

Innovative Aerogel-Technologie zur energetischen Optimierung von Betonbauten und Effizienzsteigerung von Bauabläufen

■ Jun. Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus und Kirsten Hollmann-Schröter, Technische Universität Dortmund, Deutschland

Koautoren: Felix Lowin und Dr.-Ing. Tanja Skottke, Technische Universität Dortmund, Deutschland

Dr.-Ing. Gregor Zimmermann, G.tecz Engineering GmbH, Deutschland

Die Anwendung serieller Fertigungsmethoden bestimmt die Herstellungsprozesse neuer Gebäude immer mehr und wirkt sich insbesondere in den Bereichen Wohnungs- und Büroneubau positiv aus. Um anspruchsvolle architektonische Konzepte umzusetzen, müssen in diesem Zusammenhang klassische Planungsmethoden angepasst und entsprechend neuartigen Fertigungsmethoden verändert werden. Unter der Voraussetzung einer ganzheitlichen Herangehensweise kristallisieren sich einzelne Parameter heraus, die als Dreiklang das Prozedere beeinflussen und deren Berücksichtigung sich als entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung darstellt. Vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt „Aerogel - Entwicklung von Hybridbeton-Elementen mit Aerogel-Schaumbetonkern“ durchgeführt, in dem die Entwicklung eines innovativen einschichtigen Sichtbeton-Systems unter Einbindung einer Aerogel-Technologie zur energetischen Optimierung für den Wohnungsbau vorangetrieben wurde. Die drei Parameter Materialzusammensetzung, Fertigungstechnologie sowie Umsetzung der Konstruktion wurden synchron bearbeitet

und zu einem Produkt mit Anspruch auf Marktreife geführt. Die neue Systembauweise wurde im Hinblick auf einen sehr hohen Nachhaltigkeitsfaktor entwickelt (Ökobilanz). Das ZIM-Projekt wurde als Kooperationsprojekt von der TU Dortmund - Juniorprofessur REB/Lehrstuhl Baukonstruktion - und dem Kooperationspartner ‚G.tecz Engineering GmbH‘ im Zeitraum 08/17-03/20 durchgeführt. Die Forschungsleistung basiert auf Entwicklungen der Fa. G.tecz Engineering GmbH, welche von einem Lizenznehmer, der Fa. Housefabrik, zur Herstellung von Wand- und Fassadenpanelen aus UHPC-Beton genutzt wurden.

Das Potential der automatisierten Vorfertigung von monolithischen Betonbauweisen bestätigt sich in dem durchgeführten Forschungsprojekt. Der anhaltende Druck auf den Wohnungsmarkt der letzten Jahre gewinnt zunehmend an Relevanz und beeinflusst soziokulturelle, politische wie wirtschaftliche Faktoren. Um den Mangel an urbanem Wohnraum zu sättigen, müssen neue konstruktive Lösungen auf Basis von innovativen Fertigungstechnologien sowie neuen Material-

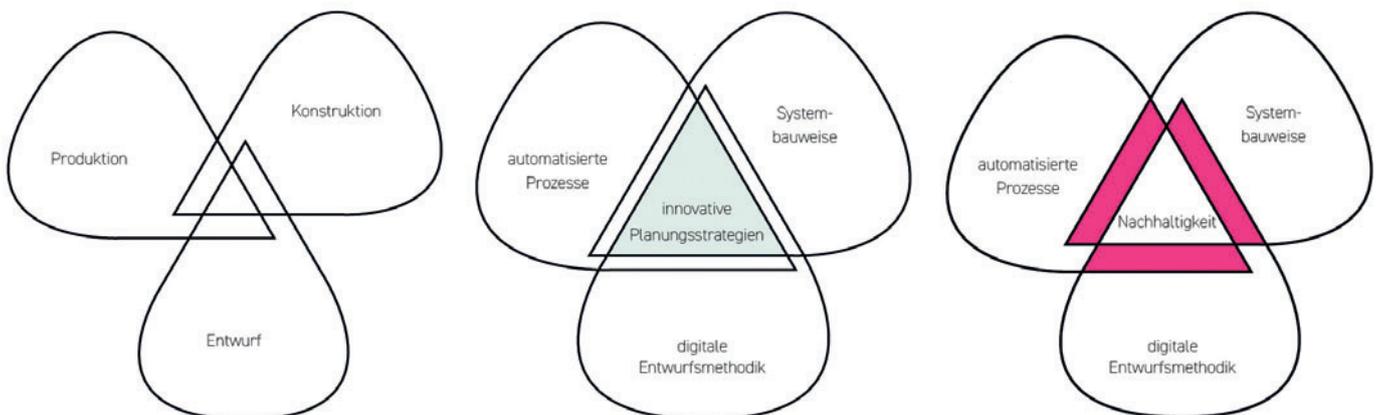


Abb. 1: Dreiklang - © TU Dortmund - Juniorprofessur REB



■ Jun. Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus ist eine Architektin, die die Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen an der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der TU Dortmund leitet. Bei ihrer aktuellen Tätigkeit konzentriert sie sich auf die Entwicklung von innovativen Planungsmethoden, die durch effiziente Fertigungstechnologien ein hohes gestalterisches Potential erreichen, und zu ökologisch, technisch und ökonomisch hochwertigen Lösungsansätzen im Bauen führen. Jutta Albus studierte Architektur an der TU Darmstadt und promovierte an der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart. Vor ihrer akademischen Tätigkeit hat sie projektleitend in internationalen Architekturbüros in London, Zürich und New York gearbeitet. Jutta Albus ist Aufsichtsratsmitglied der SSP AG in Bochum, einem Architektur- und Ingenieurbüro für Integrale Planung, und nimmt regelmäßig als Sachverständige und Fachpreisrichter an Architekturwettbewerben teil.

jutta.albus@tu-dortmund.de



■ Kirsten Hollmann-Schröter ist seit 2015 an der TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, in Lehre und Forschung tätig und begleitet dort im Gebiet „Dauerhafte Konstruktionen“ seit 2017 das Forschungsprojekt zur „Entwicklung von Hybridbeton-Elementen mit Aerogel-Schaumbetonkern“. Mit ihrer laufenden Dissertation verknüpft sie die Parameter digitales Gestalten, „intelligente“ Konstruktionen und automatisierte Produktion unter der Prämisse des Ressourceneffizienten Bauens. Diesen Schwerpunkt verfolgt sie darüber hinaus als selbstständige Architektin und Energie-Effizienz-Expertin. Kirsten Hollmann-Schröter hat ihr Architekturstudium an der Bauhaus-Universität Weimar und dem IUAV Venedig absolviert. Während ihrer neunjährigen Tätigkeit im international anerkannten Architekturbüro UNStudio, van Berkel en Bos, Amsterdam, hat sie zahlreiche Projekte in Entwurf und Umsetzung projektleitend begleitet.

kirsten.hollmann@tu-dortmund.de

zusammensetzungen entwickelt und auf den Markt gebracht werden.

Das Forschungsprojekt fokussiert darauf, die Betonbauweise synchron auf den Ebenen Materialzusammensetzung, Konstruktion und Fertigung zu optimieren. Dadurch soll ein möglichst nachhaltiges Produkt – bezogen auf den gesamten Lebenszyklus – generiert werden. Durch die Einbindung eines neuartigen Hybridbeton-Werkstoffs in den Produktionsablauf ist es möglich, geschosshohe Betonpaneele in einem Endlos-Fertigungsprozess herzustellen. Die Module bestehen aus zwei nanooptimierten HPC- oder UHPC- (Ultra High Performance Concrete) Deckschichten und einem hoch dämmenden und trotzdem tragfähigen Aeroleichtbeton-Kern. Der neuartige Hybridwerkstoff wird über ein zu entwickelndes Mischmodul in einen Endlos-Fertigungsprozess für Hybridbeton-Paneele integriert. Diese vorgefertigten Wand-, Boden- und Decken-Paneele werden über eine zu entwickelnde Fügetechnik zu geschosshohen Räumen in Tafelbauweise verbunden. Die besonderen physiko-chemischen Materialeigenschaften der Hybridbeton-Elemente erfordern die Entwicklung neuer Anschlussdetails, damit aus den automatisiert gefertigten Endlos-Paneele Wände, Decken, Böden und Öffnungen (Fenster und Türen) entsprechend der baukonstruktiven, gesetzlichen Vorgaben ausgeführt werden können.

Fachtechnischer Schwerpunkt in Bezug zur Architektur war die Entwicklung und Bewertung geeigneter Gebäudetypologien und die planerische Umsetzung und baukonstruktive Optimierung im Detailmaßstab. Die Entwicklung und Festsetzung der zu wählenden Grundrisstypologie soll die eigenen Vorteile der Hybrid-Betonelemente präsentieren.

REALIZE.ING.

Pemat 3D-Scan Technologie für eine perfekte Anlage

In der Planung eines Umbaus oder einer Erweiterung Ihrer Mischanlage überlassen wir nichts dem Zufall und verschenken keinen Millimeter Platz. Mit der Pemat 3D-Scan Technologie scannen wir den Innen- und Außenbereich Ihrer Anlage in allen Details. Zusätzlich können Sie am Computer Ihre zukünftige Anlage in einer virtuellen Realität entstehen lassen, sie begehen und testen – bevor auch nur eine Umbaumaßnahme begonnen hat.



Pemat 3D-scan technology for a perfect batching plant

In planning a modification or expansion of your batching plant we leave nothing to chance and we are not wasting any millimeter of space. With the Pemat 3D-scan technology, we scan the inside and outside of your plant in all details so we can rebuild it on the computer. Your future plant will be created in the virtual reality, that way you can inspect and test it – before even the modification has begun.

CONTROL.ING. PRODUCE.ING. SHOW.ING.

MIX.ING.

Mixing Technology made in Germany



Abb. 2: spezifische Materialmatrix des Hybridbetons -

© Gtecz Engineering GmbH

Die Stärken der Hybridbeton-Tafelbauweise liegen in der monolithischen Bauweise mit einem Material, das tragende Eigenschaften übernimmt und gleichzeitig eine hohe Dämmeigenschaft in einer Schicht bietet. Durch die Übernahme mehrerer Funktionen in einer Schicht grenzt sich das Material von anderen Systemen ab. In diesem Punkt wird deutlich, wie Materialzusammensetzung, Baukonstruktion und Typologie zusammenspielen. Die Entwicklung und Festsetzung der zu wählenden Grundrisstypologie soll die spezifischen Vorteile der Hybrid-Betonbauweise hervorheben. Durch die homogene Dämmwirkung über den gesamten Bauteilquerschnitt können wärmebrückenminimierte Anschlüsse realisiert werden. Das Material ist prädestiniert für die Umsetzung von Verstaubbildungen in der thermischen Außenhülle ohne einen erhöhten Aufwand in Konstruktion und Detaillierung zu generieren. Im Forschungsprojekt konnte eine zuvor angenommene gewonnene Flexibilität in der Anwendung bestätigt werden.

Vorfertigungsstrategie und Materialzusammensetzung

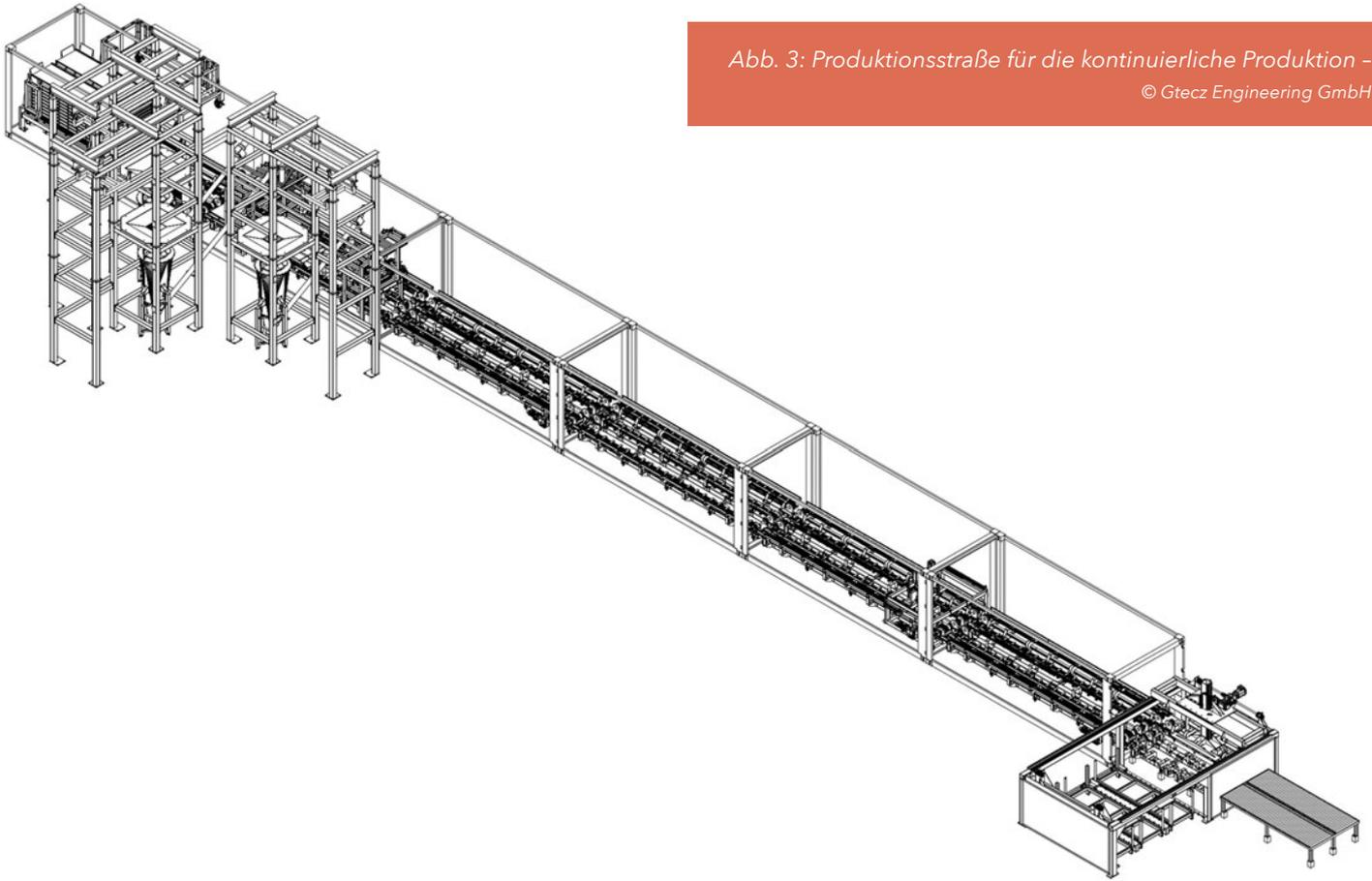
Erklärtes Ziel der Forschungsarbeit war die Entwicklung von neuartigen Konstruktionselementen aus Aeroleichtbeton Paneelen mittels eines automatisierten Fließfertigungsverfahrens zur Erstellung von kostengünstigen Wohnungsbauten. Die entwickelte Fertigungseinheit wurde als mobile Anlage konzipiert und erlaubt so eine, wenn erforderlich, lokale Produktion. Dieses Fertigungsprinzip zur Herstellung von Beton-

fertigteilen ist ein linearer, endloser Produktionsprozess, der vollständig automatisiert ausgeführt wird. Entsprechend der Parameter aus Entwurf, Bauphysik und Konstruktion kann die Maschine die Paneel-Geometrie in alle drei Dimensionen - Länge, Weite und Tiefe - anpassen.

Das modulare System basiert auf der Entwicklung einer spezifischen Materialzusammensetzung. Die bei Forschungsbeginn anvisierte Kombination aus zwei dünnen nanooptimierten UHPC-Deckschichten und einem hoch isolierenden und trotzdem tragfähigen Leichtbetonkern konnte verifiziert werden. Die wesentliche Herausforderung der Materialentwicklung lag darin, die Anforderungen an die Trageigenschaften mit den erforderlichen dämmenden Eigenschaften in einem Material zu kombinieren. Im Weiteren musste immer auch die Verarbeitbarkeit des Materials mit Bezug auf die spezifische Fertigungstechnologie Berücksichtigung finden. Als hochwärmedämmender Zuschlag wurden erstmals größere Volumenanteile Aerogel als Pulver in den schnellhärtenden Leichtbetonkern eingemischt. Mit der Einbindung der Aerogel-Technologie in den Fertigungsprozess ist es möglich, Hybridbeton-Paneele in einem Endlosprozess herzustellen und gleichzeitig alle Anforderungen an Statik, Brandschutz, Dichtigkeit und Wärmedämmung in einem monolithischen Element zu vereinen. Hierzu wurden diverse Materialproben erstellt und auf die statischen und bauphysikalischen Eigenschaften vermessen. Im Prozess der Materialentwicklung konnten die anvisierten Zielvorstellungen erreicht werden. Die finale Materialzusammensetzung erzielt die geforderte

Abb. 3: Produktionsstraße für die kontinuierliche Produktion –

© Gtecz Engineering GmbH



Trust in concrete innovation

Wer die Herausforderungen der Zukunft in der Betonproduktion erfolgreich umsetzen will, braucht kompetente Partner – Partner, die sich vertrauen und respektieren. WIGGERT versteht sich als Teampartner, der sich partnerschaftlich einbringt und Verantwortung übernimmt. Transparenz, Kooperation und Verlässlichkeit sind unsere Expertise – Budget-, Termin- und Qualitätssicherheit unsere Markenzeichen. Die Kompetenz zur Integration aller Bestandteile einer Betonmisch- und Transportanlage ist unser Credo und Innovation unser Versprechen.

Gemeinsam entwickeln und optimieren wir Ihre Vorhaben – Ihre Zukunft.

 **WIGGERT**[®]

WIGGERT & Co. GmbH
www.wiggert.com · info@wiggert.com

KABAG ist eine Marke der Firma WIGGERT.



#TrustInConcreteInnovation



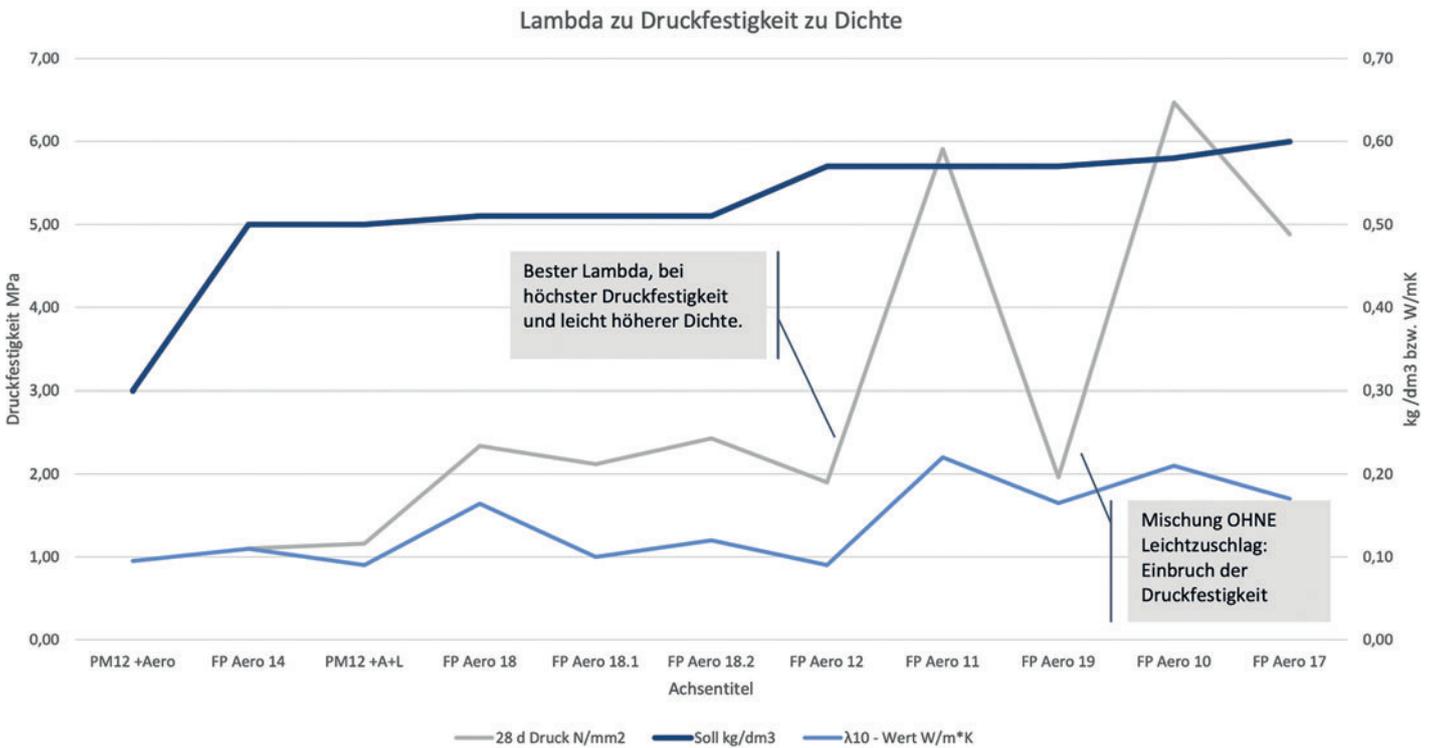


Abb. 4: Soll-Dichte in Bezug auf Lambda-Wert und Druckfestigkeit der Aerogel-Leichtbetone (Auszug) - © Gtecz Engineering GmbH

Wärmeleitfähigkeit von 0,088 W/mK bei einer Druckfestigkeit von 1,75 MPa. Diese Materialmatrix ermöglicht unter Einhaltung der aktuellen Anforderungen an die EnEV 2016 eine Wandstärke des Kernmaterials von 36 cm Dicke (nach Annahme Bauteilnachweis: max. zulässiger U-Wert für Wandbauteile von 0,24 W/mK).

Allgemein bekannter kausaler Zusammenhang ist, dass mit steigender Dichte die Druckfestigkeit zunimmt. Interessant ist hier die Auswirkung von Aerogel im Verhältnis zum Leichtzuschlag, welcher in den Schaumbeton eingemischt wird. Ohne Leichtzuschlag, jedoch mit hohem Aerogelanteil ist der Lambda-Wert sehr niedrig, aber auch die Druckfestigkeit gering und das Material neigt zu starkem Schwinden. Durch die Erhöhung des Leichtzuschlag-Anteils steigt die Druckfestigkeit bei reduziertem Aerogelanteil. Die Versuchsreihe FP AERO 12 weist die effektivste Kombination von Aerogel, Leichtzuschlag und Schaumbetonanteil auf.

Eine der Innovationen in der Produkt- und Prozessentwicklung war die Beherrschung und Berücksichtigung der hydrophoben Eigenschaften von Aerogel mit den regulären Bestandteilen einer Betonmischung. Dieser Konflikt ist bei der Entwicklung von Schaumbeton gegenüber Normalbeton verschärft. Die schaubildenden Zusatzmittel, Aerogele und Leichtzuschläge stehen hier aufgrund des Wasseranspruchs und der mechanischen Einwirkungen im Herstellungsprozess in Wechselwirkung und beeinflussen unmittelbar die Dichte, Fließfähigkeit und letztlich Festigkeit des Betons. Einhergehendes Ziel der Entwicklung war es, den Anteil von Aerogel

zu reduzieren, um eine Wirtschaftlichkeit des Produktes zu gewährleisten. Resultat des Projekts ist ein ökonomischer und ökologischer Aerogel Leichtbeton, genannt ‚Aeroleichtbeton‘, der einen optimierten Aerogelanteil in Kombination mit Leichtzuschlägen (Blähglas) und Schaumbeton auf UHPC-Leimbasis vereint.

Die im Forschungsprojekt formulierte Zielsetzung, kostengünstige Systembauweisen zu etablieren wird im Wesentlichen durch die derzeit noch hohen Rohstoffpreise des verwendeten Aerogel-Pulvers (45-85 €/kg je nach Hersteller) bestimmt. Aus der Kooperation mit einem führenden Aerogelhersteller zeichnet sich jedoch ab, dass der Aerogel Preis mit einer Produktionssteigerung deutlich fallen kann. Eine erfolgversprechende Markteinführung ist hier mit bisherigem Fokus auf den kostengünstigen Wohnungsbau auch von einer wirtschaftlichen Materialzusammensetzung abhängig.

Bereits jetzt kann der entwickelte Aeroleichtbeton pro m² Wand den Marktpreisen, basierend auf deutschen Rohstoffpreisen, standhalten. Marktwirtschaftlich interessant ist die Technologie auch für Länder, in denen Rohstoffe, wie z. B. Zemente oder andere Feinstoffe deutlich günstiger sind. Durch die Nutzung überwiegend lokaler Rohstoffe für die Produktion sinken Material- und Produktionskosten deutlich.

Aeroleichtbeton kann in einer definierten Bandbreite von Festigkeit und Dämmeigenschaft hergestellt werden. Der im Projekt ermittelte ‚optimale‘ Aeroleichtbeton weist folgende Eigenschaften auf:

WELTWEIT

KOMPETENT

KÜBELBAHNANLAGEN

BETONVERTEILERANLAGEN



Abb. 5: Schaumbetonprobekörper in Kombination mit Aerogelpulver - © Gtecz Engineering GmbH

Aeroleichtbeton

Dichte:	550 kg/m ³
Druckfestigkeit:	1,75 MPa (nach 7 Tagen)
Schnellbeton*):	0,67 MPa (nach 15 Minuten); 1 MPa (nach 60 Minuten)
Lambda:	0,088 W/mK
Wandstärke:	36 cm nach EnEV 2016
Materialkombination:	UHPC, Schaumbeton, Aerogel, Leichtzuschlag

*) Basiert auf einer anderen Rohstoffauswahl und Aeroleichtbetonrezeptur.

Produktionstechnologie der Bauteile

Für den Endlosfertigungsprozess werden die Betonschalungen auf einem fortlaufenden Transportband mit offener Deckseite angeordnet. Der Beton wird bei kontinuierlichem Betrieb von oben über ein spezielles Mischmodul eingebracht, wahlweise in mehreren, hintereinander geschalteten Einheiten. Der Aeroleichtbeton wird für die maschinelle Verarbeitung auf dieser Anlage automatisiert der Extrusions-Einheit zugeführt. Hier können in Bezug zu ihren Eigenschaften unterschiedliche Betone, d.h. UHPC, HPC oder Aeroleichtbeton in variierenden Schichtstärken verwendet werden.

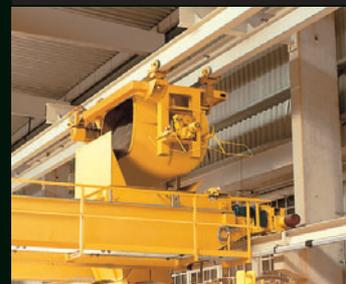
Die Materialeigenschaften des Werkstoffs und die Produktionstechnologie bedingen einander. Der Innovationsschwerpunkt liegt auf der Skalierung des Produktionsprozesses vom Labor zu einer industrietauglichen Massenproduktion.



Einschienebahn Kippkübel



Bodentleerkübel



Zweischienebahn Kippkübel



Bodentleerkübel



Halbportalverteiler



Schrägaufzug



Halbportalverteiler



Deckenfertiger



Verwaltung und Produktion in Deutschland

KÜBAT
Förderanlagen GmbH
Max-Planck-Str. 14
D-88361 Altshausen

Telefon: 0 75 84/92 09-0
Telefax: 0 75 84/92 09-20
E-Mail: info@kuebat.de
Internet: www.kuebat.de



Abb. 6: Aeroleichtbeton (500 kg/m³) Testproduktion mit ca. 1 m³/min Produktionsgeschwindigkeit
© Gtecz Engineering GmbH

Dies ist effektiv nur möglich, wenn die Produktionstechnologie bzw. das Mischmodul auf die Verarbeitung von Aerogel, Leichtzuschlag und Schaumbeton abgestimmt ist. Für die Verarbeitung auf der Anlage benötigt der Aeroleichtbeton eine niedrige Viskosität im Misch- und Pumpvorgang, eine mittlere Viskosität beim Einbringen in die Schalung und eine hohe Viskosität bzw. hohe Festigkeit innerhalb von wenigen Minuten, damit die hintere Deckschicht aufgebracht werden kann.

Im folgenden wird mittels einer Trenneinheit die Betontafel, nach einem in Bezug zur Aushärtung abhängigen Vorschub, automatisiert in gewünschte Elementlängen getrennt. Daraus resultieren bestimmte Vorgaben an die Materialeigenschaften wie Konsistenz, Fließverhalten, Viskosität und Abbindegeschwindigkeit. Durch eine spezifische Materialkonsistenz und aufgrund schneller Aushärtung wird eine umgehende Aufbringung der unterschiedlichen Schichten in einem Nass-in-Nass-Verfahren ermöglicht. So kann beispielhaft bei einer Produktionsgeschwindigkeit von 1 m/min und einer Paneelbreite von 1,4 m eine Produktionsmenge von 84 m² in einer Stunde gefertigt werden. Jedes Paneel kann optional durch einen RFID-Code gekennzeichnet und so über den gesamten Lebenszyklus verfolgt werden. Die Elemente verbleiben nach der Fertigung ca. 48 Stunden zum Aushärten in einer Schalung und können anschließend entnommen werden. Der komplette Prozess kann erheblich beschleunigt werden, indem hochreaktive Rohstoffe zur Herstellung genutzt wer-

den. Die Entwickler konnten so einen Aeroleichtbeton schaffen, der bereits nach 15 Minuten so fest ist, dass er aus der Fertigungsstraße entnommen werden kann. Die Produktion erfordert in diesem Fall jedoch einen sehr hohen Grad der Automatisierung und eine Abstimmung des Materialstroms.

Die untersuchte Anlagentechnik erlaubt in Verbindung mit dem standardisierten Produktionsablauf und dem verbundenen Wissenstransfer weltweit die Herstellung von Wandtafeln in Beton mit hoher Maßgenauigkeit und Oberflächenqualität bei großen Produktionsvolumen. Die vorgeschlagene Automatisierung der Fertigung in Verbindung mit den gesetzten Qualitätsstandards ist unter Berücksichtigung der Anlagengröße im Bausektor neu. Die beschriebene Mobilität bezieht sich hier im Wesentlichen auf die Möglichkeit, weltweit gleiche Produktionsstandards für Fertigteile anzubieten. Der Platzbedarf für die Lagerung der erforderlichen Rohstoffe und die einhergehenden produktionsbedingten Abläufe erfordert neben der eigenständigen Anlagentechnik eine funktionierende Infrastruktur. Die „mobile Fabrik“ ist hier nicht unmittelbar Bestandteil der lokalen Baustelleneinrichtung, sondern definiert Mobilität als Synonym, weltweit mit einer spezifischen Anlagentechnik gleiche Produktionsbedingungen und Standards abbilden zu können. Es wird angenommen, dass die Anlagentechnik bei kleinen und mittleren Bauvorhaben in der Regel baustellenunabhängig auf einem eigenen Gelände fest installiert ist.

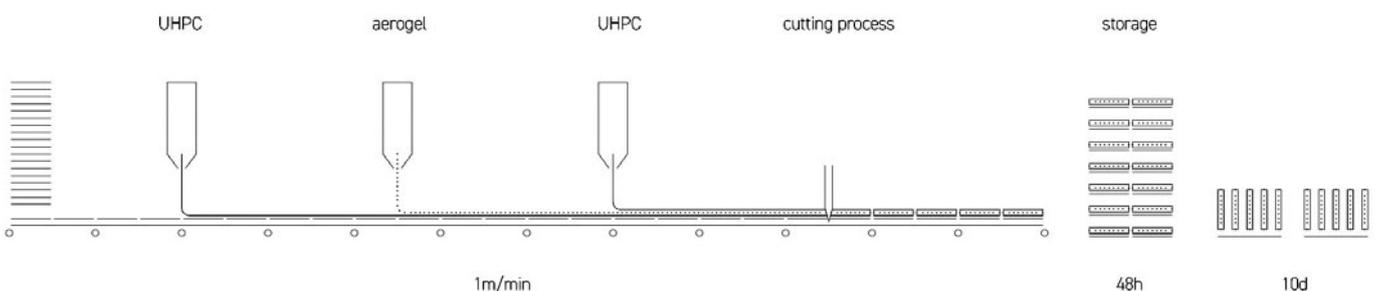


Abb. 7: Extrusionsverfahren im Endlos-Fertigungsprozess – © TU Dortmund - Juniorprofessur REB



Abb. 8: Hybridbeton-Elemente mit UHPC-Deckschicht -

© Gtecz Engineering GmbH

Prototypische Entwicklung zur Überprüfung von Material und Konstruktion

Die Entwicklung hatte ursprünglich zum Ziel, Wand-, Boden- und Deckenelemente in einem geschlossenen System aus Hybridbeton-Elementen zu erarbeiten und zur Marktreife zu bringen. Dadurch ergeben sich Vorteile bei der Abwicklung, da die Bauteile komplett aus einer Hand kommen und sich somit Synergien im Fertigungs- und Montageablauf ergeben. Die Forschungstätigkeit konzentrierte sich im ersten Schritt auf die Erstellung und Fügung von Wandelementen.

Das Prinzip der Hybridbetontafelbauweise wurde im Entwurfsprozess zu einem offenen Systembaukasten erweitert, wobei die Hybridbeton-Wandelemente mit Betonfertigteilen (vorgespannte Stahlbetondecken etc.) kombiniert wurden. In dieser Konstellation können Nachhaltigkeitspotentiale sowie

Wirtschaftlichkeitsaspekte besser ausgeschöpft werden. Es birgt Vorteile, verschiedene vorgefertigte Systeme zu kombinieren, sodass jedes Material entsprechend seiner Qualitäten optimal zum Einsatz kommt. Letzten Endes führt ein hoher Vorfertigungsgrad auch zu schnelleren Planungs- und Bauprozessen.

Im Forschungsverlauf wird deutlich, wie flexibel das entwickelte Aeroleichtbeton-Material auf die Anforderungen an den Wärmeschutz, Schallschutz und das Tragverhalten in Kombination mit den Anforderungen an die Gestaltung eingehen kann. Es wurden zwei Materialentwicklungen vorangetrieben: Ein Hybridbeton-Wandelement (Kombination aus Leichtzuschlag, Aerogel und UHPC-Deckschicht) und ein hochwärmedämmendes Paneel (nur Aerogel und Leichtzuschlag). Langfristig ist vorgesehen, die Aeroleichtbeton-Technologie ebenfalls für Deckenelemente einzusetzen.



FL-MIKRO T2

Präzision aus Tradition

- höchste machbare Genauigkeit
- robust und langlebig
- einfache und selbsterklärende Bedienung
- hat serienmäßig das, was man braucht

Läuft bei uns ;-)



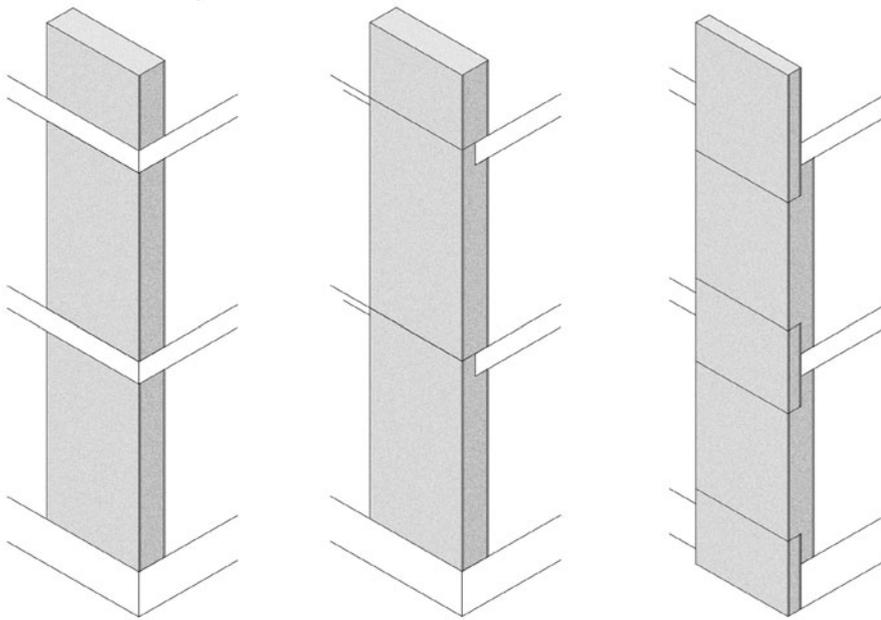


Abb. 9: Konstruktionsprinzipien -
© TU Dortmund - Juniorprofessur REB

Abb. 10: Prototyp Erstellung
und Langzeitmonitoring -
© TU Dortmund - Juniorprofessur REB



Dann wird durch den Einsatz für die Funktion optimierter Bauteile das maximale Maß der individualisierten Standardisierung umgesetzt werden. Die Hybridbeton-Tafelbauweise kann durch die automatisierte Fertigung und Zusammenschaltbarkeit der Mischmodule optimal auf projektspezifisch definierte Anforderungen reagieren und diese umsetzen.

Konstatiertes Potential der Produktentwicklung liegt in der oberflächenfertigen Erscheinung der Wandpaneele. Durch die UHPC-Deckschicht sind keine weiteren Gewerke wie Stukaturarbeiten erforderlich. Die Reduktion der auf der Baustelle erforderlichen Teilnehmer hat positiven Einfluss auf die Bau- und Planungszeit sowie die Gesamtkosten des Vorhabens. Ziel der Forschungsleistung war die Suche nach einer Farbgebung, die einerseits produktspezifisch einen hohen Wiedererkennungswert definiert und andererseits ein Wohnumfeld hoher Behaglichkeit für den Nutzer schafft. Teilweise sind Farbfamilien in Referenz zu verwendeten Materialien und

eigenen Erfahrungen negativ konnotiert. Grüne Farbtöne suggerieren Baumängel hinsichtlich Algenbildung und Vermoosung der Fassade. Das Spektrum grauer Farben ist in Teilen der Bevölkerung in Verbindung mit Beton negativ definiert. Die Akzeptanz einer neuen Produktfamilie für die Hybridbeton-Tafelbauweise kann möglicherweise mit einem warmen Farbkanon (rötlich/gelblich) signifikant erhöht werden. Generell gilt, dass durch den automatisierten Produktionsprozess projektspezifische Farb- und Oberflächenstrukturen angepasst werden können.

Architektonische Parameter, konstruktive Abhängigkeiten und technische Ausführung

Dem Forschungsprojekt liegen umfangreiche Recherchen zum Thema ‚monolithische Konstruktionen‘ und ‚Vorfertigung‘ zugrunde. Der Einsatz von seriell gefertigten Komponenten erfordert eine Planungsleistung, die den hohen Wieder-

Feuchtigkeitssteuerung für den perfekten Beton

Einführung der nächsten Generation von Sensorschnittstellen

HYDRONIX IST ONLINE

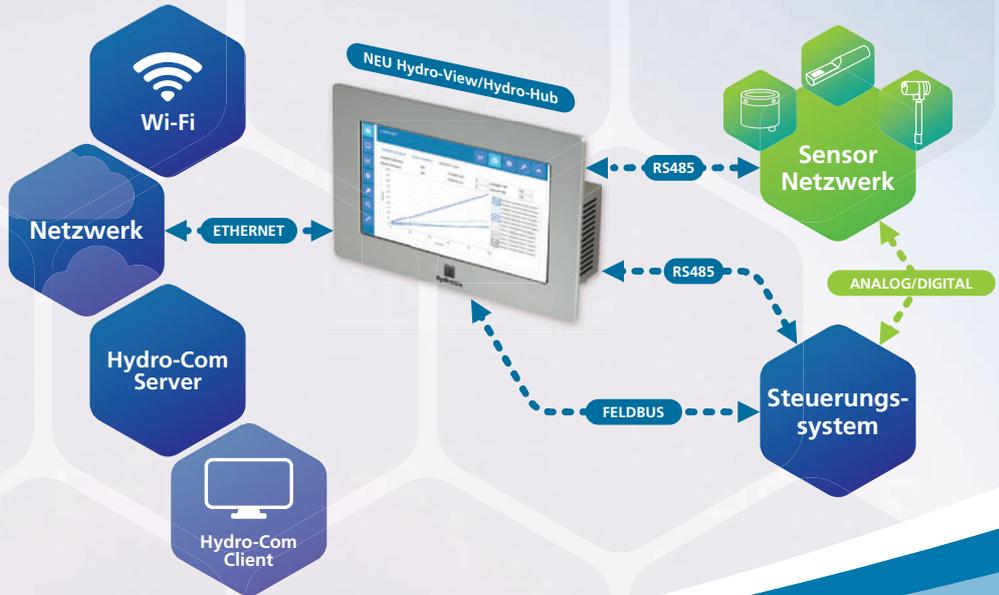
Wir sind bereit zu helfen

Hydronix steht bei allen technischen Support-Anforderungen zur Verfügung.

- Angeschlossene, intelligente Sensoren
- Hochqualifiziertes Team
- Fernunterstützung und Ferndiagnose.

Sichere Unterstützung Ihres Werks.

Sie können sich auf uns verlassen.



enquiries@hydronix.com

www.hydronix.com


Hydronix

ARCEN[®]
BATCHING, MIXING, RECYCLING AND AUTOMATION
Gemeinsam schaffen wir Lösungen!

STATIONÄRE ANLAGE
MOBILE ANLAGE
"EXPRESS"-ANLAGE
BRECHANLAGEN
ASPHALTMISCHANLAGE

www.arcen.com

CHARGENMISCHANLAGEN
AB100M

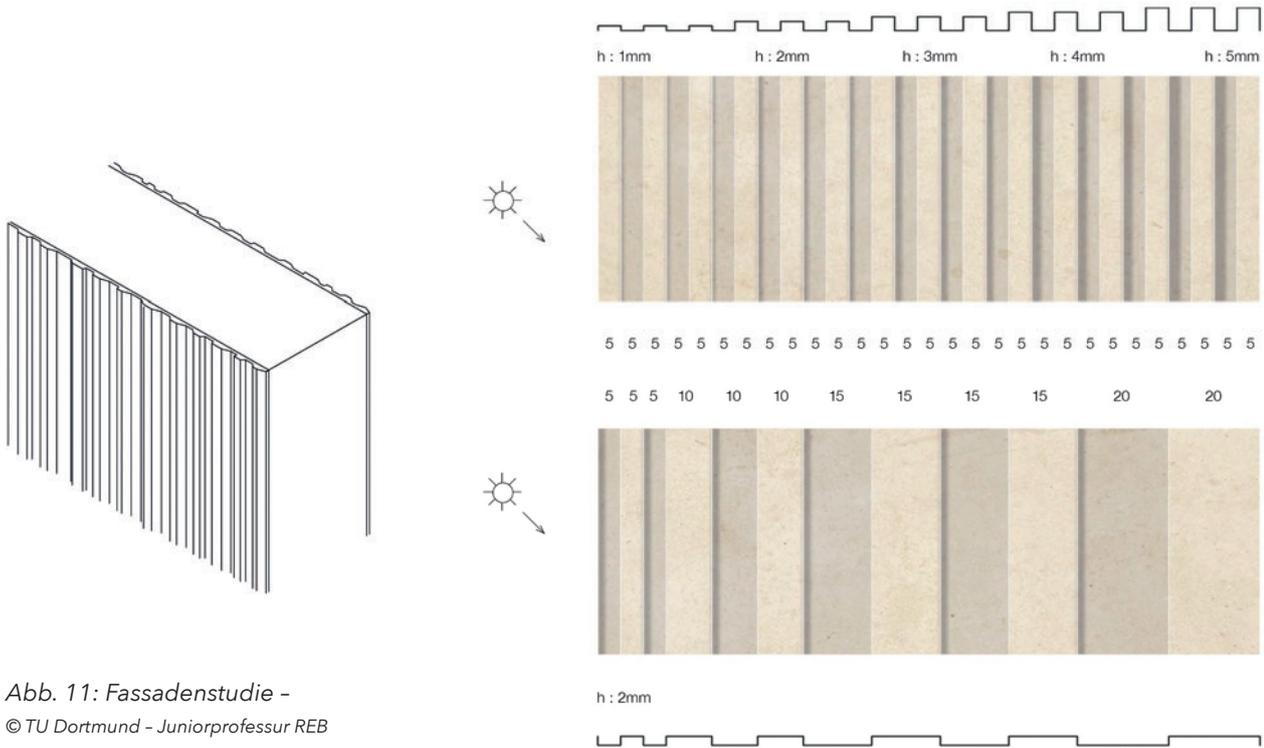


Abb. 11: Fassadenstudie -
© TU Dortmund - Juniorprofessur REB

holungsfaktor einzelner Elemente geschickt nutzt und in anpassungsfähige Lösungsansätze überführt. Dadurch werden zum einen effiziente Ablaufszenarien generiert und zum anderen kann die Vielseitigkeit der architektonischen Gestaltung gewährleistet werden. Aufgrund der monolithischen Eigenschaft der Hybridbeton-Paneele und der oberflächenfertigen Produktion der Elemente rückte das sich ergebende Fugenbild an der Fassade und im Innenraum in den Fokus der Forschung. Ziel war es, den Rhythmus der Fugenstöße, der sich projektspezifisch verändert, über die Einbindung der Fuge in die vertikal gestaltete Oberflächenstruktur als produkteigenes Merkmal heraus-

zuarbeiten und als gewisses Prinzip zu entwickeln. In der Schalung eingelegte Matrizen ahmen die Stoßfuge in ihrer Struktur nach. Es konnte nachgewiesen werden, dass das ursprüngliche Fugenbild durch die gestalterische Überhöhung deutlich an Sichtbarkeit verliert und eine flächige Wirkung erzeugt werden kann. Im Forschungskontext wurden unterschiedliche Strukturmatrizen entwickelt und deren Qualität und Wirkung analysiert. Zudem wurden drei Lösungsansätze des baukonstruktiven Fügeprinzips entwickelt und diese jeweils hinsichtlich ihrer gestalterischen Qualitäten in der Fassadengliederung untersucht. Diese Konzepte wurden exemplarisch an gerenderten Visualisierungen überprüft.

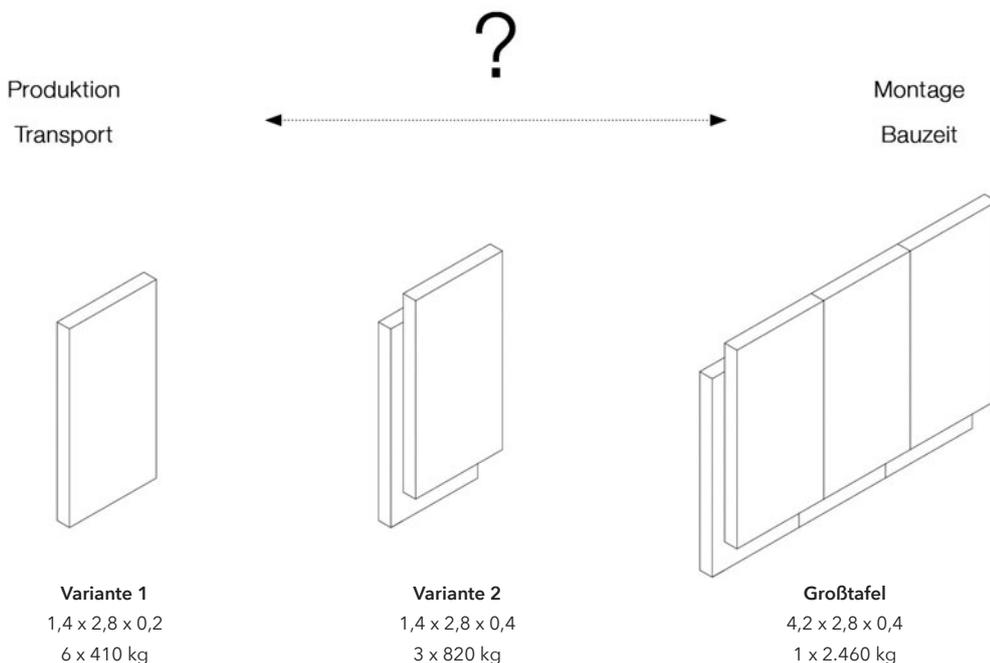


Abb. 12: Verhältnis von Bauteilgröße und Fügeprinzip -
© TU Dortmund - Juniorprofessur REB

Zu Beginn der Forschungstätigkeit wurde das Verhältnis von Bauteilgröße (Tafel), Fügeprinzip und Grad der Vorfertigung untersucht. Bei allen Untersuchungen wurden die Anschlusspunkte stets dreidimensional betrachtet. Ein Hybridbeton-Element hat vier Bauteilkanten. Es wurde zum einen das vertikale Fügeprinzip an Decken-/Dachelement und Fußpunkt untersucht sowie der horizontale Anschluss an ein angrenzendes Wandelement, ein Öffnungselement und die Ecksituation.

Einstieg aller Betrachtungen bildete der Falz als beispielhafte Art der Fügung. Der Falz kann durch zwei Tafeln mit je halber Wandstärke und somit ein Verschieben der Elemente gegeneinander ausgebildet werden. Alternativ kann der Falz bereits im Fertigungsprozess erstellt werden. Es wurde untersucht, dass sich fertigungstechnisch in Fließrichtung andere Möglichkeiten der Ausgestaltung der Bauteilkante ergeben als orthogonal zur Fließrichtung. Generell besteht die Möglichkeit, die Bauteilkante in Längsrichtung durch das Einlegen von additiven Elementen in die Schalung zu modifizieren. In Querrichtung wäre diese Möglichkeit wesentlich aufwendiger zu erstellen. Alternativ kann eine Nachbearbeitung z.B. durch ein nachträgliches Fräsen der Paneele erfolgen. Diese Art der Bearbeitung erfordert jedoch einen weiteren Produktionsschritt, der mit Maschineneinsatz, Zeitaufwand und Manpower hinterlegt ist und daher nicht im Forschungsprojekt anvisiert wird.

Der Forschungsleistung wurde zu Grunde gelegt, dass die Vorfertigung und Vorbereitung der baukonstruktiven Anschlüsse weitestgehend ins Werk verlegt und tafelgroße Elemente auf der Baustelle gefügt werden. Im weiteren Forschungsverlauf wurde prinzipiell eine Realisierung des kompletten Wandelementes weiterverfolgt. Außerdem wurde eine Integration des Bauteilanschlusses in den Produktionsprozess angestrebt. Die weitere Detailentwicklung ist maßgeblich durch die Fügung der vorgefertigten Wandbauteile

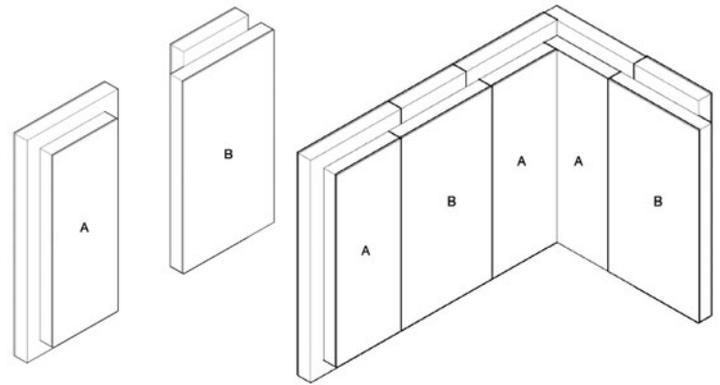


Abb. 13: Modulare Fügeprinzipien -

© TU Dortmund - Juniorprofessur REB

bestimmt. Die Geometrie und Erscheinung der Fuge wird durch zwei sich gegenseitig beeinflussende Größen bestimmt: die Fugenbreite und den Fugenquerschnitt.

Laborproben

Im Rahmen des Projekts wurden über 60 verschiedene Material- und Produktionskombinationen getestet. Aufgrund der Leicht- und Aerogelzuschläge waren gängige Betonentwicklungs- bzw. -berechnungsmethoden nicht realisierbar. Begründet liegt dies im gegensätzlichen Verhalten des hydrophoben Aerogels, dem Wasseranspruch des Leichtzuschlags und der Zusammensetzung des Schaumbetons. Die erstellten Musterpaneele wurden im Labor auf Druck- und Biegezugfestigkeiten geprüft und bauphysikalisch vermessen. Daraus ergab sich eine Korrelation der Performance aus mechanischen und physikalischen Eigenschaften, welche letztlich zur Wahl der besten Material- und Produktionskombination führte.

Wir geben Recycling
eine neue Qualität.

MC-PowerFlow evo – Hochleistungsfießmittel

Der Einsatz von Recyclingwasser und Recyclingmaterial in schwankenden Qualitäten sind aktuelle Herausforderungen bei der Betonherstellung. MC-PowerFlow evo basiert auf einem modifizierten Polymerisationsprozess und sorgt für zuverlässige Frisch- und Festbetoneigenschaften auch unter schwierigen Rohstoffbedingungen.

- Sehr schneller Aufschluss beim Mischen
- Wirkungsvolle Verflüssigung
- Steuerbare/zuverlässige Konsistenzhaltung
- Schnelle Festigkeitsentwicklung

EXPERTISE
ADMIXTURES & ADDITIVES

MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG · Am Kruppwald 1-8 · 46238 Bottrop · Tel. +49 2041 101-50 · CI@mc-bauchemie.de · mc-bauchemie.de



BE SURE. BUILD SURE.

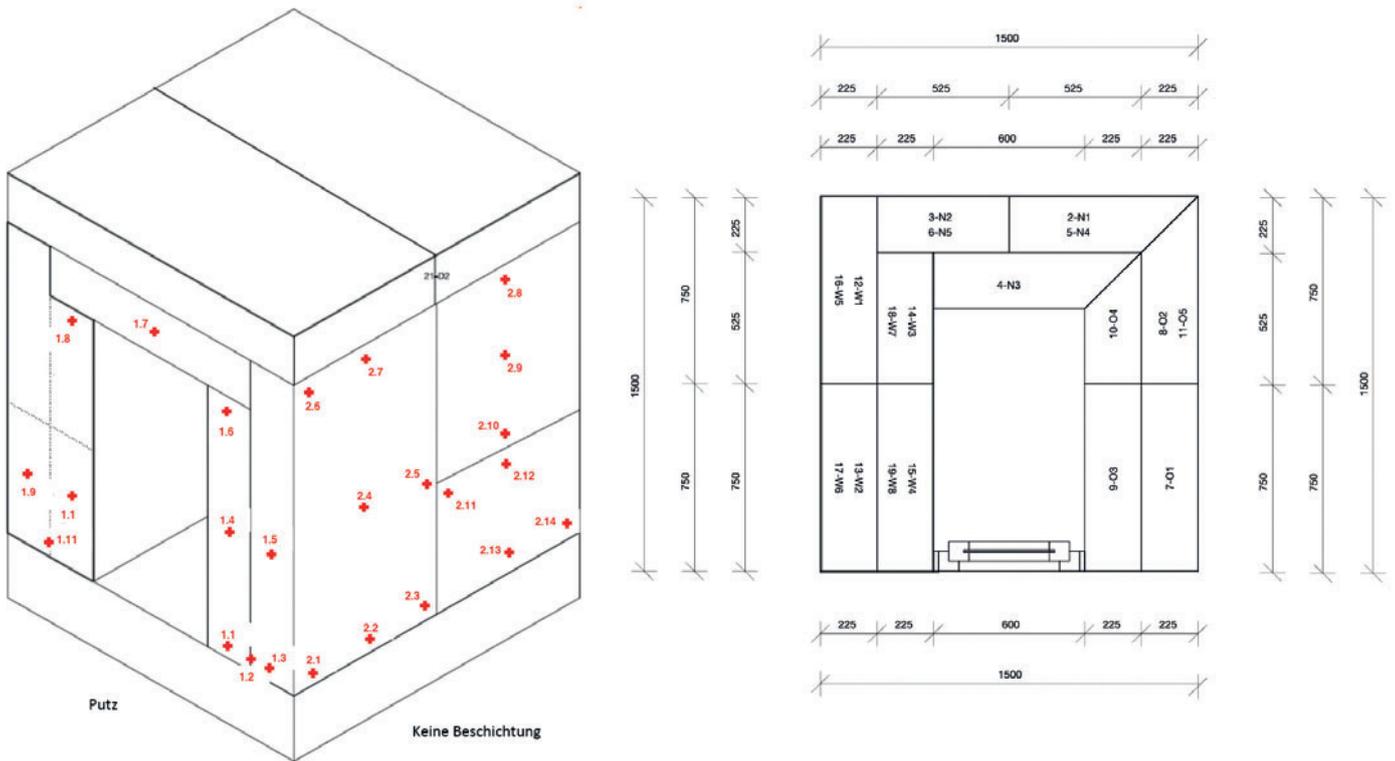


Abb. 14: Vermessungen am Prototyp - © TU Dortmund - Juniorprofessur REB

Versuchsstand

Gegenstand der Forschungsleistung war neben der Erstellung und Vermessung von Probekörpern und die Durchführung eines Langzeit-Monitorings an einem Prototyp in realem Maßstab.

Nach der prinzipiellen Entwicklung aller Anschlussdetails und Fügetechnik sowie aus dem Prozess der Materialentwicklung konnte in der Optimierungsphase letztendlich eine Materialzusammensetzung gewählt werden, die als Grundlage für den Prototyp fixiert wurde. Der Versuchsstand hatte eine Grundfläche von 1,5 m x 1,5 m und eine Höhe von 1,95 m. Integriert und kombiniert wurden verschiedene Stöße an Wand-, Boden-, Deckenelementen und Öffnungsflügeln (Fa. Solarlux) mit und ohne Deckschichten sowie in Kombination mit einem UHPC-Fugenmaterial und einem polymer angereicherten Fugenmaterial. Das Langzeit-Monitoring des Versuchsstands läuft aktuell noch, die anvisierten Zielvorstellungen konnten erreicht werden und geben Aufschluss über die Realisierbarkeit und die Produktreife der neuen Entwicklung.

Fugenausbildung

Beide gewählten Fugenmaterialien erzielten an Labormustern im Vergleich eine hohe Zug- bzw. Biegezugfestigkeit; grundsätzlich riss der Probekörper jedoch immer neben der Klebefuge und nie in der Fuge selbst. Im Versuchsbauwerk wurden die verschiedenen Fugenmaterialien in horizontalen und vertikalen Fugen getestet, um das Verhalten der Wandelemente zu analysieren und mögliche Fehl- oder Schadensverläufe zu provozieren und zu ermitteln.

Unter Umwelteinflüssen zeichnet sich ab, dass es in Wandelementen ohne Deckschichten in Kombination mit einem UHPC Leim zu Rissbildungen in den vertikalen Fugen kommt. Dieses Phänomen beruht klassisch auf den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen ‚weichem‘ Bauteil und ‚steifem‘ Fugenmaterial. Erzeugt werden interne Zugspannungen im Aeroleichtbeton, die zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht weiter aufgenommen werden können. Unterschiede je nach Wetterseite können hierbei beobachtet werden.

Die getestete konventionelle Nass-Fügetechnik für vertikale Fugen entspricht aktuell nicht dem hohen Standard der vorgefertigten Elemente. Die oberflächenfertigen Wandpaneele in Sichtbetonqualität mit gestalteter Struktur und Farbigkeit spiegeln nicht den geforderten durchgängig standardisierten Bauablauf. Die Lösung liegt baukonstruktiv in einer vertikalen, trockenen Fügetechnik mit reversiblen Verbindungen.

Wärmeleitfähigkeit

Im Laufe der Entwicklungen wurde ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Aerogel Leichtbetone in Abhängigkeit der Rohdichte vorgenommen. Im Diagramm kann man ablesen, dass das entwickelte Kernmaterial mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,088 W/(mK) im Vergleich zu anderen zementbasierten Baustoffen sehr niedrig ist. Im engeren Vergleich haben nur die Systemwandelemente PP2/AAC 2,5 von Ytong eine vergleichbare Wärmeleitfähigkeit, dieses Material hat jedoch im Vergleich eine geringere Rohdichte. Eine kleinere Rohdichte deutet wiederum auf eine geringere Druckfestigkeit und ein schlechteres Bauschalldämmmaß hin. Im Vergleich zum Infralichtbeton haben beide Materialien

Den Fortschritt erleben.



Qualitätsbeton „just in time“

- Betonmischanlagen nach Kundenwunsch
- Eigene hocheffiziente Mischersysteme
- Mit Umlaufanlagen und Kübelbahnen kombinierbar

Liebherr-Mischtechnik GmbH
88427 Bad Schussenried
Tel.: +49 7583 949 0
E-Mail: info.lmt@liebherr.com
www.facebook.com/LiebherrConstruction
www.liebherr.com

LIEBHERR

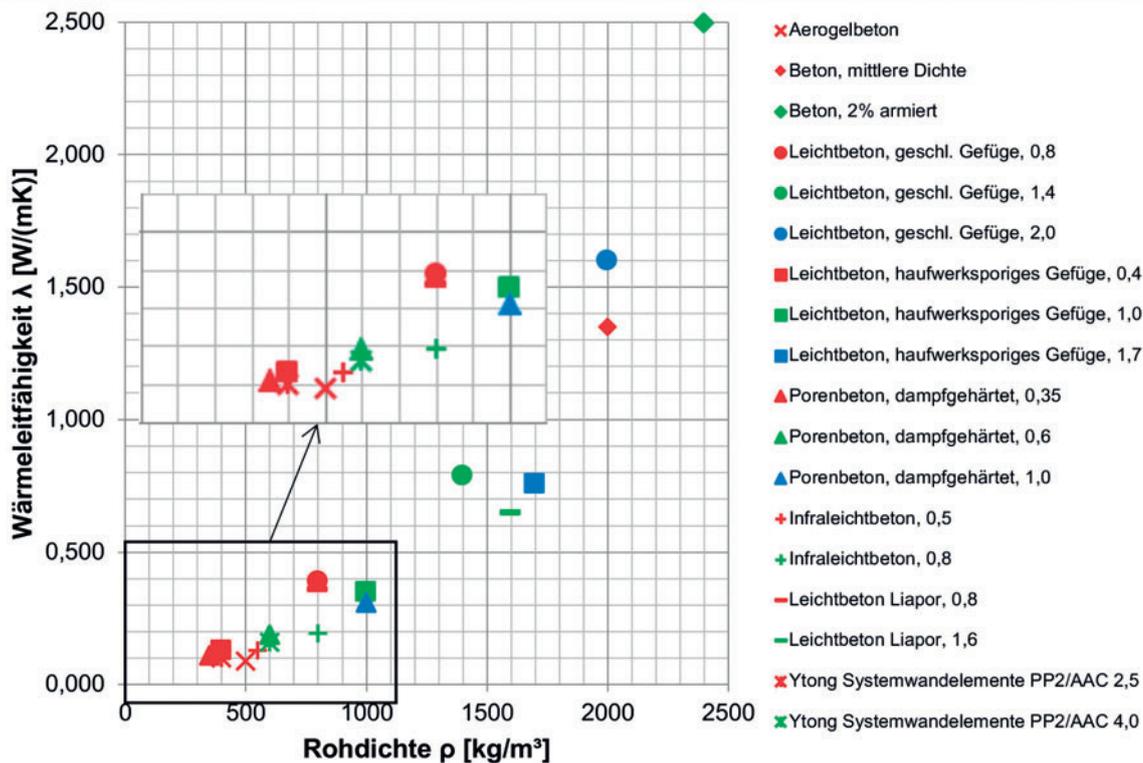


Abb. 15: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Betone in Abhängigkeit von der Rohdichte - © TU Dortmund - Juniorprofessur REB

eine sehr ähnliche Rohdichte, dafür ist die Wärmeleitfähigkeit des Aeroleichtbetons besser. In der Zusammenschau hat der Aeroleichtbeton somit einen deutlichen Mehrwert gegenüber vergleichbaren Materialien.

Bauteilkatalog

Parallel zur Realisierung am Prototyp hat die Entwicklung eines Bauteilkatalogs dazu beigetragen, das hohe Potential einer individualisierten Standardisierung auf Basis der Betonbauweise zu veranschaulichen. Durch die umfassende Auswahl der erarbeiteten Leitdetails konnten die Vorteile der Hybridbeton-Tafelbauweise mit Aerogel-Schaumbetonkern für eine konstruktive und architektonische Umsetzung nachgewiesen werden.

Etablierung durchgängig digitaler Prozessketten vor dem Hintergrund des ressourceneffizienten Bauens

Mittels digitaler Entwurfswerkzeuge werden durchgängige Prozessketten auch im Bauen möglich, und ein direkter, verlustfreier Übergang zwischen Planung und Fertigung etabliert. Durch die Entwicklung neuartiger Fertigungstechnologien werden künftig Potentiale auf kreativer wie konstruktiver Ebene geschaffen, die dazu beitragen, trotz eines hohen Standardisierungsgrades eine gewisse Varianz von Komponenten sicherzustellen. Sie bilden die Grundlage für gestalterisch wie ausführungstechnisch hochwertige Entwürfe.

Progressive Entwicklungen wie die hier erforschte Hybridbeton-Tafelbauweise betrachten alle drei Faktoren - Materialzu-

sammensetzung, Konstruktion und Fertigung - vor dem Hintergrund einer Steigerung der Effizienz und Ausweitung von automatisierten Prozessen in der Vorfertigung. Die Entwicklung zielte darauf ab, zum einen zukünftigen Herausforderungen im Wohnungsbau gerecht zu werden und zum anderen die Nachhaltigkeit von Beton zu verbessern. Durch die Bereitstellung einer wirkungsvollen, ökonomisch rentablen Konstruktionsmethode - in Form der Hybridbeton-Module - konnte ein standardisiertes System zu einem Produkt mit Anspruch auf Marktreife geführt werden, das durch die Einbindung digitalisierter Entwurfsprinzipien und einer automatisierten Fertigung die Probleme bisheriger Standardisierungsprozesse überwindet. Eine konsequent implementierte Digitalisierungsstrategie in allen Bereichen führt zu einem durch und durch adaptiven Produkt:

1. Spezifische Materialtechnologie

Eine automatisierte Anpassung der Materialzusammensetzung an sich wandelnde Anforderungen wie statische Gegebenheit oder bauphysikalische Anforderungen wird durch die entwickelte Materialtechnologie und Überführung in den automatisierten Herstellungsprozess ermöglicht.

2. Variabilität in der Paneel-Dimension

Projektspezifisch können Wanddicke, Schichtenaufbau und Paneel-Abmessungen definiert werden und so maximalen Gestaltungsfreiraum geben. Der Fertigungsprozess ermöglicht eine automatisierte Anpassung der Schaltechnik und eine Kombination unterschiedlicher Mischmodule.

CDS

CURING

CONCRETE CURING SYSTEMS

HS

CURING RACK SYSTEMS

The perfect partnership FOR CONCRETE CURING SYSTEMS

CDS Curing

W www.cds-concrete.com

E info@cds-concrete.com

T UK +44 (0) 1782 336666 | USA +1 973-641-5663

HS Anlagentechnik

W www.hsanlagentechnik.com

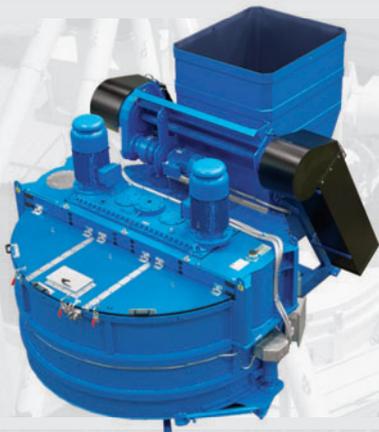
E info@hsanlagentechnik.com

T NL +31 45 5671190 | D +49 2735 781160



Marktführer im Bereich
der Mischtechnologie.
Schnell, gleichmäßig, zuverlässig.
Weltweite Referenzen.

THE MIXING SOLUTION



MP
Planetenmischer mit bis zu
4 m³ Festbetonausstoß



MAO
Doppelwellenmischer
mit bis zu 9 m³
Festbetonausstoß



MAO C
Doppelwellen-Durchlaufmischer
von 80 bis 500 m³/Stunde



Große Auswahl
an Zubehör

3. Variation in der Bauteilfügung

Die Maschinenteknologie erlaubt die Herstellung der Bauteilkanten innerhalb des Endlosfertigungsprozesses. Diese können entsprechend der Anforderungen modifiziert werden. Die Fertigung kann um robotische Komponenten ergänzt werden und so zu einer neuen Komplexität in der Fertigungstechnologie führen. Durch intelligente Konstruktionsprinzipien und Fügetechniken, die zwar modular, aber nicht als monotone Repetition ablesbar sind, kann hochwertige Architektur generiert werden.

4. Varianz in der Gestaltung

Durch die Applikation neuer digitaler Planungsmethoden und die Etablierung eines Entwurfsprozesses auf Basis eines digitalen Datenmodells ändert sich der Entwurfsprozess. Die Möglichkeiten der Aspekte 1.- 3. (Materialtechnologie, Detaillierung, Herstellung) müssen bereits im Entwurf Berücksichtigung finden. Es ist als Chance zu begreifen, schon zu Beginn des Entwurfes parametrisch-assoziative Anforderungen zu definieren, welche in einem iterativen Prozess angepasst und lückenlos zur Produktion geführt werden können. Entwurf, Detaillierung und Herstellung müssen neu und zusammenhängend gedacht werden. Gestaltungsmöglichkeit bietet beispielsweise die projektspezifische Entwicklung der Ober-

flächenbeschaffenheit. Durch das Einlegen von automatisiert gefertigten Strukturmatrizen ergibt sich Gestaltungsvielfalt und auch die digitale Steuerung der Farbigkeit führt zu einer gestalterischen Varianz.

Ein weiterer Aspekt der Forschungsleistung ist der Beitrag für den Bereich Ressourceneffizientes Bauen. Durch die Hybridbeton-Bauweise kann im Vergleich zu traditionellen Betonbauweisen eine signifikante Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks - bezogen auf den gesamten Lebenszyklus - erreicht werden.

Einen wesentlichen Faktor in der Bilanzierung von Betonbauweisen bildet die Herstellung der Ausgangsstoffe:

1. Der Zementanteil des Schaumbetonkerns ist im Vergleich zu klassischen Betonbauteilen deutlich reduziert.
2. Durch die Materialinnovation verbessert sich der U-Wert in dem Maße, dass deutlich schlankere Konstruktionen realisiert werden können.

Zum einen ermöglicht die mobile Produktionseinheit eine Produktion vor Ort unter Verwendung von 90 % lokalen Ressourcen und optimierter Logistik bei weltweit gleichbleibender Qualität. Zum anderen wird durch die automatisierte Produktionstechnik und den hohen Vorfertigungsgrad ein geringerer Ressourceneinsatz forciert.

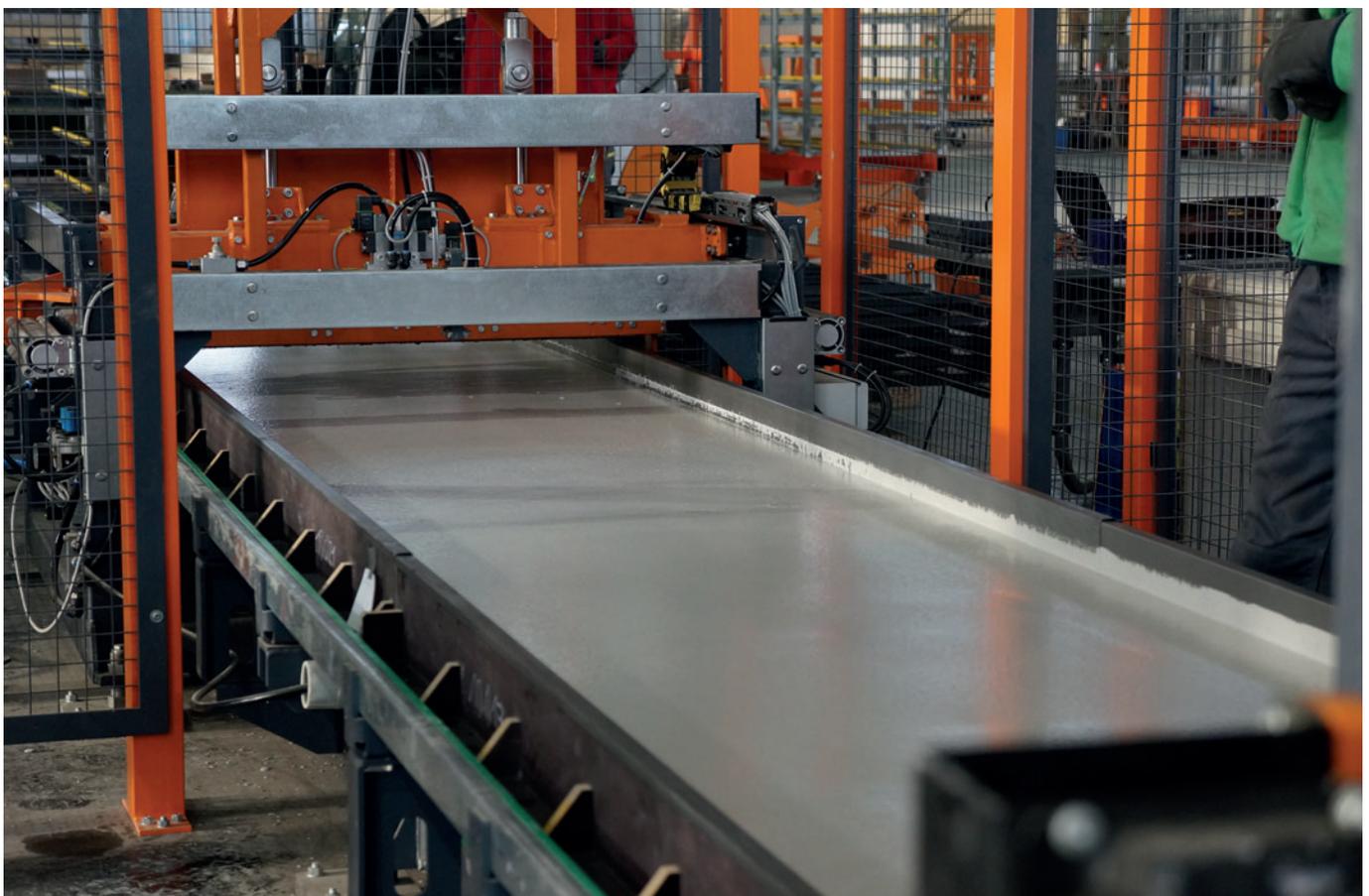


Abb. 16: Automatisierte Maschinenteknologie - © Gtecz Engineering GmbH



AUTOMACAD

Innovative Lösungen für
Vorreiber und Vordenker



Abb. 17: Materialtechnologie Monomaterial -
© Gtecz Engineering GmbH

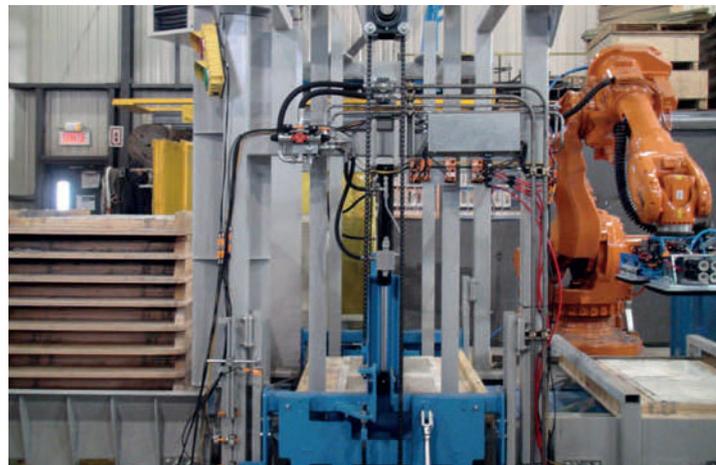
Ein wesentlicher Vorteil liegt in der gleichzeitigen Übernahme verschiedener grundlegender Funktionen wie Trageigenschaften und Dämmfunktion in einem Monomaterial. So grenzt sich die Hybridbetonbauweise durch die Vermeidung von Stoffverbunden von traditionellen, additiven Bauweisen in einem mehrschaligen System ab und erreicht damit außerdem eine verbesserte Rezyklierbarkeit. Die oberflächenfertige UHPC-Deckschicht erfordert keine weiteren Gewerke (wie z. B. Stuckateurarbeiten). Durch die wasserfeste Oberfläche mit hoher Lebensdauer werden Wartungsarbeiten reduziert. Der verringerte Personaleinsatz wirkt sich positiv auf den nachhaltigen Einsatz der Ressource Mensch aus und kann so den aktuellen Fachkräfteengpässen im Bauhandwerk entgegenwirken.

Ergebnisbetrachtung und Potentiale

Der hohe Druck auf den Bausektor mit Blick auf den technologischen Wandel und die steigende Umweltrelevanz fordern dringend Anpassungen der traditionellen Denkweisen und klassischen Bauabläufe. Vor diesem Hintergrund leisten neue Material- und Konzeptentwicklungen wie die vorliegende Forschungsleistung in allen Bereichen des Bauwesens einen wesentlichen Beitrag.

Die Hybridbeton-Technologie mit Aerogel-Schaumbetonkern (Aeroleichtbeton) ordnet sich aufgrund ihrer Materialeigenschaften zwischen den auf dem Markt existierenden großformatigen Porenbeton-Elementen und dem Infraleichtbeton ein. Die Forschungsleistung bestätigt die Marktberechtigung auf ‚Materialebene‘, da die Hybridbeton-Bauweise mit beiden Materialien zwar in bestimmten Parametern vergleichbar ist, sich jedoch in der Gesamtheit positiv davon abgrenzt. In Fakten bedeutet dies, dass der Aeroleichtbeton im Vergleich zum Porenbeton ähnliche Lambda-Werte bei besserer Rohdichte und damit eine höhere Festigkeit aufweist. Im Vergleich zum Infraleichtbeton hat Aeroleichtbeton deutlich bessere Lambda-Werte bei ähnlicher Festigkeit.

KOSTEN SENKEN UND PRODUKTIVITÄT STEIGERN DURCH AUTOMATISIERUNG



IHRE WETCAST-EXPERTEN <<<<

Zu einer wirklichen Produktinnovation wird die Aerogel-Technologie jedoch erst durch die Verknüpfung von Materialentwicklung, automatisierter Fertigung und der Einbindung des digitalen Gestaltens.

Der Aeroleichtbeton überzeugt darüber hinaus durch den etablierten automatisierten Fertigungsprozess einer hochwertigen Materialentwicklung. Der lineare Endlos-Fertigungsprozess bietet das Potential, durch robotische Komponenten erweitert zu werden. So können z.B. automatisiert Mischmodule zugeschaltet werden oder additive Elemente z.B. zur Füge-technik während des Produktionsprozesses eingelegt werden. Durch die Entwicklung von speziellen Aeroleichtbeton Mischeinheiten könnte diese Technologie sogar in bestehende Fertigteilewerke implementiert werden.

Einen weiteren Vorteil bietet die Tatsache, dass es sich um eine standardisierte einschalige Sichtbetonbauweise handelt. Dies ermöglicht ein hohes Maß an Vorfertigung und zugleich eine projektspezifische Gestaltungsvielfalt durch die Schnittstelle zu digitalen Planungswerkzeugen und der automatisierten Produktion innerhalb nur eines Prozesses. Eine Anpassungsplanung kann somit automatisiert umgesetzt werden.

In Anbetracht der hohen Nachfrage im Bereich mehrgeschossiger Wohnungsbau konnte eine geeignete Gebäudetypologie für eine Betontafelbauweise auf Basis eines Schottenbaus entwickelt werden. Die Definition unterschiedlicher Nutzungsmöglichkeiten fokussiert sich für diese Anwendung aktuell auf den Bereich des studentischen Wohnens. Die moderne Wohnparzelle als kleinste Einheit innerhalb eines größeren Gefüges kann als realisierter Prototyp einen wertvollen Beitrag für die laufende und sich in Zukunft verschärfende Diskussion knappen Wohnraums leisten. Die Parzelle ist hier Projektionsfläche für die spezifische Nutzung als Studentenwohnheim. Das Modul ist zusammenschaltbar zu größeren Wohneinheiten und ermöglicht so die Etablierung eines heterogenen Wohnungsmixes. ■

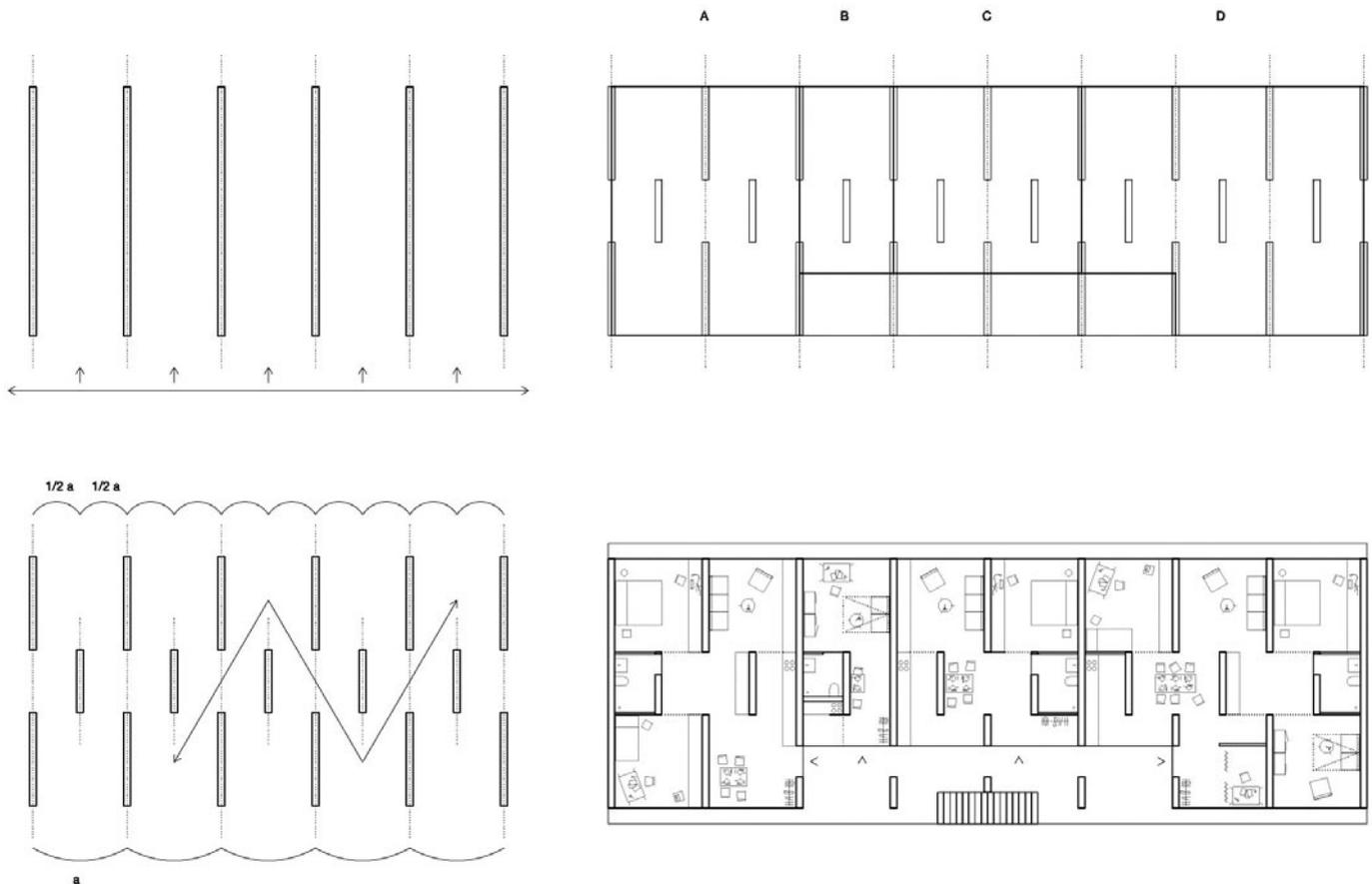


Abb. 18: Typologie Schottenbauweise - © TU Dortmund - Juniorprofessur REB