

Additive Herstellung von Betonfertigteilen mit klinkereffizienten Zementen



Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich
Dipl.-Ing. Henrik Funke

Weimar, den 13. November 2025

Innovative Material- und Technologieentwicklung für die Bauindustrie

Materialleichtbau

Strukturleichtbau

Additive Technologien

Funktionalisierung



Die Bauindustrie 2025 im Wandel



Herausforderungen aktuell

-  Steigende Baukosten
-  Fachkräftemangel
-  Hoher Ressourcenverbrauch
-  Wachsende Nachfrage nach bezahlbarem Wohnraum

Lösungsansatz = Additive Fertigung

-  3D-Druck mit Beton = schneller, ressourcenschonender, automatisiert
-  Reduzierter Personalbedarf auf der Baustelle und im Fertigteilwerk
-  Komplexe Geometrien effizient fertigen
-  Digitalisierung & Automatisierung in der Bauwirtschaft

„Problemlöser“ 3D-Betondruck?

Ist das realistisch?

Wie ist der aktuelle Stand?

Welche Produkte sind möglich?



[<https://cdn.peri.cloud/.imaging/xlWide/dam/12981b4f-c773-4f0f-98fc-65de58b6d982/77782/3d-betondruck.jpg>]

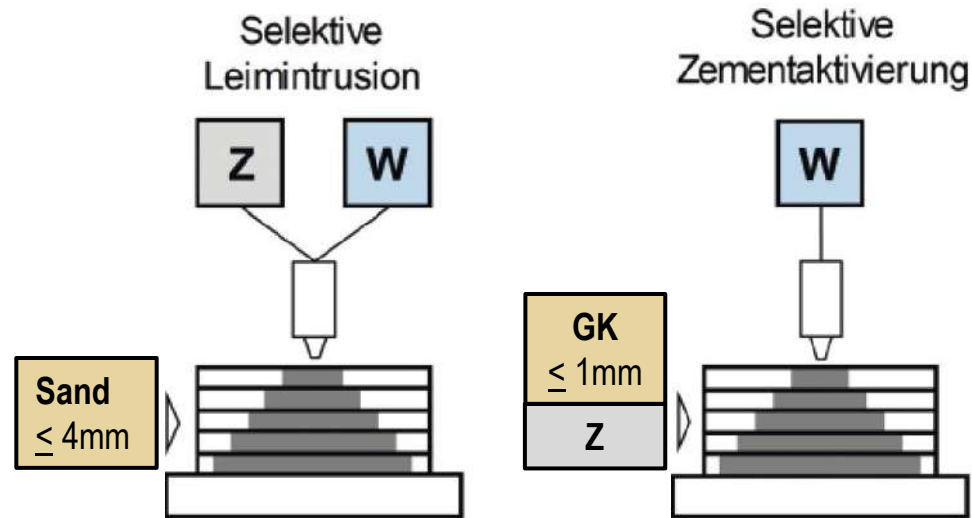


Übersicht additiver Herstellungsverfahren für den Betonbau

Selektive Bindeverfahren

Zementleimbasiert

Zementbasiert

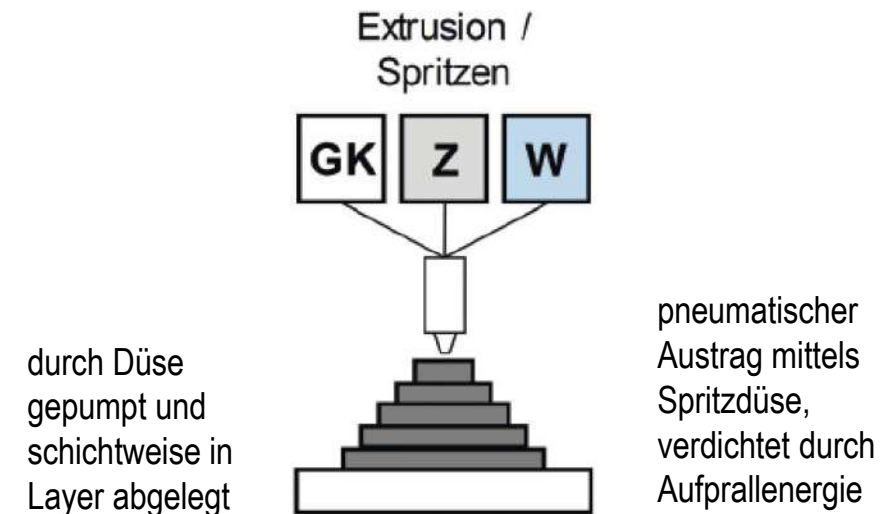


GK Gesteinskörnung
Z Zement
W Wasser

Ablegende Verfahren

Betonextrusion

Betonspritzen



Schematische Darstellungen der 3-D-Drucktechniken im Betonbau nach:

[H. Kloft, N. Hack, J. Mainka, L. Brohmann, E. Herrmann, L. Ledderose, D. Lowke: Additive manufacturing in construction: first 3-D-printed reinforced concrete components, Bautechnik 96 (2019), Heft 12]

Individualisierte Vor-Ort-Fertigung – 3D-Druck

- 3D-Druck mittels Betonextrusion für Vor-Ort-Bau
- Transportierbare Portalsysteme
- Verarbeitung von Frischbeton aus Fahrmischer oder Vor-Ort-Verarbeitung von Fertigmischungen -> Betonaustrag über große Düsen
- Manuelle Integration von Stahlbewehrungen, Dämmung, Einbauten

Herstellung von Betonfertigteilen mittels Betonextrusion

- Stationärer Fertigung mittels Betonextrusion (TUC - Prototyp)
- Schalungsfreie Betonextrusion
- Freiformbar durch Einsatz vor Robotertechnik
- *Integration von Bewehrungen: vor, während, nach dem Druck*
 - > vor/während Druck: Kurzfasern, Endlosfasern, Stäbe, Matten
 - > Einbau nachträglich: Stäbe, Körbe, Matten ...



Quelle: PERI, <https://cdn.peri.cloud/.imaging/xlWide/dam/12981b4f-c773-4f0f-98fc-65de58b6d982/77782/3d-betondruck.jpg>



Robo-Arena TU-Chemnitz
Bau-Technikum des FB LBW

Technologische Basis an der TUC

Betondruck-Komplex mit Nachbearbeitung

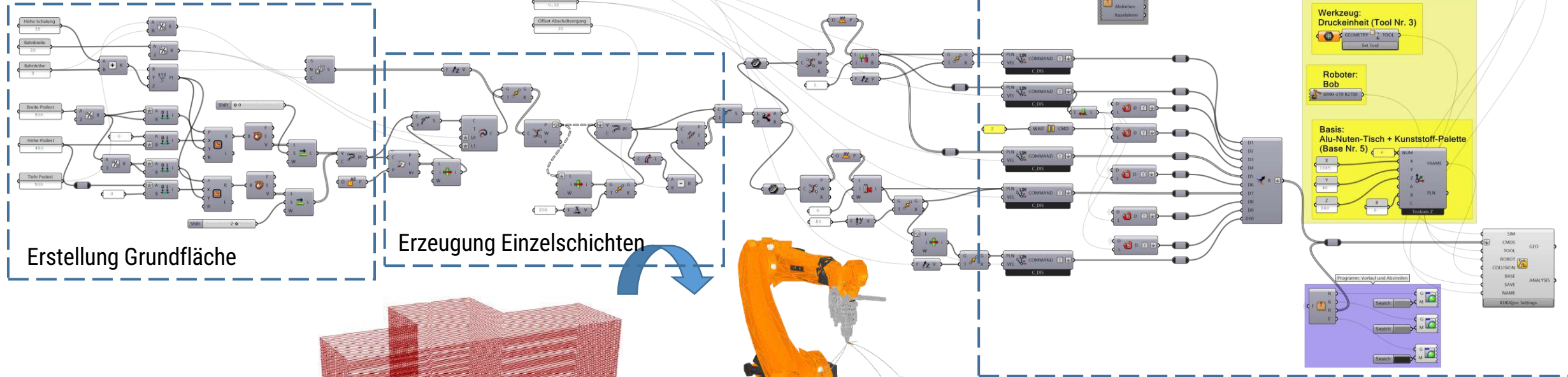
Arbeitsumgebung: Roboarena

- 2 x KUKA KR 90 R2700
 - ⇒ Roboter 1: Betonspritzen und Betonextrusion
 - ⇒ Roboter 2: Fräsen, Faserlegen, Handling (Positionierung von Ankern)
 - ⇒ Arbeitsbereich: ~ 1,50 m
- Betonfördereinheit
 - ⇒ Mischpumpe PFT Bolero
 - Schneckengehäuse (Stator),
 Förderschnecke (Rotor)
 - Betonbehälter



Fertigungsplanung

Programmierung



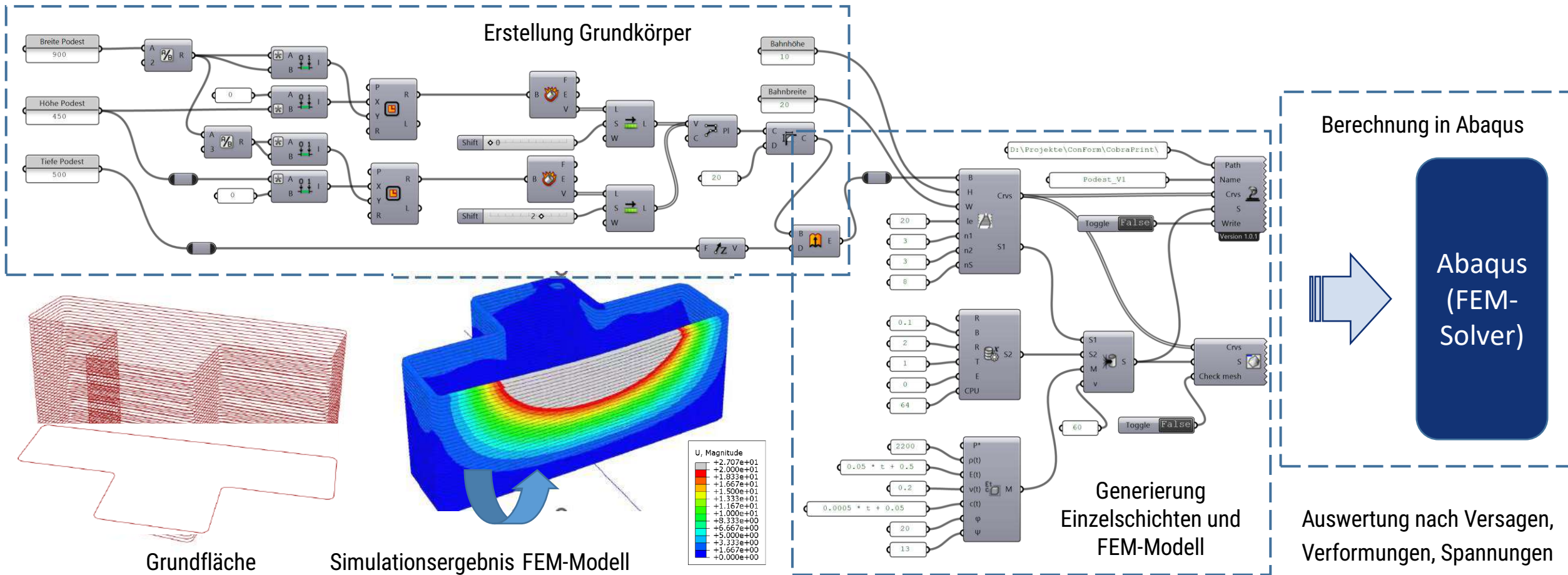
Grundfläche

Einzelschichten

Prozessvisualisierung

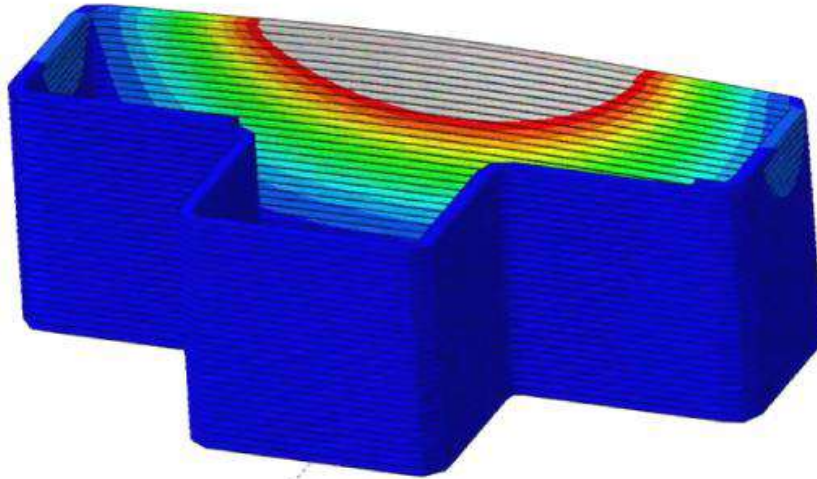
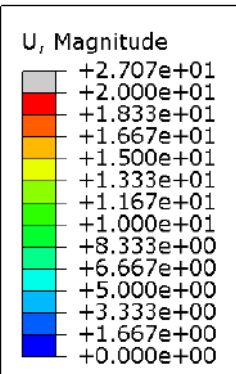
Fertigungsplanung

Prozesssimulation mit Grasshopper + CobraPrint (Add-on für Grasshopper) + Abaqus



Modellaufbau Grasshopper und Simulation Druckprozess

Vergleich Prozesssimulation und Versuch



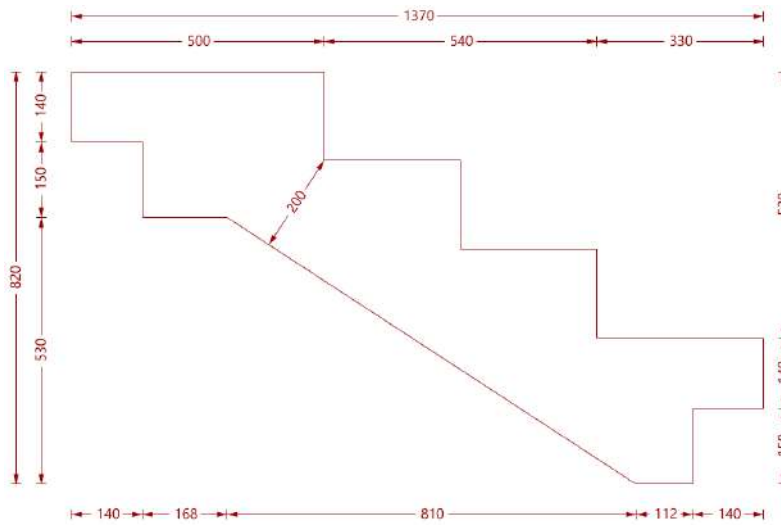
Podest: Schichtbreite 20 mm / Schichthöhe 10 mm



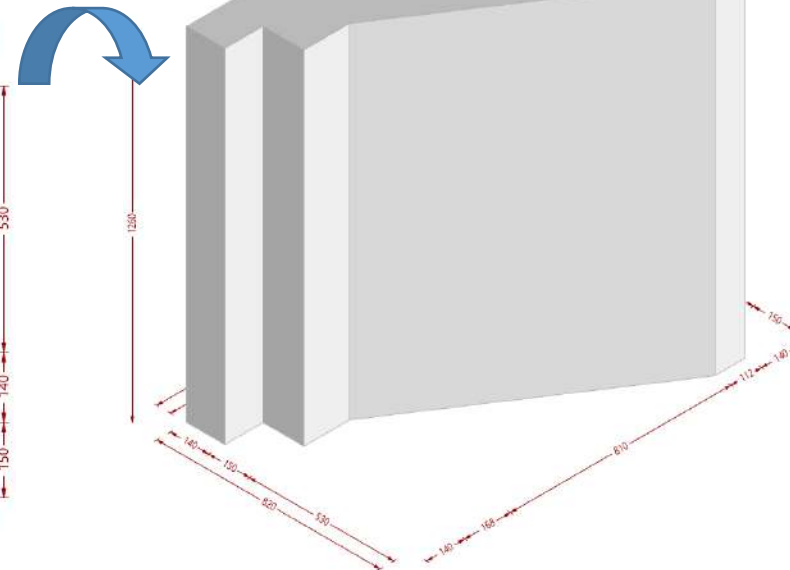
Automatisierte Fertigung einer Stahlbetontreppe mittels Betonextrusion

-> Reduktion manueller Arbeiten bei gleicher Bauteilqualität

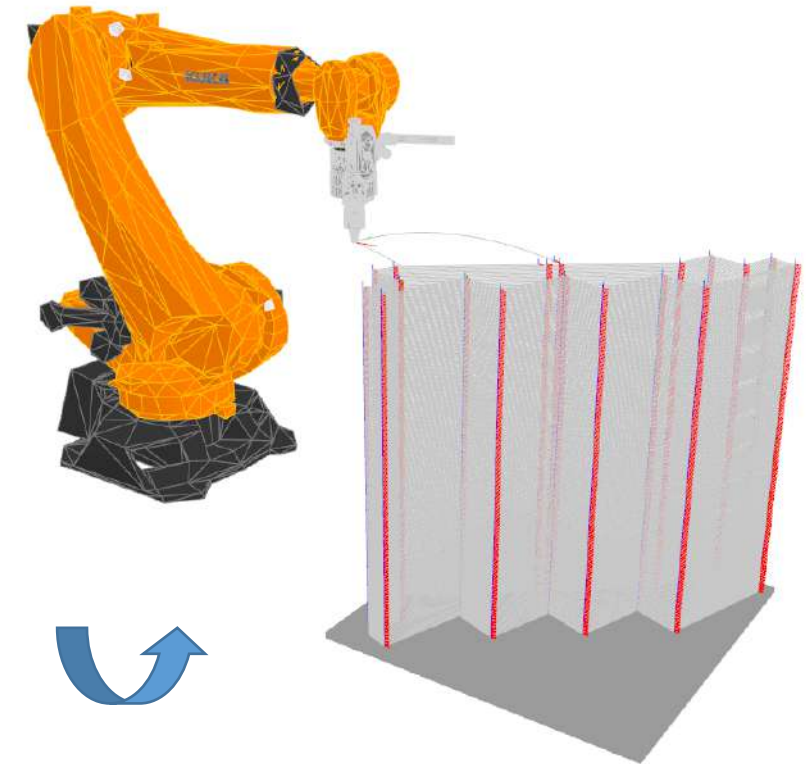
- Erstellung eines parametrischen Modells
- Extrusion der Außenkontur -> „verlorene“ Betonschalung
- Pump- und förderbare Betonmischung, Stabilität nach Austrag, Reproduzierbares Erhärtungsverhalten, GK 4 mm



Parametrische Treppenmodell - Skizze



Parametrische Treppenmodell - Volumenkörper

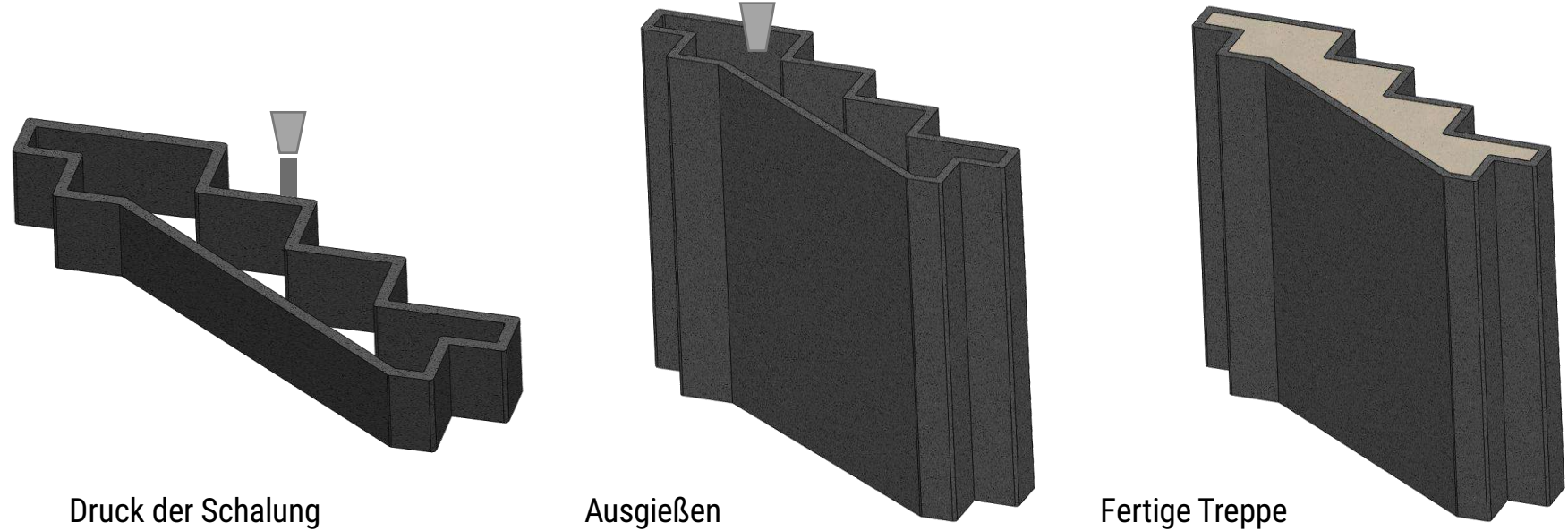


Abgeleitetes Roboterprogramm

Fertigungskonzepte

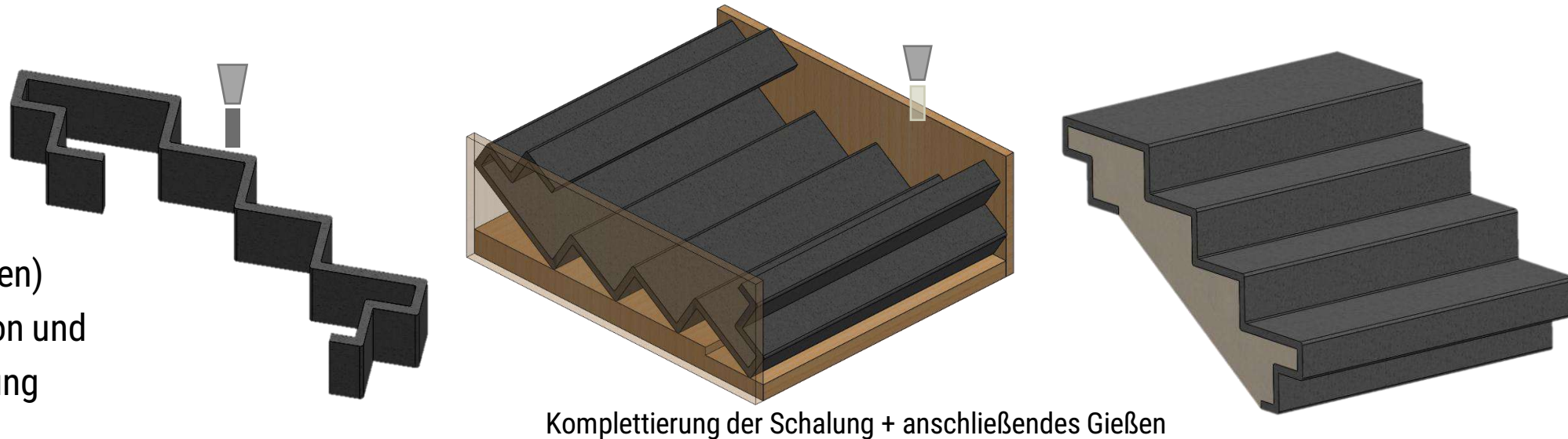
Variante 1

- Additiv gefertigte „verlorene“ Schalung für *gesamte Treppe*
- Bewehrungsintegration und Ausgießen der Schalung



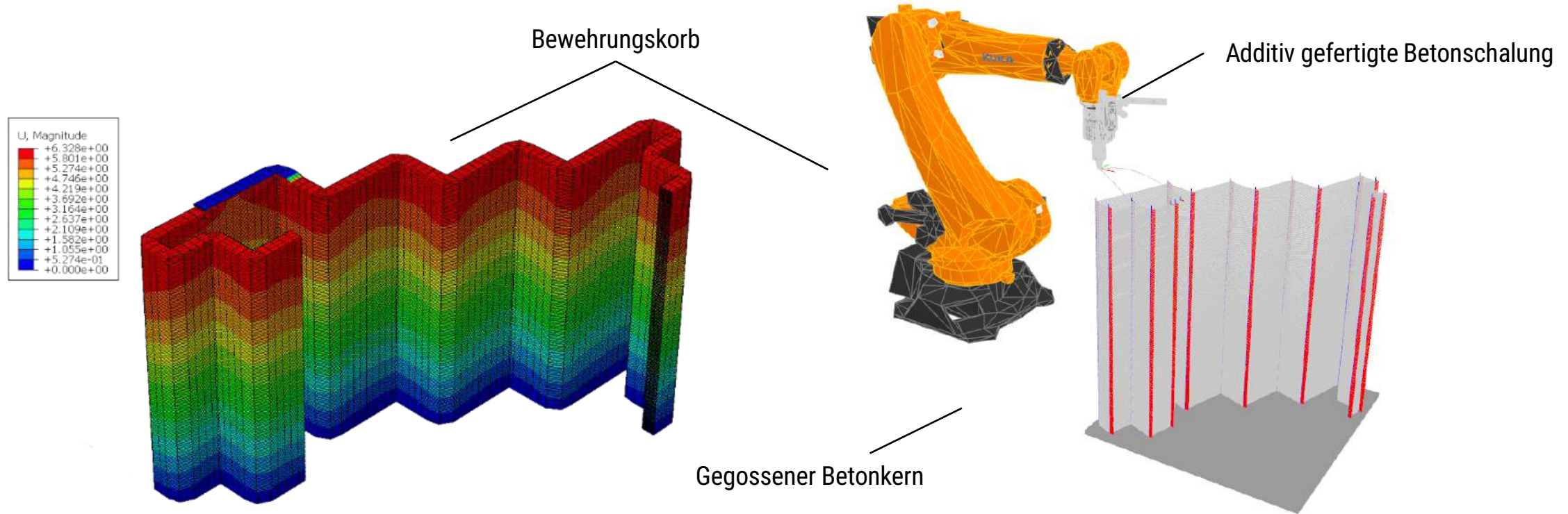
Variante 2

- Additiv gefertigte „verlorene“ Schalung als *Halbschale* + Komplettierung (Kasten)
- Bewehrungsintegration und Ausgießen der Schalung



Bewehrungskonzept und Fertigungsplanung

- Additive Fertigung von schlanken Schalungen mit geringen Wandstärken möglich
- Übertragung des Bewehrungskonzept der konventionell hergestellten Treppe
- **Fertigungsplanung mithilfe des parametrischen Modells**



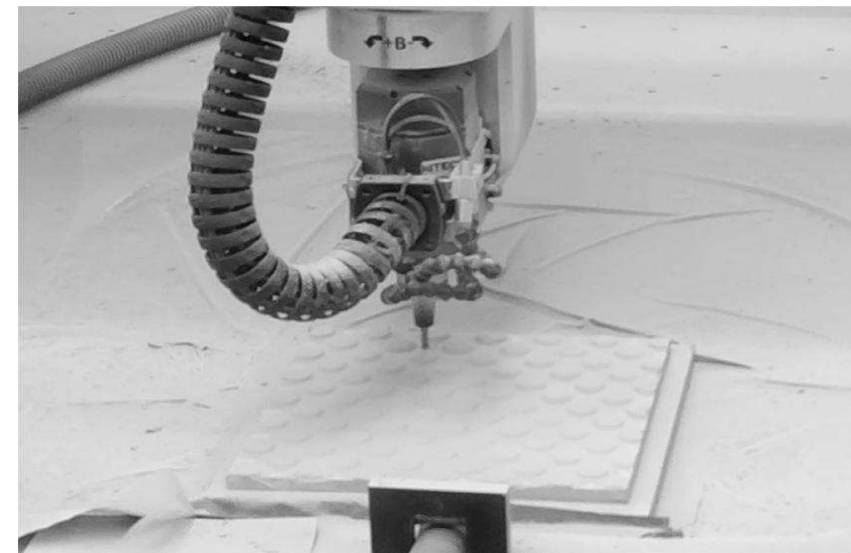
Prozesssimulation (li.) und Visualisierung der Roboterbewegung (re.) für die Fertigung der verlorenen Treppenschalung

Fertigung großformatiger Probekörper – Referenztreppe

Extrusion der Außenkontur -> Bewehrungsintegration + Fixierung -> Einbau der Gießmischung ggf. Nachbehandlung



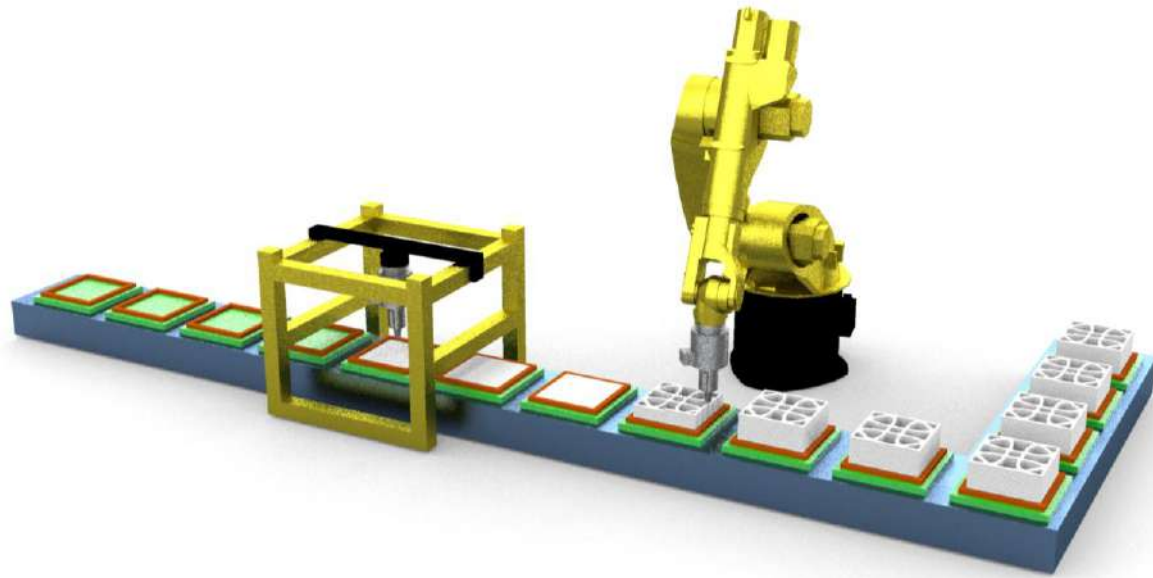
Fertigung großformatiger Probekörper – Referenztreppe



Nachbearbeitung:
Frästechnologie

Extrusions-Gieß-Fertigungsstrecke

- Schalungsfeie Bauteilgestaltung
- Designfreiheit
- Kombination von **Extrusions- und Gießtechnologie**
- Komplexe stabile Betonrezeptur
- Inline-Fertigung



Kombinierte Extrusions-/Gießstrecke



Tisch „rund“



Schwibbogen



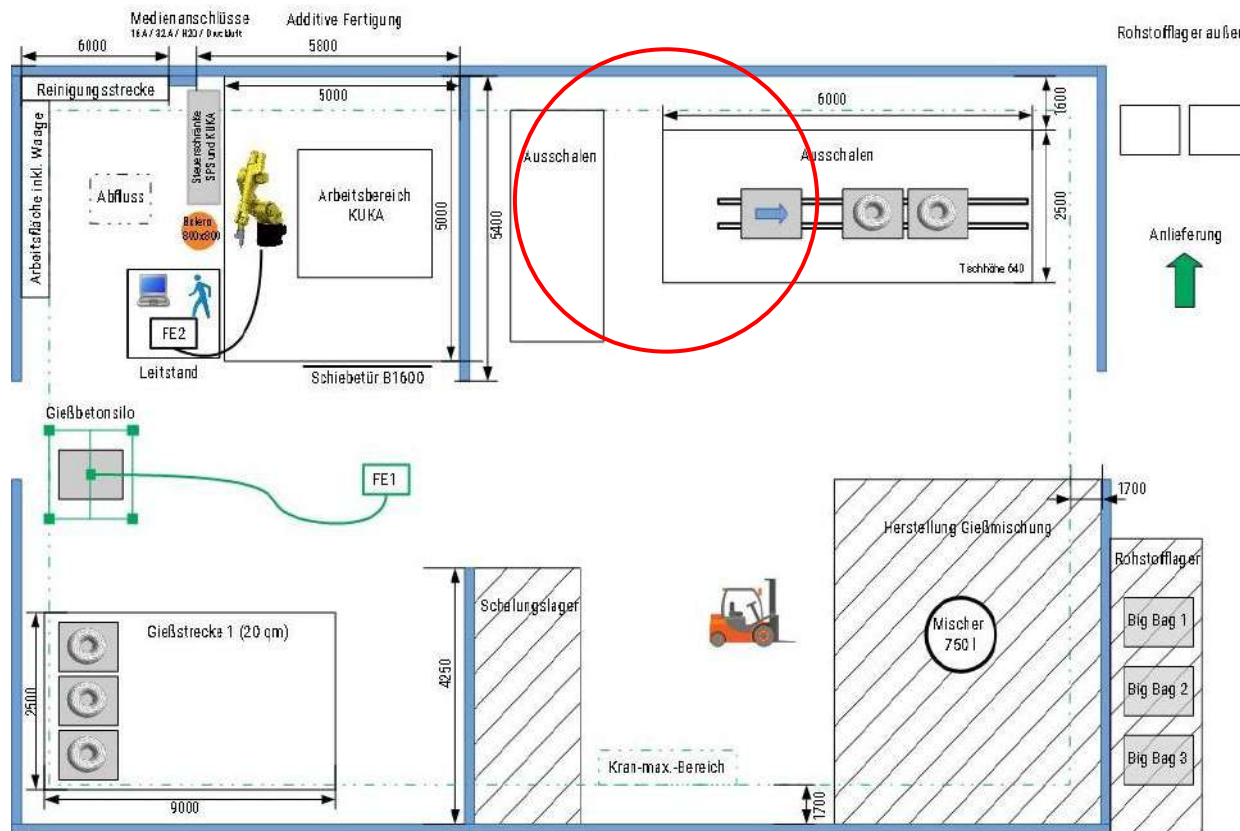
Tischtennisplatte



Sitzbank „nierenförmig“

Inline-Fertigung - Technologische Umsetzung

Überführung in eine hybride Fertigungstechnologie



Anlagenschema der prototypischen Versuchsanlage in Geringswalde



Aushärtung und
Entschalung

Inline-Fertigung - Angestrebtes Produktportfolio

Möbel und Gestaltungselemente



Halterungen/Unterbau PV-Anlagen



Designplatten, Designformelemente

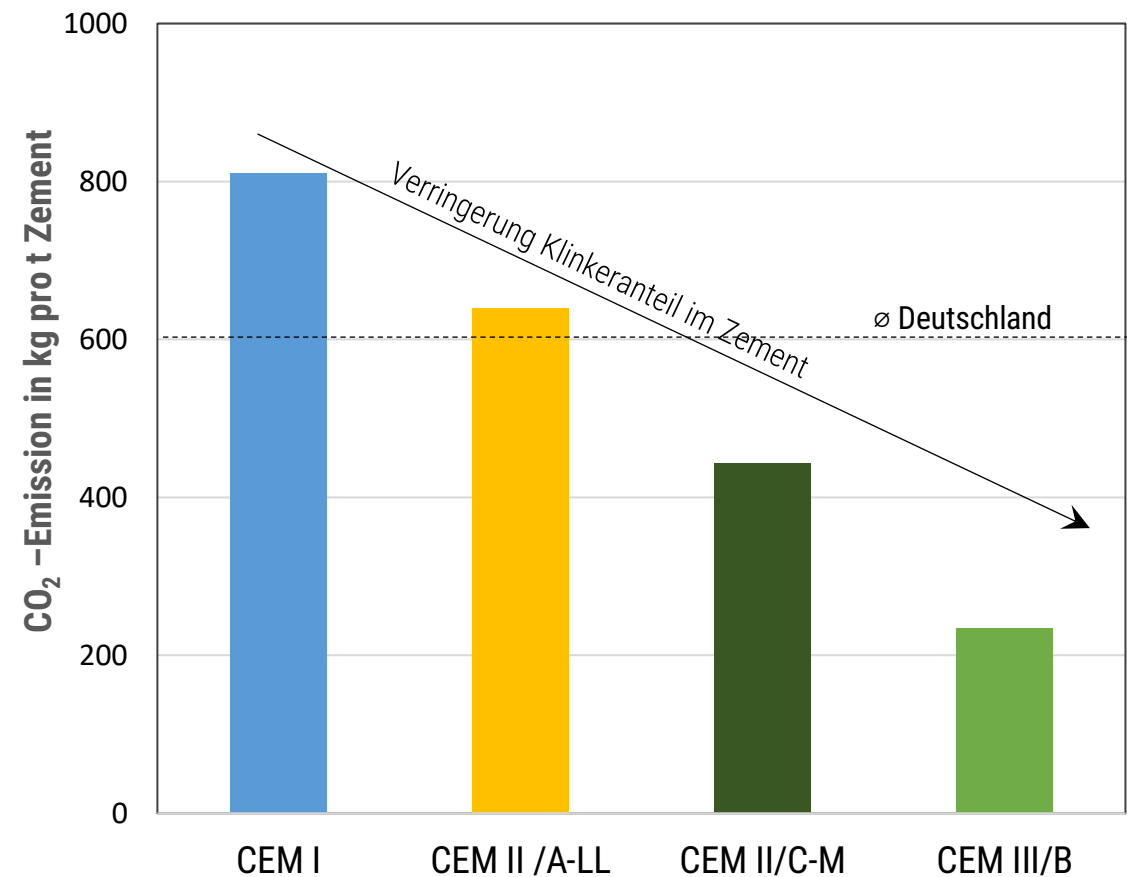


Additive Fertigung mit klinkerreduzierten Zementen

- Verringerung Klinkerfaktor mit inerten und reaktiven Kompositmaterialien (bi- und ternäre Systeme)
 - Früh- vs. Endfestigkeiten (z. B. Nachbehandlung)
 - Variation der Grenzzusammensetzung (z. B. variabler w/z) künftig erforderlich
 - Einsatz neuer Zusatzmittel für robuste Betone

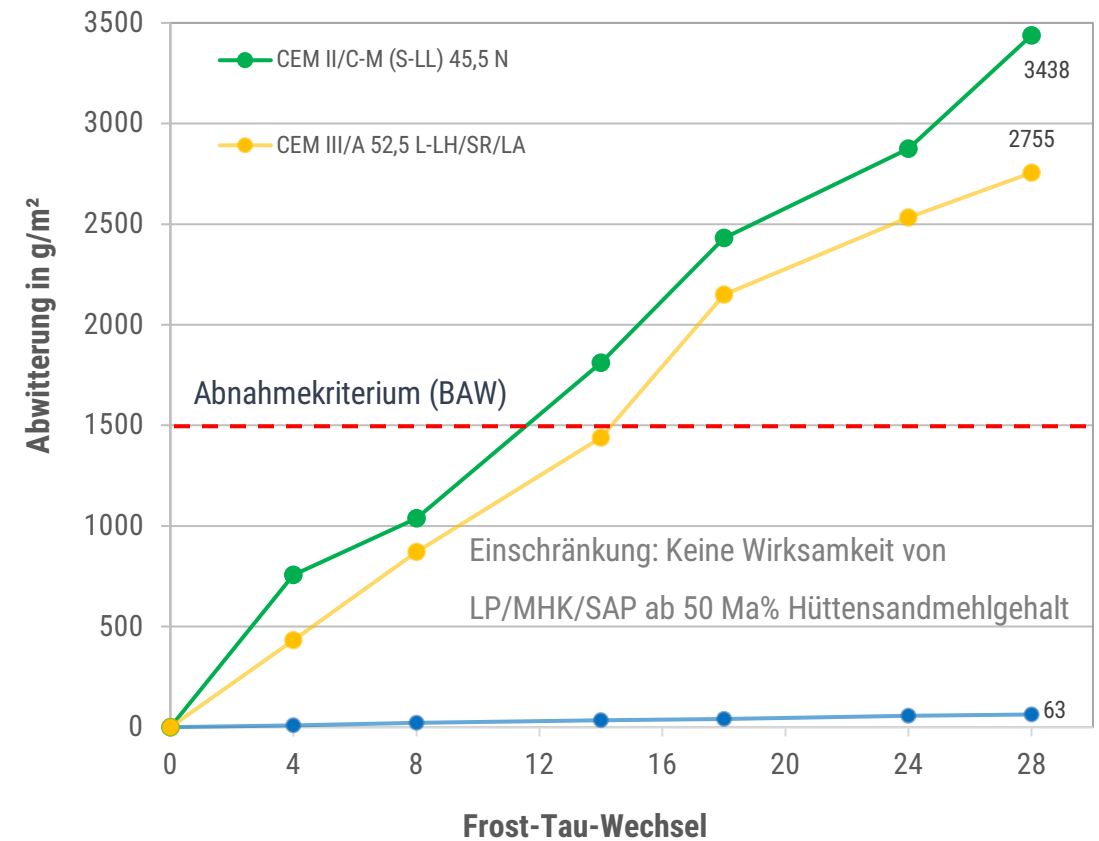
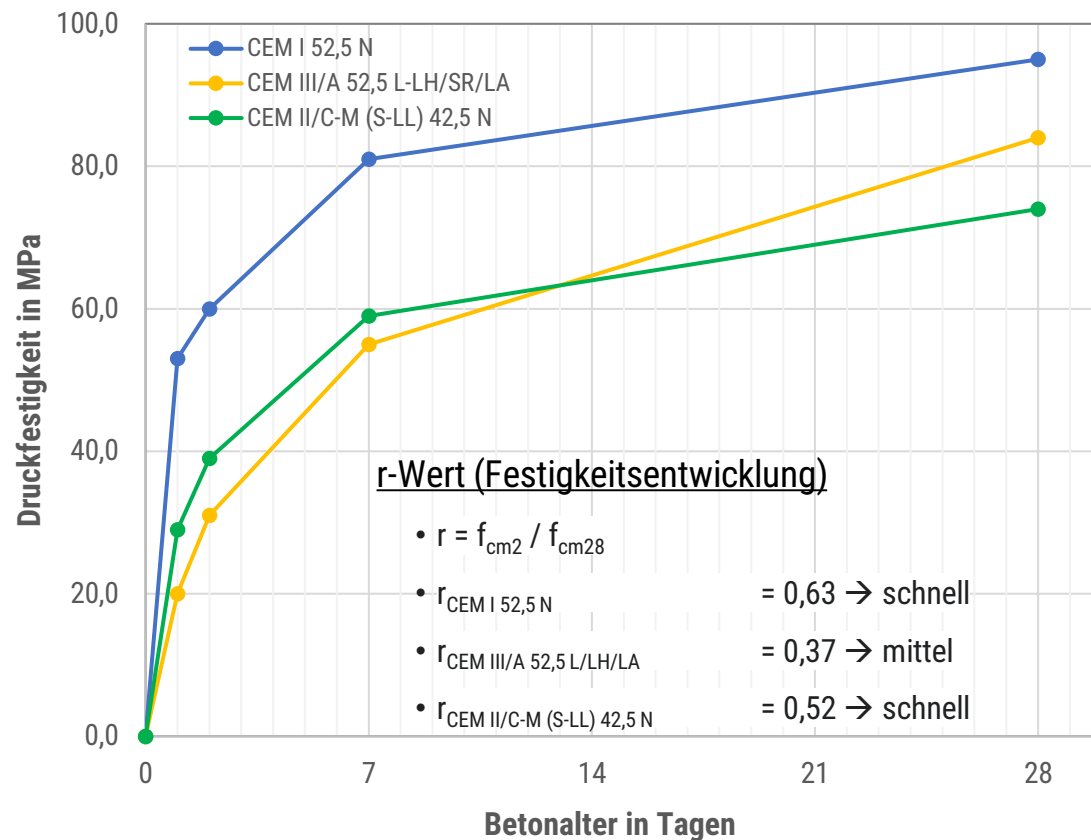


Resilienz in der Bauindustrie mit neuen Herausforderungen



Druckfestigkeit und Frost-Tausalz-Widerstand von klinkereffizienten Zementen

▪ $w/z = 0,43$



3D-Objekt-Scan mit endkonturnaher additiver Fertigung und Oberflächenbearbeitung

Individuelle Strukturen



Stand der Technik

Aufwändige Planung
Lange Baustellenzeiten
Hohe Kosten
Fachkräftemangel
Gesetzliche Regelungen (z. B. Lärm)

Additive Fertigung



Zusammensetzung Extrusionsbeton

- CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N
- Homogene und glatte Frässtruktur

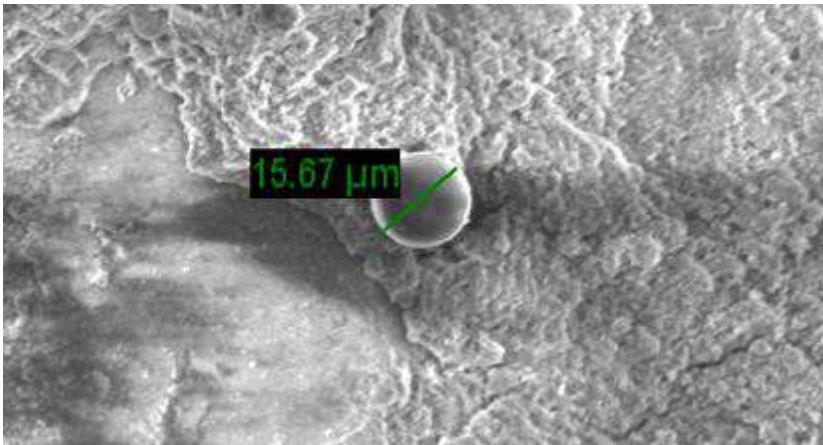
Komponente	
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	x
Quarzsand 0,1-2,0 mm	x
Gesteinsmehl	x
Sekundärfließmittel (PCE)	X
Primärfließmittel (PCE)	x
w/z	0,42



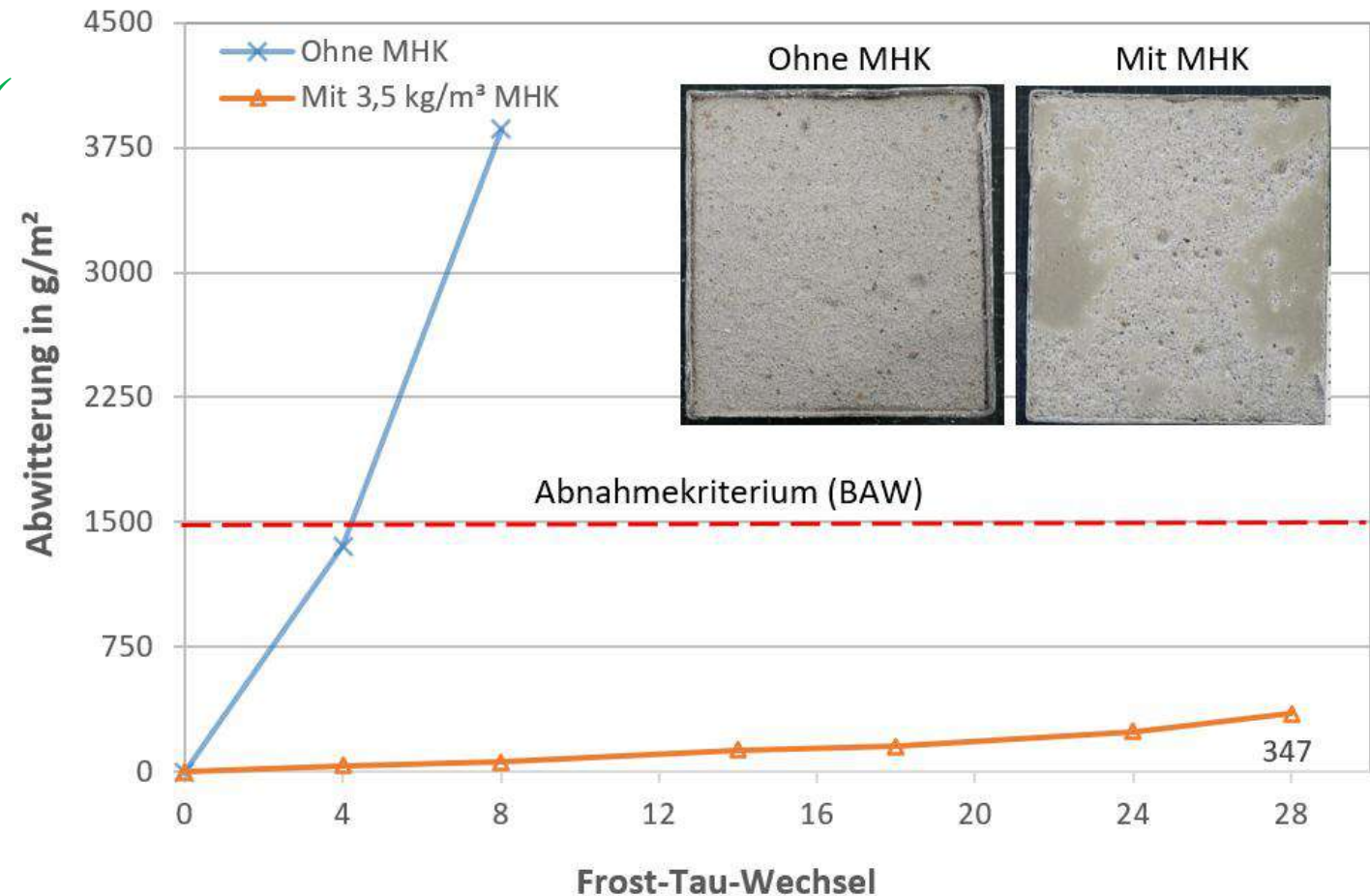
Fräßen des endkonturnahen additiv gefertigten Probekörpers im frischen Zustand

Festbetoneigenschaften Extrusionsbeton

- Klinkerreduzierter Zement CEM II/C-M (S-LL)
→ Verringerung Klinkergehalt um 50 % ggü. CEM I ✓
- Druckfestigkeit: 59 MPa (C45/55) ✓
- Frost-Tausalz-Beständigkeit (CDF-Test) ✓

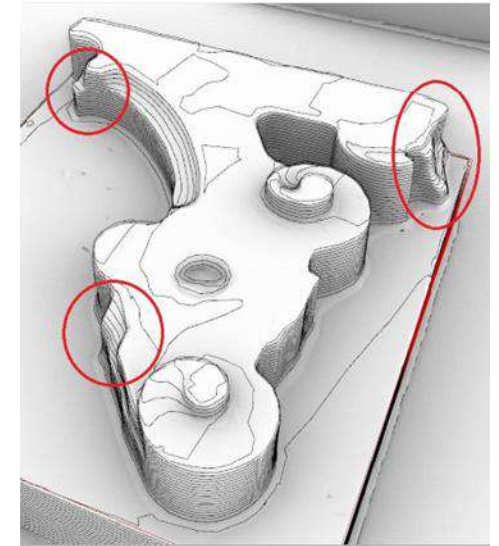
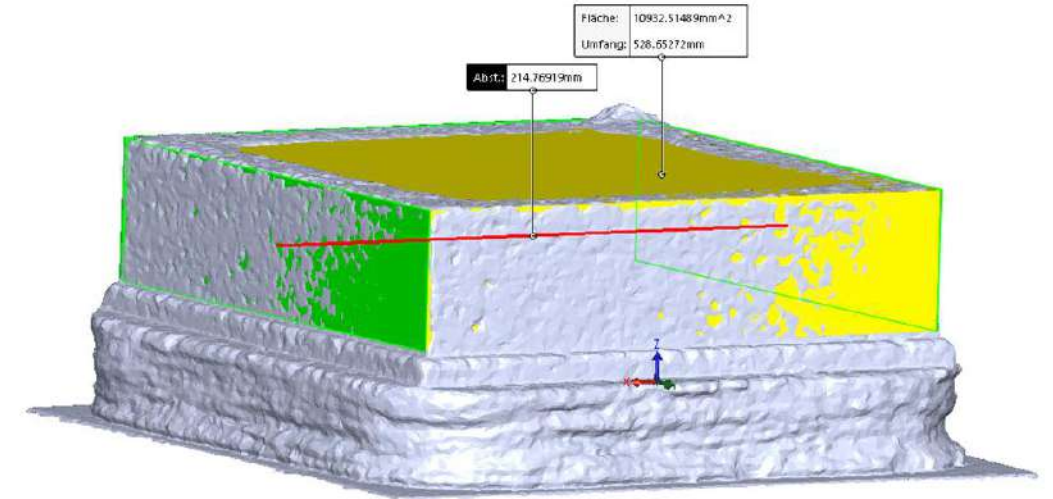


REM-Aufnahme Spritzbeton mit MHK



Herstellung Demonstrator

- Zwei Grundmischungen mit Möglichkeit zur Farbgestaltung
- Vergleich Pre- mit Re-Scan → Toleranzabgleich
- Vollständige Planung und Vorfertigung im Fertigteilwerk möglich



Verkürzt dargestellt Prozesskette zur Herstellung eines Demonstrators von der endkonturnahen additiven Fertigung bis zum Re-Scan

Additive Fertigung von Wand- und Deckenmodulen für Modulhäuser

- Extrusion und Spritzen CEM III/B 42,5 N-LH/SR/NA (70 % HS) → 305 kg CO₂/t_{Zement}
- Größtkorn 8 mm → Beton nach DIN EN 206/DIN 1045-2
- Beton mit drastisch reduziertem Klinkergehalt und CO₂-Emissionen (-75 %) gegenüber bestehenden 3D-Druckmischungen



1) Extrusion Außenform



2) Spritzen Sichtfläche



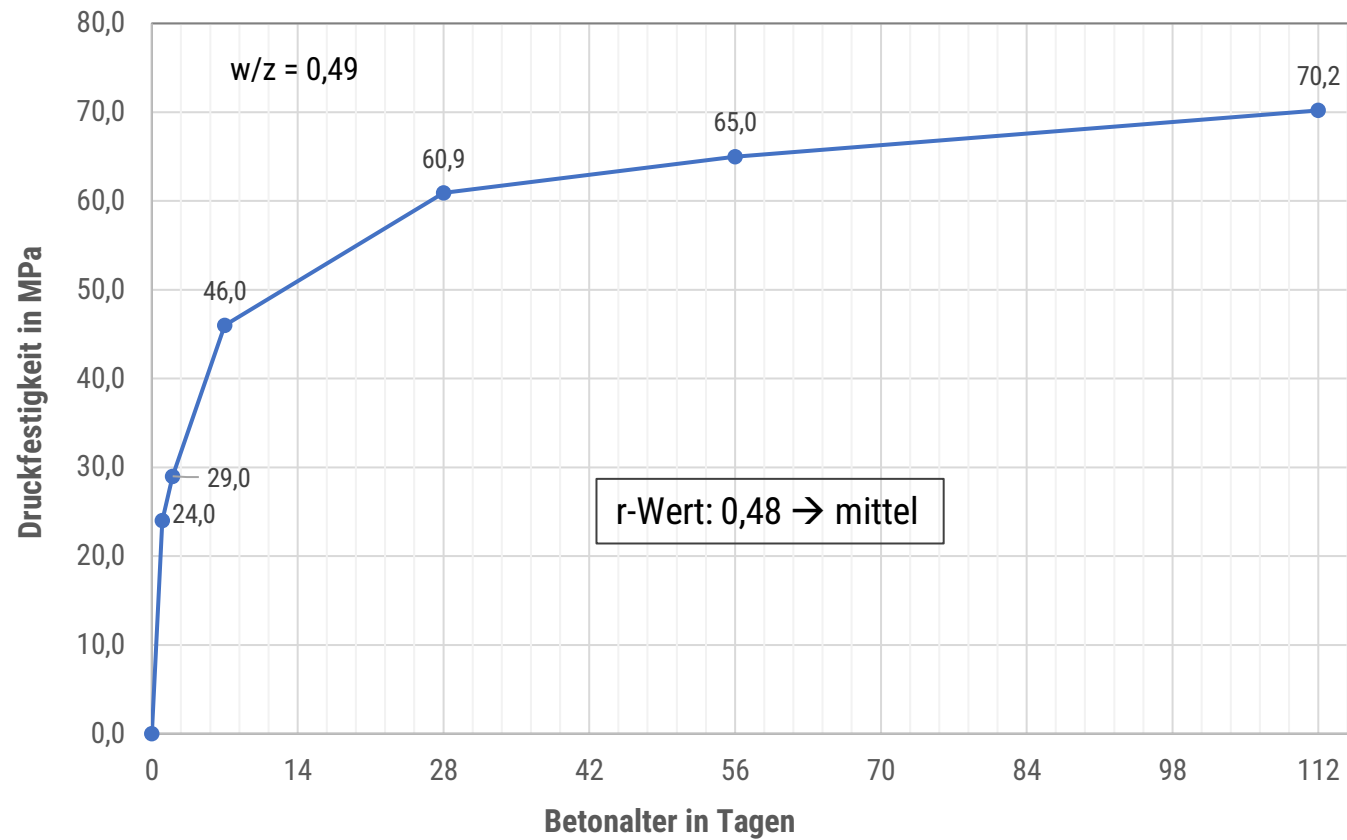
3) Extrusion tragende Strukturen



4) Applikation isolierender Mineralschaum

Druckfestigkeitsentwicklung

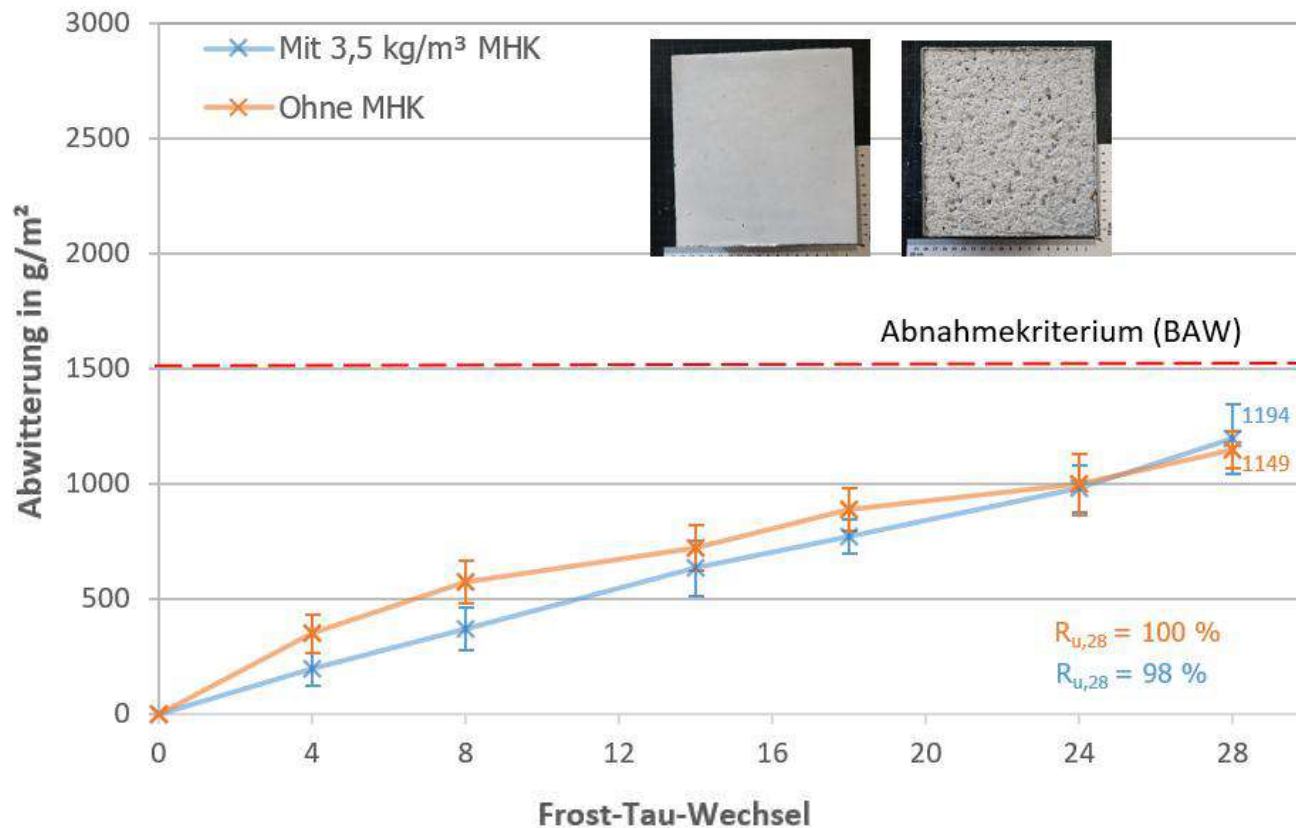
- CEM III/B 42,5 N-LH/SR/NA (70 % HS)



Frost-Tausalz-Widerstand

- Bereits nach 8 Zyklen deutliche Überschreitung des Abnahmekriteriums (trotz MHK)
- $w/z = 0,49$ und C50/60

*Mikrohohlkugeln ohne Einfluss auf
Frost-Tausalz-Widerstand
(→ Hüttensandgehalt: 70 Ma%)*



- DIN 1045-2: XF4 mit $w/z \leq 0,50$ und C30/37
- CEM III/B und XF4 (auf LP darf verzichtet werden):
 - a) Meerwasserbauteile: $w/z \leq 0,45$ und C35/45
 - b) Räumlerlaufbahnen $w/z \leq 0,35$ und C40/50

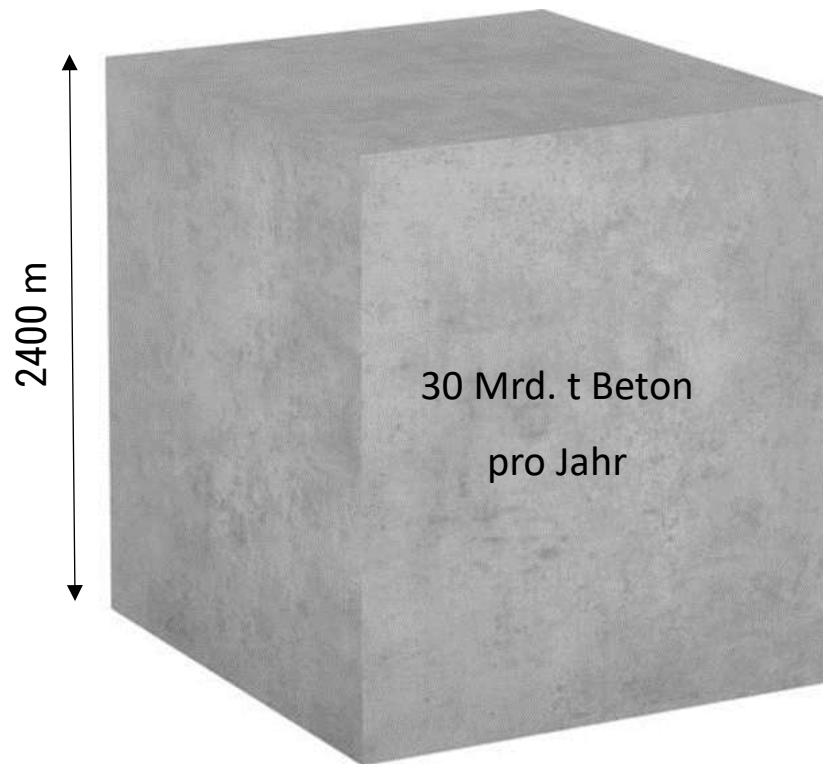


variabler w/z in Abhängigkeit von Zementart

→ Verringerung w/z auf 0,42

THG-Emissionen Beton nach Leistungsfähigkeit

- Je nach Festigkeitsklasse zwischen 180 kg/m^3 (C20/25) bis 320 kg/m^3 (C50/60)
- Additive Fertigung mit CEM III/B (C50/60): ca. 200 kg/m^3

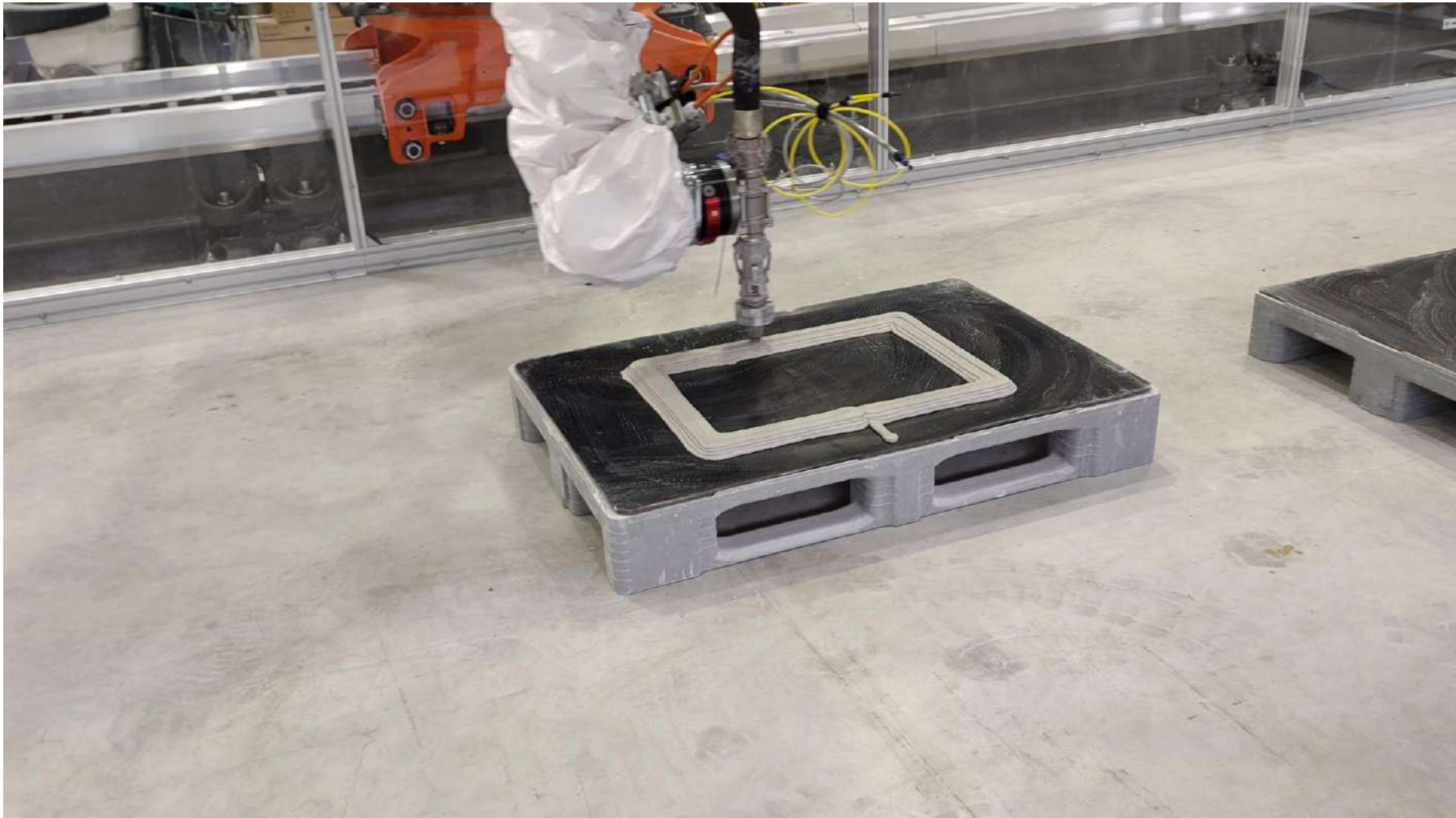


Transformation



38 % CO₂-Reduktion bei gleicher Festigkeitsklasse
+
Verarbeitbarkeit für additive Fertigung

Neues Zentrum für additive Betonfertigteilherstellung des Steinbeis-Innovationszentrums FiberCrete



SCAN ME

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich
sandra.gelbrich@mb.tu-chemnitz.de

Dipl.-Ing. Henrik Funke
henrik.funke@stw.de



Steinbeis-Innovationszentrum
FiberCrete

CONCRETE? – FiberCrete! ... Innovationen aus Chemnitz