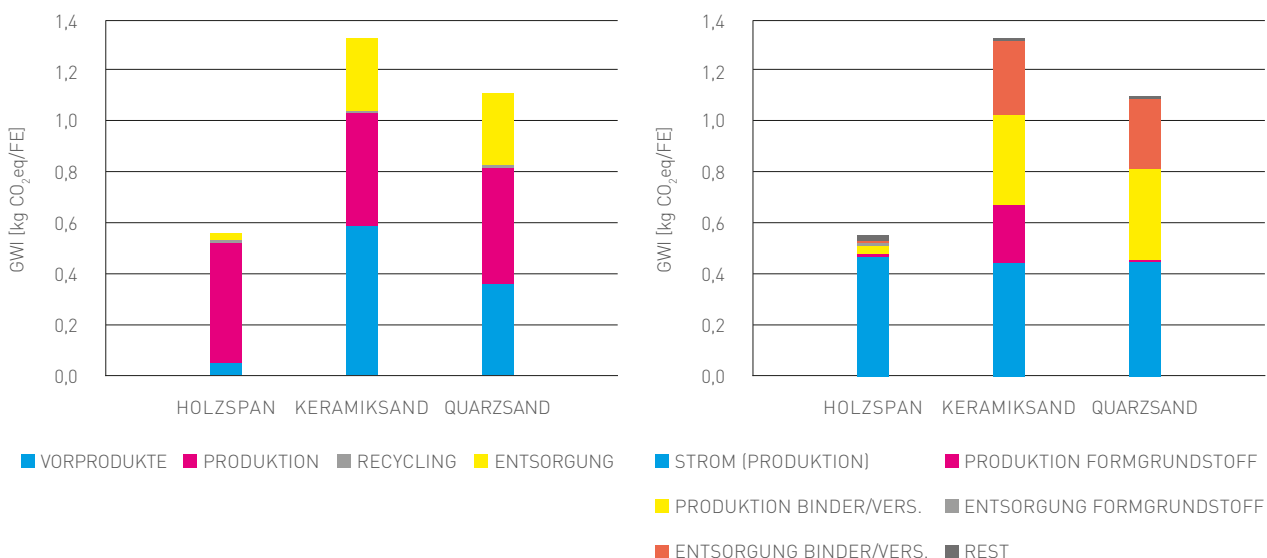
Abb. 165: Entsorgte Materialmengen pro FE für die betrachteten Schalungen

10.1.4. Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden folgend durch den Klima-, Material- und Wasserfußabdruck mit den jeweiligen Wirkungsindikatoren GWI, RMI und AWA-RE dargestellt. Die Darstellungen gliedern sich nach den Herstellungsprozessen (Produktion der Vorprodukte, Herstellung der Schalungsröhlinge, Recycling und Entsorgung). Darüber hinaus identifiziert eine Hot-Spot-Analyse die größten Treiber für die Werte der Wirkungsindikatoren nach folgenden Beiträgen: Strom (Produktion), Produktion

Formgrundstoff, Produktion Binder/ Versiegler, Entsorgung Formgrundstoff, Entsorgung Binder/ Versiegler.

Abbildung 168 zeigt den Produkt-Klimafußabdruck für die Schalungen als GWI in kg CO₂-Äquivalenten pro FE. Den geringsten Produkt-Klimafußabdruck weist das Holzspan-Stärke-Verfahren mit 0,55 kg CO₂eq auf, gefolgt von der Quarzsand- sowie der Keramiksand-Schalung mit nahe beieinanderliegenden Werten von 1,1 und 1,3 kg CO₂eq. Die Hot-Spot-Analyse zeigt, dass der Stromverbrauch in der Herstellung der Schalungsröhlinge bei allen Verfahren na-

Abb. 168: Produkt-Klimafußabdruck (Global Warming Impact in kg CO₂eq pro FE) nach Lebenszyklusphasen (links) und Hot-Spot-Kategorien (rechts)

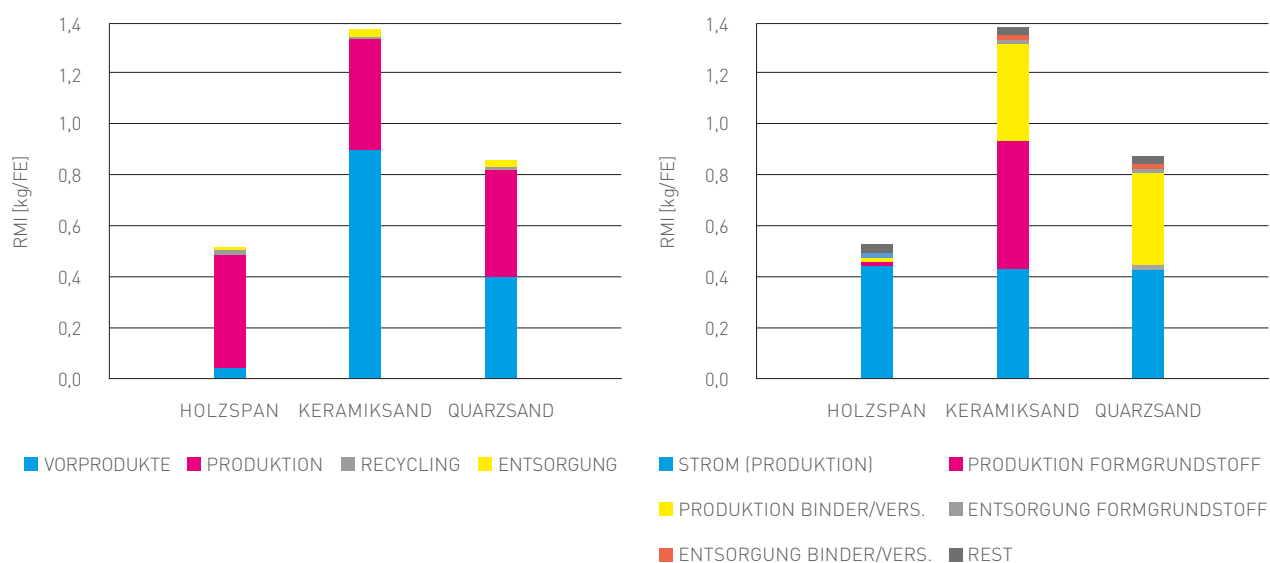


Abb. 169: Produkt-Materialfußabdruck (angegeben in Raw Material Input in kg pro FE) nach Lebenszyklusphasen (links) und Hot-Spot-Kategorien (rechts)

hezu gleich ist und insbesondere die Produktion und Entsorgung der Binder, die bei Quarzsand- und Keramiksand-Schalungen Treibhausgase freisetzt, ausschlaggebend für das Resultat sind. Im Gegensatz zur Holzspan- und Quarzsand-Schalung, die belastungsfrei als Abfallstoffe zur Verfügung stehen, verursacht die Produktion des Keramiksand-ses zusätzliche Emissionen.

Beim Produkt-Materialfußabdruck, angegeben als RMI in kg Rohstoff pro FE, zeigt sich ein ähnliches Bild (Abb. 169). Auch hier schneidet die Holzspan-Schalung mit 0,5 kg/FE am besten ab, gefolgt von der Quarzsand-Schalung mit einem Wert von 0,9 kg/FE. Allerdings verursacht das Keramiksand-Verfahren mit fast 1,4 kg/FE den größten Rohstoffbedarf und liegt damit deutlich über den restlichen

Verfahren. Grund hierfür sind erneut die Anteile des Binders und insbesondere die Produktion des Keramiksands mit ca. 0,5 kg/FE. Die Vorprodukte der Holzspan-Schalung zeigen einen relativ niedrigen RMI-Wert, da die Mengen an Binder/ Versiegler pro FE sehr gering ausfallen.

In Abbildung 170 sind die Ergebnisse des Produkt-Wasserfußabdrucks als AWARE in m³ Wasser pro FE dargestellt. Auch hier ist die Rangfolge gleich, allerdings bietet die Holzspan-Schalung mit 6,7 m³/FE gegenüber der Quarzsand-Schalung mit einem Wert von 7,8 m³/FE nur geringe Vorteile. Mehr als doppelt so hoch liegt der Wasserfußabdruck der Keramiksand-Schalung (17,6 m³/FE), da die Produktion des Formgrundstoffs sehr wasserintensiv zu sein scheint.

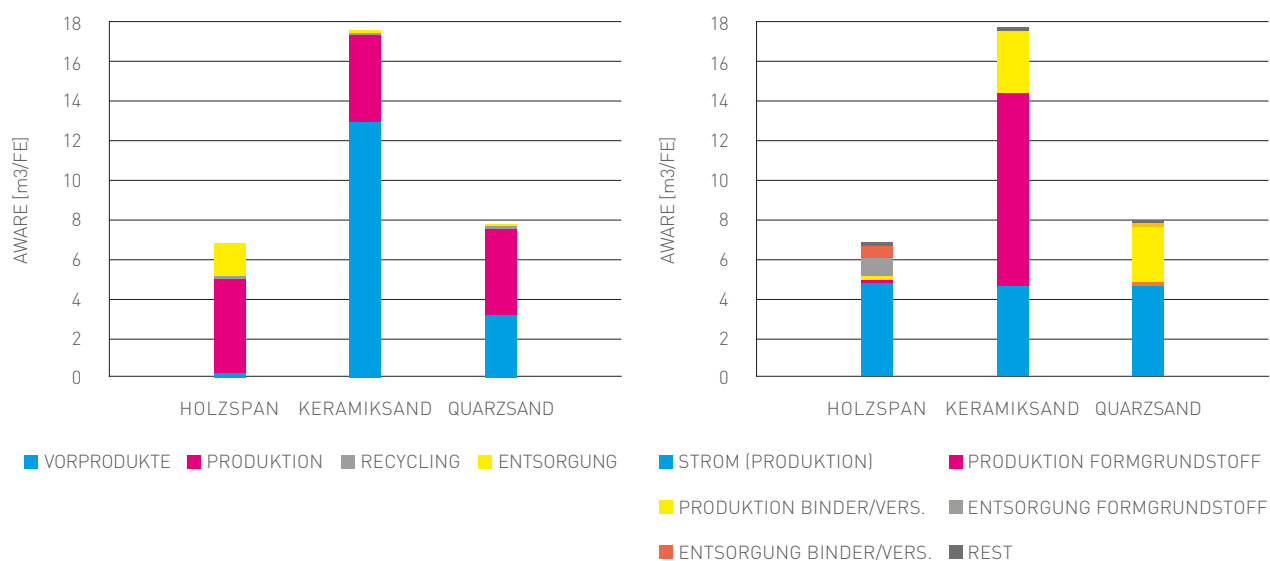


Abb. 170: Produkt-Wasserfußabdruck (angegeben in AWARE in m³ pro FE) nach Lebenszyklusphasen (links) und Hot-Spot-Kategorien (rechts)

SCHALUNG	KLIMA GWI [kg CO ₂ -Eq/FE]	MATERIAL RMI [kg Rohstoff/FE]	WASSER AWARE [m ³ Wasser/FE]
Holzspan	0,55	0,50	6,73
Quarzsand	1,11	0,85	7,83
Keramiksand	1,33	1,36	17,63

Abb. 171: Ermittelte Werte der Wirkungsindikatoren (GWI, RMI und AWARE) pro FE für die betrachteten Schalungen

10.1.5. Auswertung der Ergebnisse

Dank der Hot-Spot-Analyse konnten signifikante Parameter identifiziert werden, um die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auszuwerten und einen ökobilanziellen Vergleich für die unterschiedlichen Schalungsvarianten zu erstellen (Abb. 171-172).

Für den Stromverbrauch ergeben sich bei allen Verfahren nur sehr geringfügige Unterschiede, sodass die Herstellungsphase der Schalungsrohlinge keine wesentlichen Differenzen der Indikatorwerte erklären. Auch der Energieverbrauch, der beim Recycling der Schalungen anfällt, hat kaum einen Effekt auf die Wirkungsabschätzung.

Dagegen hat der Stromverbrauch der Fräsmaschine bei allen Verfahren einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung. Mit 0,7 kWh pro FE (bei allen Verfahren) ist er für 26-88% des Gesamtwerts des Wirkungsindikators pro FE verantwortlich. Wesentliche Unterschiede bei den Schalungsvarianten ergeben sich insbesondere durch die Produktion und den Gewichtsanteil des Formstoffbinders. Der Materialaufwand verursacht bei der Quarzsand-Schalung beispielsweise 41-58% der Umwelteinwirkungen.

Diese signifikante Problematik wurde bereits innerhalb der Projektlaufzeit identifiziert und als Negativ-Parameter beschrieben. Dank der Nutzung von Reststoffen fallen bei Holzspan- als auch Quarzsand-Schalungen keinerlei Emissionen für den Formgrundstoff an, da dieser belastungsfrei zur Verfügung steht. Anders ist dies bei Keramiksand-Schalungen, bei denen die Produktion des Formgrundstoffs für 17-56% der Indikatorwerte verantwortlich ist. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Holzspan-Schalungen in den untersuchten Wirkungskategorien die geringste

Umweltbelastung verbunden ist. Aufgrund des verwendeten Altsandes erzielen Quarzsand-Schalungen bessere Werte als Keramiksand-Schalungen. Eine Verbesserung der ökobilanziellen Ergebnisse könnte sich bei beiden Sand-Verfahren durch den Einsatz anderer Bindemittel ergeben. Untersuchungen mit Stärke haben bei Quarzsand-Schalungen jedoch gezeigt, dass sich hierdurch längere und energetisch aufwendigere Trocknungsprozesse ergeben.

10.1.6. Lösungsansätze zur Verbesserung der ökologischen Verträglichkeit

Es lässt sich wie folgt zusammenfassen und kohärente Lösungsansätze ableiten:

- > Für eine höhere ökologische Verträglichkeit muss eine alternative Bindemittelvariante für Sandschalungen gefunden werden, die geringere vorgelagerte Produktionsindikatoren aufweisen.
- > Eine Reduktion des Energieverbrauchs bei Fräsprozessen durch Verwendung von Strom aus nachhaltigen alternativen Energiequellen.
- > Auf die Verwendung und somit die Produktion von Keramiksand kann verzichtet werden und als Alternative auf Quarzsand, als bereits bestehender Reststoff zurückgegriffen werden. Zusätzliches Freisetzen von Emissionen kann vermieden werden.
- > Die Eigenlast bzw. eine hohe Materialaufwendung für die Erzeugung von Sandschalungen wirkt sich negativ auf die Bilanzierung aus. Lösungswege wurden dazu in Kapitel 9 beschrieben.

SIGNIFIKANTE PARAMETER	HOLZSPAN	QUARZSAND	KERAMIKSAND
Stromverbrauch Fräsmaschine	x	x	x
Binderanteil	-	x	x
Materialausschuss	-	-	x

Abb. 172: Identifizierte Parameter mit signifikantem Einfluss auf die Werte der untersuchten Wirkungsindikatoren (GWI, RMI und AWARE)

10.2. Resümee

Das Formsand-Verfahren überzeugte zwar durch eine einfache Handhabung und wenig Additive, doch waren sowohl geringe Festigkeitswerte bzw. Formstabilität, welche den Transport und das Handling der Schalungen erschweren, als auch die Oberflächengüte der Schalungshaut nicht ausreichend, um als industrielles Verfahren in Betracht gezogen zu werden. Aus diesen Gründen wurde der Formsand im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit vernachlässigt.

Quarzsand-Stärke-Schalungen wiesen hohe Festigkeiten auf, doch stellte sich die resultierende Schalungshaut als zu rau heraus und entsprach nicht den erforderlichen Bedingungen an Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung (Sichtbetonklasse 4). Ein weiteres Ausschlusskriterium war ein schlechtes Abtrocknen im Formstoffkern, was eine Schimmelbildung im Inneren der Proben begünstigte, trotz zeit- und energieintensiver Trocknung und dem Zusatz von Additiven.

Quarzsand-Wasserglas-Schalungen überzeugten durch hohe Festigkeitswerte. Aber auch hier zeigte sich, dass die Oberflächengüte nicht optimal ist. Ein eklatanter Faktor für den Ausschluss dieses Verfahrens ist, dass die Rückführbarkeit durch das allmähliche „Verglasen“ der Sandkörner, also das Anreichern des Alkalisilikats auf deren Oberfläche, nur drei Prozesszyklen ermöglicht, bevor der Binder in einem hochenergetischen Verfahren ausgewaschen und der Formgrundstoff getrocknet werden muss. Dies entspricht nicht dem Vorhaben zur Einhaltung eines repetitiven Materialkreislaufs.

Bereits in anderen Bereichen etablierte Verfahren und/oder Materialien konnten Annäherungswerte zum Verlauf der Forschungsarbeiten liefern. Das Holzspan-Stärke-Verfahren war jedoch zur Zeit der Bearbeitung unerforscht und barg eine Menge Forschungsinput. Doch wies das Verfahren durch seine hohe Oberflächengüte und das geringe Gewicht der Schalungen großes Potenzial auf, was weitere Forschungsarbeiten im Sinne von Nachhaltigkeitsaspekten lohnenswert macht. Auch die positiven Erkenntnisse über den möglichen Einsatz jeglicher Holzarten (abhängig von Spanlängen), eine positive Ökobilanz und die umstandslose und mannigfache Rückführung der Schalungen bestärken das Verfahren. Neben den grundlegenden, materialtechnischen Vorteilen des Formstoffs, stellen auch die einfache Implementierung in bestehende Betriebe und Produktionsweisen, sowie der geringe Werkzeugverschleiß große Vorteile gegenüber allen anderen Verfahren dar.

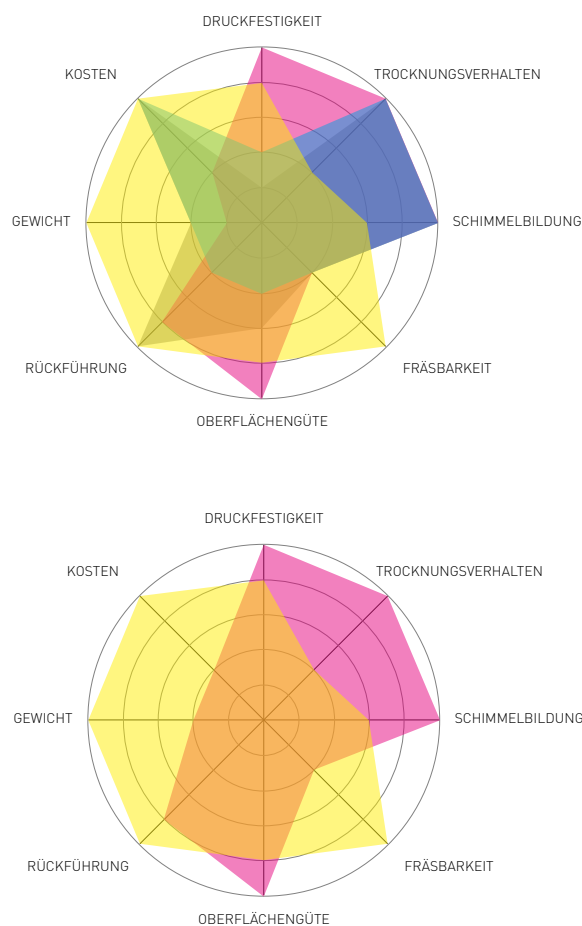


Abb. 173: Verfahrensvergleich

■ KERAMISAND ■ FORMSAND ■ QUARZSAND ■ HOLZSPAN

Großer Forschungsbedarf lag hier insbesondere im Ausloten der richtigen Trocknungsweise zur Verfestigung des Formstoffs. Weiterhin war das Aufquellen der Schalungen im Trocknungsprozess und die Minimierung von Riss- und Schimmelbildung ein zu erforschendes Themengebiet. Erkenntnisse aus den Forschungsfragen wurden anhand von Skalierungsschritten überprüft und neue Strategien für einen optimierten Herstellungsprozess durch ein Lagenprinzip entwickelt. Das Prinzip weist ein hohes Potenzial hinsichtlich einer schnellen schimmelfreien Lufttrocknung und einer gezielten Anfertigung von Schalungsrohlungen durch eine additive Schichtung auf, ohne qualitative Einbußen von Oberflächenqualitäten nach einer subtraktiven Bearbeitung. Vorstellbar sind weitere bauaffine Anwendungen wie z.B. Akustikpaneele oder Dämmelemente mit hohen Krümmungsgraden die in einem folgenden/aufbauenden Forschungsprojekt erprobt und optimiert

werden sollen (eingereicht bei Zukunft Bau mit dem Titel: "Holzspangefertigte, kreislauffähige und funktionsintegrierte Bauteile mit hohen Krümmungsgraden" (Förderrunde 2020)).

Das im Forschungsantrag ursprünglich nicht vorgesehene Keramiksand-PU-Harzverfahren erzielte Proben mit den höchsten Festigkeitswerten. Prüfverfahren und Versuchsdemonstratoren zeigten, dass hier großes Potenzial bezüglich der Oberflächengüte liegt (höchste gestalterische Ansprüche entsprechend SB4) und anderen bereits etablierten Schalungsverfahren, wie Polystyrolschalungen, qualitativ gleichwertig gegenübersteht.

Die Oberflächenbehandlung ist verhältnismäßig unaufwändig. Eine mehrfache Abformen bzw. Betonieren einer Geometrie ist problemlos möglich, ohne eine neue Beschichtung auftragen zu müssen. Die Anzahl an Rückführungszyklen ist hoch und die Einhaltung eines geschlossenen und sortenreinen Materialkreislaufs ist gegeben.

Die Versiegelung der stark saugenden Schalungen sind hingegen in Materialaufwendung und Auftragsintervallen aufwendig. Hierzu wurden in Kapitel 5.3 und 10.1.6. entsprechende Lösungsansätze entwickelt.

Wie im Forschungsantrag beschrieben wurde nach einer breiten experimentellen Anfangsphase mit nur einem geeigneten Formstoffen bzw. Verfahren fortgefahren. Aufgrund von Festigkeitswerten, der Oberflächengüte und nicht zuletzt den Rückföhreigenschaften stand das Keramiksand-PU-Harz-Verfahren im Zentrum der weiteren Forschung.

Die gesammelten Erkenntnisse wurden in Form von großmaßstäblichen Demonstratoren skaliert und überprüft. In Kooperation mit den forschungsbeteiligten Projektpartnern konnte eine Infrastruktur für die Einführung der Keramiksand-Schalungen als industrielles Verfahren geschaffen werden. In Zusammenarbeit mit den Industriepartnern wurde eine Optimierung der Oberflächenbehandlung vorgenommen sowie das Ausloten geeigneter Trennmittel bei Verwendung unterschiedlicher Betonrezepturen.

Für eine höhere ökologische Verträglichkeit der Verfahren wurden folgende Maßnahmen unternommen:

Durch digital versierte Anpassungen von Schalungsgeometrien und eine kohärente Optimierung von Herstellungsprozessen wurde ein großflächiges subtraktives Abtragen von Formstoffen unterbunden. Ebenso wurden Strategien entwickelt zur Reduzierung des hohen Eigen-

gewichts von Keramiksand-Schalungen (Kapitel 9 „EX-KURS Reduzierung des Eigengewichts von Sandschalungen“)

Aufgrund der zuvor genannten Faktoren und die reale Erprobung durch die Umsetzung eines 1:1 Demonstrators unter Fertigungsbedingungen (siehe Kapitel 9.3) kann das Keramiksand-PU-Harzverfahren als ein nachhaltiges industrielles Verfahren in Einsatz gebracht werden.

Die einzelnen Verfahren wurden darüber hinaus in Bezug auf ihre wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeitsaspekte in einer Ökobilanzierung ausgewertet (siehe Kapitel 10). Positiv wurde das Holzspan-Stärke-Verfahren bewertet hinsichtlich seiner ökologischen Verträglichkeit, da als Formstoff als auch Binder auf nachwachsende Rohstoffe – als zusätzlich anfallende Abfallprodukte – zurückgegriffen wurde. Sandschalungen erhalten vergleichsweise eine nachteiligere Bilanzierung, was auf vorgelagerte Prozesse des Binders auf Basis von Polyurethan schließen ließ. Hier wurde bereits in Kapitel 10.1.6. ein Lösungsansatz formuliert.

Durch eine nachhaltige Arbeitsweise, wie etwa bereits bestehende Maschinen und Ressourcen zu nutzen, die Verwendung von kostenlosen Abfallprodukten und die Kooperation mit universitätsinternen Fachbereichen sowie Industriepartnern aus der freien Wirtschaft konnte der Budgetrahmen eingehalten werden.

10.3. Anwendung der Forschungsergebnisse

Maßnahmen zur Anwendung der Forschungsergebnisse in der Praxis

Das Projekt war darauf ausgelegt, gewonnene wissenschaftliche Grundkenntnisse mit Hilfe von Industriepartnern in Versuchsbauteile umzusetzen, um somit einen Transfer des Wissens in die Praxis/ Wirtschaft zu gewährleisten. Durch eine enge Kooperation und einen stetigen Kommunikationsfluss mit Industrie, Wirtschaft und interdisziplinären Forschungsbereichen wurde eine zügige Umsetzung der gewonnen Erkenntnisse/ des Verfahrens und die Realisierung von Versuchsbauteilen gewährleistet.

Wie im Antrag als auch hier im Bericht genannt, war das Projekt – nach einer breit aufgestellten Materialforschung – auf die Umsetzung eines Materials und Verfahrens in einen 1:1 Demonstrator ausgelegt. Aufgrund eines wesentlich höheren Forschungsbedarfs wurde auf die Umsetzung von holzspanbasierten Schalungen (nach einer 1:2 Umsetzung) verzichtet und mit Hilfe von Industriepartnern zur Umsetzung eines Bauteils auf sandbasierte Schalungen zurückgegriffen.

Architekturbüros haben bereits konkrete Anfragen gestellt, die an einer nachhaltigen Umsetzung von komplexen Betongeometrien auf Basis von Sandschalungen interessiert sind. Hier versteht sich das Projektteam als Projektleitung und kommuniziert auch nach Abschluss des Projektes alle Informationen und Aufträge an bereits involvierte und eingespielte Industriepartner zur Umsetzung der Anfragen in die Praxis. Für einen verstärkten Markteintritt empfiehlt es sich, an passgenauen Ausschreibungen teilzunehmen, um den Einsatz in der Praxis weiter zu fördern und gleichzeitig die Bekanntheit zu steigern.

Da sich die Anwendung im großen Maßstab ausschließlich auf den Formstoff Sand bezogen hat (Sandschalungen), wird beabsichtigt das hier erfolgreich abgeschlossene Projekt durch ein Folgeprojekt zu komplettieren, stärken und fortzuführen, welches sich nur noch auf holzspangefertigte Bauteile mit hohen Krümmungsgraden spezifiziert. Mit der Entwicklung eines innovativen, nachhaltigen Materialsystems auf Basis von Altholz soll eine Vielzahl an Bauanwendungen/ Bauteilen abgebildet und eine zukünftige Marktreife vorbereitet werden können. Das geplante Forschungsprojekt mit dem Titel "Holzspangefertigte, kreislauffähige und funktionsintegrierte Bauteile mit hohen Krümmungsgraden" wurde in der Förderrunde 2020 ebenso bei der "Forschungsinitiative Zukunft Bau" eingereicht.

In welcher Form die Fachwelt über die Forschungsergebnisse unterrichtet werden soll.

Bereits getätigte Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit:

- 1.) Artikel in der DBZ (Deutsche BauZeitschrift)
Experimentelles Bauen – junge Köpfe in der Materialfertigung
- 2.) Artikel im Zukunft Bau Journal
Das Bauen von Morgen
- 3.) Projektpräsentationen
(internes als auch externes Publikum)
- 4.) Lehre an der Universität Kassel
(z.B. Seminar rethinking:waste)
- 5.) Entwicklung einer Forschungsplattform (SUCO)
- 6.) Virale Streuung durch Videofrequenzen
z.B. in Social-Media-Kanälen wie:

Vimeo: [edekkassel](#)

Instagram: [rethinking.waste](#)

Weiterhin soll die Veröffentlichung von Forschungsergebnissen über Publikationen in Fachmedien erfolgen – wie z.B. Fachzeitschriften, Fachbüchern und Online-Diensten.

Die Teilnahme an Projektpräsentationen und nationalen als auch internationalen fachspezifischen Konferenzen bot/ bietet nicht nur die Präsentation eigener Ergebnisse, sondern ebenfalls eine Plattform für Wissenstransfer und Austausch.

In zusätzlichen Seminaren und Workshops innerhalb der Universität Kassel wurde und soll weiterhin das Wissen transportiert, diskutiert und erweitert werden. Die Ergebnisse, die in schriftlicher- als auch in Form von Prototypen vorliegen, wurden/ werden durch Publikationen und Ausstellungen zugänglich gemacht.

Ergebnisse sollen auf einer eigenen Projekt-Website und auf Social-Media-Kanälen des Fachgebiets aufbereitet und positioniert werden. Angestrebt wird auch, das Projekt aktiv auf Fach-Messen zu etablieren. Prototypen können beispielsweise auf Messepräsenzen von „Zukunft Bau“ oder Industriepartnern ausgestellt werden.



Abb. 174: Präsentation der Forschungsergebnisse auf dem Videoportal vimeo

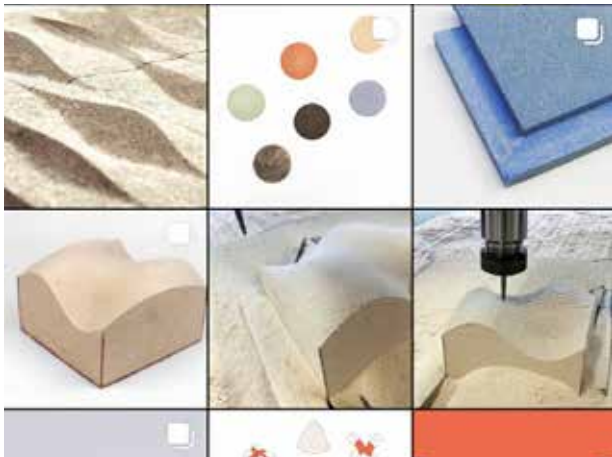


Abb. 175: Instagram



Abb. 176: Entwicklung der Forschungsplattform SUCO



Abb. 177: Seminar „rethinking:waste“

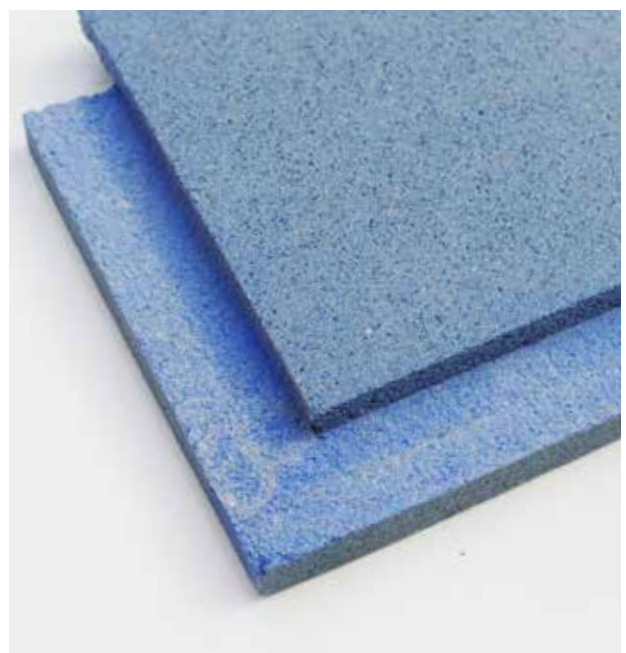


Abb. 178: Seminar „rethinking:waste“

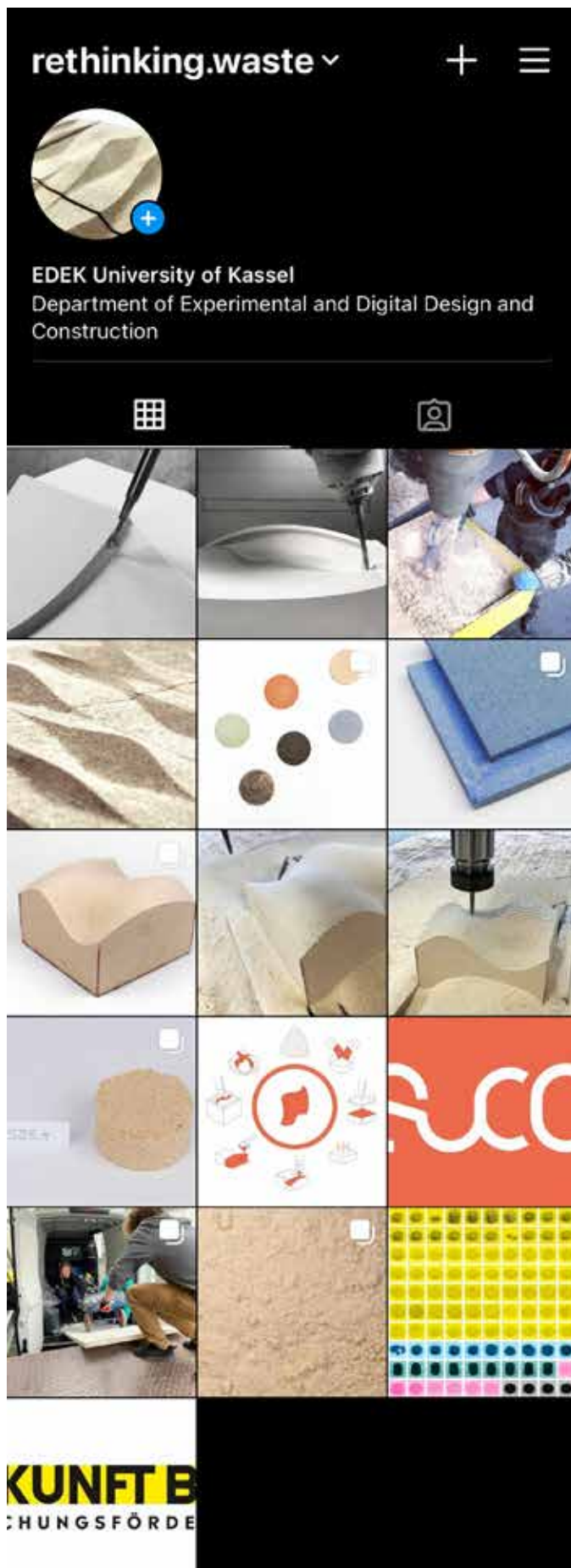


Abb. 179: Instagram-Account

rethinking : waste -

Vom Abfall zur Form

Die Möglichkeiten und Entwicklung der digitalen Formfindung steigen, doch fehlt es in der Praxis noch immer an einer nachhaltigen Umsetzung und Realisierung komplexer architektonischer Geometrien. Diese können nach dem jetzigen Stand der Technik nur unter Aufwendung hoher Material- und Ressourcenverschwendung hergestellt werden und/oder aus Mangel an Umsetzungsvermögen und Kostengründen nur partiell realisiert werden.

So bedient sich der konventionelle Betonbau zur Realisierung komplexer Geometrien des Fräsens von Kunststoffen, die eine negative Ökobilanz aufweisen und eine Menge an grauer Energie beinhalten. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Schalungen nur eine Form abbilden können, bevor sie als Sondermüll entsorgt werden. Das Ziel der Forschungsarbeit ist es, ein nachhaltiges, kreislauffähiges Schalungsverfahren auf Basis von Abfallprodukten für komplexe Geometrien zu entwickeln, die einen schnellen und wirtschaftlichen Einsatz ermöglichen. Altholz und Altsand fallen in der Industrie in großen Mengen an. Gleichzeitig sinkt die Anzahl der Deponien und der Druck im Umgang und zur notwendigen Verwertung von Abfällen steigt. Neben der Verfügbarkeit und der geringen Kosten ist ein weiterer Vorteil, dass durch den Verzicht auf schädliche Additive im Verfahren ein sortenreiner Kreislauf und eine doppelte Aufwertung des Grundstoffes durch problemlose Rückbaumöglichkeiten von Bauteilen entsteht. Auch bei den Fräsprozessen aufkommender Sand- bzw. Holzspan kann

ebenso in den Materialkreislauf rückgeführt werden. Für das Forschungsprojekt wurden zwei Abfallstoffe für Schalungen untersucht: Sand und Span.

rethinking:sand - Vom Korn zur Form

Innerhalb der Forschungsarbeit wird Altsand als Betonschalung für ultradünne und komplexe Geometrien erforscht und praxisorientiert in einem großmaßstäblichen Demonstrator umgesetzt. Zur Herstellung von Sandschalungen wird dem Formgrundstoff ein Binder auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen zugesetzt und im Mischer hochtourig vermengt. Bereits nach ca. 40 – 60 Minuten kann das Formstoffgemisch als Sandformteile entformt und in Form gefräst werden. Großer Aufwand ist in die Ermittlung eines nachhaltigen Oberflächenversiegelungsproduktes geflossen, das als Kontaktfläche zwischen Schalhaut und Beton diesen schützen und glätten soll, ohne jedoch durch schädliche Additive eine sortenreine Rückführung der Schalungen zu gefährden. Die Anwendung eines



Herstellung des großmaßstäblichen Demonstrators der Sandschalung: **1** Formherstellung, **2** Fräsen der Schalung und **3** Schalungsdetail

Trennwachses in Kombination mit den sehr feinen Sand-Oberflächen erzielt gute Ergebnisse.

Die hier beschriebene Sandschalung ermöglicht extrem stabile und ultrafeine Sandoberflächen. Außerdem kann eine Form mehrfach abgeformt werden (durch eine spezielle Beschichtung, die sich nach der Verwendung von der Schalung abtrennen und recyceln lässt), oder kann die Schalung in einem langlebigen Kreislauf sogar rückgeführt und neu geformt werden. Die Rückführung kann durch einen „Brecher“ stattfinden, in dem die Sand-

Abb. 180: Artikel im Zukunft Bau Journal / Das Bauen von Morgen S. 1



Anwendungsbeispiel für gestaltete Akustik-elemente nach der subtraktiven Bearbeitung von Holzspanrohlingen



formen gerüttelt werden, bis sie auseinanderfallen.

Zur Betonage der Schalungen wird eng mit Betonfertigteilwerken zusammengearbeitet. Die Stabilität eignet sich gut für den Transport und die Handhabung in einer Fertigteilproduktion. Auch können die Anforderungen an glatte Sichtbetonoberflächen, aber auch strukturfähige, bildgebende Oberflächen erfüllt werden.

rethinking:wood - Vom Span zur Form

Bis 2050 soll die stoffliche Altholznutzung von 1,2 auf 4,2 Mio. Tonnen steigen. Daher

gilt es alternative Einsatzmöglichkeiten für diese Rohstoffe zu entwickeln, damit diese nicht einfach nur verbrannt oder deponiert werden. Die Entwicklung eines ressourceneffizienten Halbzeugs auf Basis von zerspantem Restholz ist Teil der Materialforschung. Ein Brei aus einer Holzspan-Stärkemixtur wird in dünne Lagen gepresst, einer Lufttrocknung unterzogen und im letzten Schritt als einzelnen Lagen additiv verleimt. Je nach Rezeptureinstellungen und Größe des Halbzeugs werden die Rohlinge subtraktiv als auch additiv in komplexe Formen gebracht. Nach Ablauf des Lebenszyklus können die Formen durch einfaches Schreddern aufbereitet und durch Zugabe von Wasser und Binder wieder neu in Form gebracht werden.

Die Schnelligkeit der Herstellung, die sofortige Verarbeitung der Schalungsrohlinge sowie die Umsetzung mit bereits bestehenden Maschinen und Verfahren, ist im Gegensatz zum traditionellen Formenbau ein großer Vorteil. Die Verwendung von nachhaltigen Bindern, Verzicht auf schädliche Additive als auch die Betrachtung der sortenreinen Rückbaubarkeit komplettieren die nachhaltigen Ergebnisse. —

FORSCHUNGSINSTITUTION

Universität Kassel
EDEK | Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren

PROJEKTLEITUNG

Prof. Philipp Eversmann
Anne Liebringshausen

WEBSITE

edek.uni-kassel.de

Holzspanbasierte
Betonschalung
mit resultierendem
Betonbauteil



Für mehr Informationen
zur **Prozesserläuterung**:
<https://vimeo.com/440945742>



Für mehr Informationen
zum **Sandverfahren**:
<https://vimeo.com/433532176>



Abb. 181: Artikel im Zukunft Bau Journal / Das Bauen von Morgen S. 2

NACHGEFRAGT | Experimentelles Bauen

Call for Projects

Junge Köpfe in der Materialfertigung

Innovationen entstehen durch stetiges Korrigieren diverser Ideen, durch Experimentieren und Lernen. In der Baubranche braucht es neue Materialien, die bei ihrer Herstellung möglichst wenig Emissionen freisetzen, wenig Energie verbrauchen und die wiederverwendbar sind. Bei unserem „Call for Projects“ suchten wir daher nach Forschungsprojekten an Hochschulen, die zukunftsweisende Baumaterialien entwickeln oder digital fertigen.

rethinking:wood – Vom Holzspan zur Form

www.uni-kassel.de



Anna Liebringshausen und Andreas Göbert arbeiten daran, gesundheitlich unbedenkliche, industrielle Abfallmaterialien wie z.B. Holzspan wiederzuverwenden.

06 DER ENTWURF | November 2020

Abb. 182: Artikel in der DBZ (Deutsche BauZeitschrift) Experimentelles Bauen – junge Köpfe in der Materialfertigung S.1



Wie kann eure Innovation das Bauwesen nachhaltig verändern?

Betrachtet man die Rohstoff- bzw. Abfallentwicklung in Deutschland, fallen neuerdings auf Materialebene mehrere Millionen Tonnen Altholz als Abfall an. Im Mittelpunkt muss nun die Frage stehen, welche alternativen Einsatzmöglichkeiten für diesen Rohstoff entwickelt werden können, damit, wie aktuell vielerorts der Fall, dieser nicht verbrannt oder deponiert wird. Das Umweltbundesamt spricht sich in diesem Zusammenhang dafür aus, dass die stoffliche Altholznutzung bis 2050 von 1,2 auf 4,2 Mio. Tonnen steigen soll. Verfahren, durch die dieses Ziel erreicht werden kann, gilt es nun zu entwickeln. Hier zeigt sich klar die Dringlichkeit zur Realisierung eines nachhaltigen Fertigungsverfahren auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen, wie für Holzbauteile, die zudem vollständig rezyklierbar sind. Der Einsatz biobasierter Produkte und ein Verzicht auf schädliche Additive ermöglichen im Gegensatz zu herkömmlichen Baumaterialien eine geschlossene Kreislaufwirtschaft durch Rückbau und Wiederaufbereitung von Bauteilen am Ende ihres Lebenszyklus.

Wann starteten die ersten Experimente?

Erste Experimente entstanden 2016 aus der Masterarbeit von Anne Liebringshausen (Universität Kassel) mit dem Titel „Nachhaltige & wiederverwendbare Betonschalungssysteme“. Denn konventionell wird, beispielsweise bei der Herstellung komplexer Betonfertigteile, als Schalungsmaterial auf Kunststoffe zurückgegriffen, die nur einmal geformt und verwendet werden können, bevor sie als Sondermüll entsorgt werden. Das zeigt klar die Dringlichkeit zur Implementierung eines neuen Schalungsverfahrens. Die gewonnenen Erkenntnisse der Masterthesis wurden dann in dem Forschungsprojekt an der Uni Kassel weitergeführt.



1| Subtraktive Bearbeitung von Holzspanrohlingen

2| Anwendungsbeispiel für gestaltete Akustikelemente

3| Holzspanbasierte Betonschalung mit resultierendem Betonbauteil

Fotos: Uni Kassel

Welche Materialien verwendet ihr?

Lediglich zwei Materialien: Der Formgrundstoff besteht aus Altholz resultierendem Holzspan. Der ursprünglich lose Altholzspan wird mit einer kaltquehlenden Stärke gebunden, die keine Verkleisterung durch Hitze benötigt, was weitere Prozessschritte vermeidet und Ressourcen schont.

Wer sind eure Partner und wie wird das Projekt finanziert?

Finanziert wird das Projekt durch den Förderpartner Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Für eine realistische Prüfung der wissenschaftlichen Forschungsergebnisse und Austarieren der Industriefähigkeit des angestrebten Verfahrens wurde ein Expertenteam aus Betonfertigteile- und Modellbauern herangezogen, um den Anwendungsfall für Betonschalungen zu prüfen. Seitens der Industrie wird das Projekt durch die Betonfertigteilewerke „Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG“ und „Runkel Fertigteilbau GmbH“ gefördert. Im Bereich der Fertigung und Formung von Schalungen unterstützt das Projekt „Maus GmbH Modell- u. Formenbau“.

In Deutschland fallen aktuell mehrere Mio. Tonnen Altholz als Abfall an.



Abb. 184: Holzspanbasierte Akustikelemente

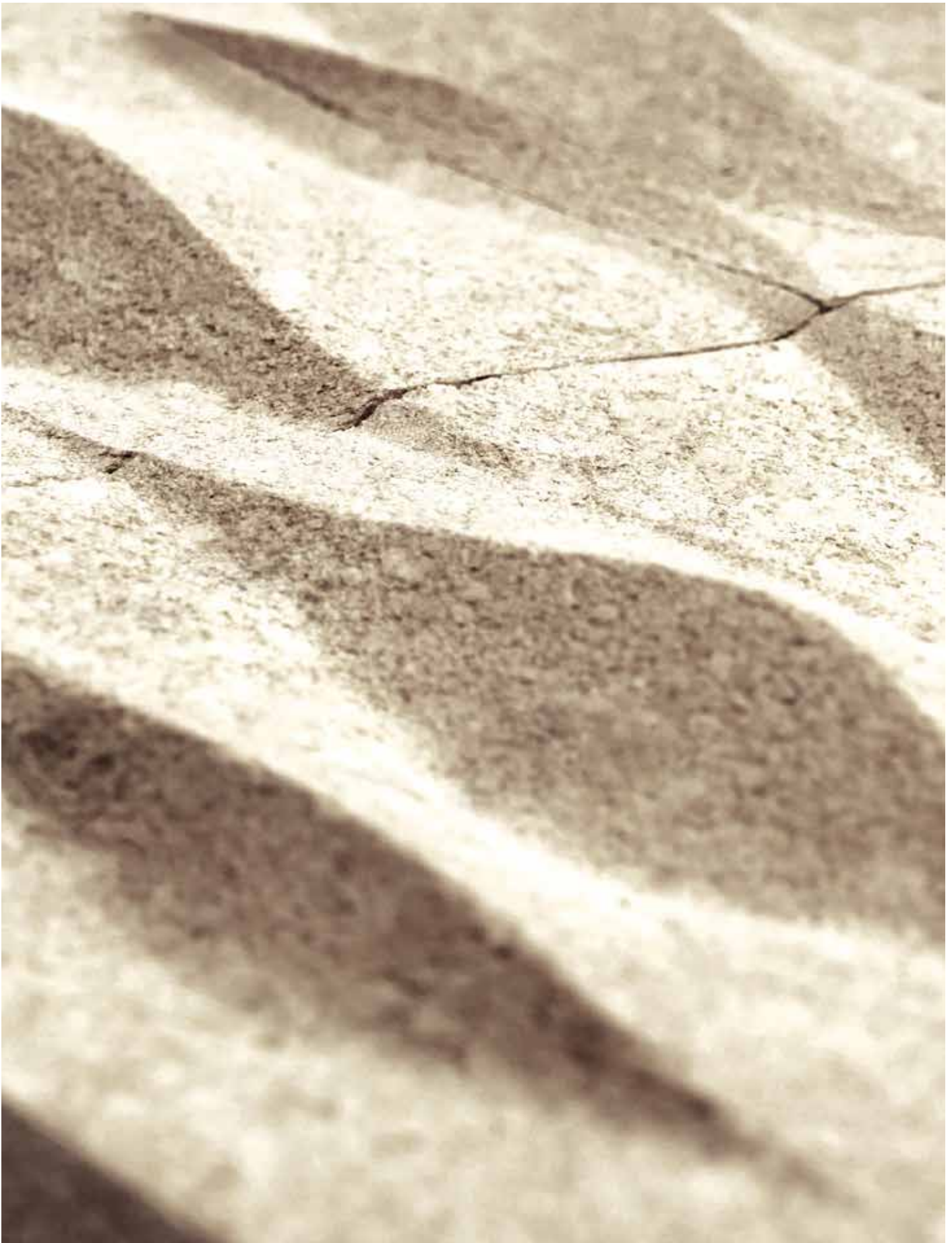


Abb. 185: Holzspanbasierte Akustikelemente



Abb. 186: Sandschalung und resultierendes Betonelement

11. DANKSAGUNG/MITWIRKENDE

Kooperationspartner/ Geldmittelgeber

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bollinger + Grohmann GmbH
Elementbau Osthessen GmbH und Co., ELO KG
Runkel Fertigteilbau GmbH
Maus GmbH Modell- und Formenbau

Beteiligten Forschungseinrichtungen

Universität Kassel / FB14 – Bauingenieurwesen / FG Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie
Universität Kassel / FB15 – Maschinenbau / Fachgebiet Gießereitechnik
Universität Kassel / FB06 – ASL / Werkstätten Brandthaus
Center for Environmental Systems Research / Dr. Clemens Mostert und Jonathan Scheifele

Persönlicher Dank

Prof. Manfred Grohmann
Prof. Philipp Eversmann
Dr. -Ing. Arnd Rose
Dipl. Des. Guido Brinkmann
Manuela Uhlig

Förderungen durch Sachmittel

ASK Chemicals GmbH (Bindersysteme)
Drywoodboxx GmbH (Trocknung)
Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG (deponierte Gießereialsande)
Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH (Schlichten und Trennmittel)
Interstarch (Stärke)
JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG (konfektionierter Holzspan und Holzmehl)
Kröner-Stärke GmbH (Stärke)
MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG (Trennmittel)
Münch Chemie International GmbH (Schalungsversiegelungsprodukte)

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

BOLLINGER + GROHMANN
Ingenieure



maus
TECHNISCHER MODELLBAU



GTK  **GIESSEREI**
Technik Kassel
Zentrum für Gussleichtbau und Konstruktion



12. LITERATUR- UND BILDNACHWEIS

12.1. Literaturnachweis

Monografien:

BINDUR (Hrsg.): Technisches Datenblatt. PS 679-113-K. Leipzig. 2019.

FRANKE, Simone (Hrsg.): Giesserei Lexikon. Berlin. 2019.

WINTERHALTER, Johannes; MAUERSBERGER, Günter; BARS, Peter; TOUSSAINT, Dominik: Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren. Gießereialtsande aus Eisen-, Stahl- und Tempergießereien. Karlsruhe. 1992.

TEGGE, Günther, Hrsg. Stärke und Stärkederivate. Behr's Verlag DE, 2004. S.37-49

DUNKY, Manfred; NIEMZ, Peter. Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55938-9>. S.414-416

Internetquellen

BINDUR GMBH: PUROLiT Formstoff-Bindemittel. PUROLiT – unser umweltfreundliches Bindemittel: <https://bindur.de/purolit/>, [Zugriff vom 27.01.2020]

FOUNDRY TECHNOLOGIES & ENGINEERING GMBH: Aktivbentonit: <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/aktivbentonit-27/?cHash=98363c255ae585521bc5056b2b2780d6>, [Zugriff vom 27.01.2020]

FOUNDRY TECHNOLOGIES & ENGINEERING GMBH: Wasserglas: <https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/Encyclopedia/show/wasserglas-538/?cHash=f98da99681cba52b3ce63f910cfa4b23>, [Zugriff vom 27.01.2020]

GOM GMBH: ATOS Core: <https://www.gom.com/de/messsysteme/atos/atos-core.html>, [Zugriff vom 27.01.2020]

LUMITOS AG: Harz (Material): https://www.chemie.de/lexikon/Harz_%28Material%29.html, [Zugriff vom 27.01.2020]

Mündliche Quellen:

MARTIN, Udo (Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG), Stadallendorf, 07.01.2020.

MAUS, Mathias (Maus GmbH Modell- und Formenbau), Karlsruhe, 18.07.2019.

WELTER, Katharina Welter (ASK Chemicals), Karlsruhe, 09.04.2019.

12.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 01. - 30.:	Eigene Darstellungen	Abb. 180 - 181:	Zukunft Bau Journal Das Bauen von Morgen
Abb. 31:	Drywoodboxx	Abb. 182 - 183:	Deutsche BauZeitschrift Experimentelles Bauen – junge Köpfe in der Materialfertigung
Abb. 32 - 42:	Eigene Darstellungen	Abb. 184 - 186:	Eigene Darstellungen
Abb. 43 - 44:	Maus GmbH Modell- und Formenbau		
Abb. 45 - 47:	Eigene Darstellungen		
Abb. 48:	Maus GmbH Modell- und Formenbau		
Abb. 49 - 52:	Eigene Darstellungen		
Abb. 53:	Maus GmbH Modell- und Formenbau		
Abb. 54 - 72:	Eigene Darstellungen		
Abb. 73:	DIN EN ISO 4287: 2010		
Abb. 74 - 78:	Institut für konstruktiven Ingenieurbau Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie		
Abb. 79 - 80:	Eigene Darstellungen		
Abb. 81 - 84:	Fachbereich Maschinenbau Fachgebiet „Gießereitechnik		
Abb. 85 - 107:	Eigene Darstellungen		
Abb. 108 - 111:	Maus GmbH Modell- und Formenbau		
Abb. 112 - 115:	Eigene Darstellungen		
Abb. 116 - 119:	Runkel Fertigteilbau GmbH		
Abb. 120 - 150:	Eigene Darstellungen		
Abb. 151:	Runkel Fertigteilbau GmbH		
Abb. 152 - 176:	Eigene Darstellungen		
Abb. 177 - 178:	Naima Hartmann		
Abb. 179:	Eigene Darstellungen		