

Daniel Schmeer, Benjamin Schönemann
Olga Arkhipkina, Walter Haase, Harald Garrecht
Oliver Sawodny, Werner Sobek

Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton

F 3194

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0499-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Institut für Systemdynamik
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. Oliver Sawodny
Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht



Vorhabenbezeichnung:	Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradier-tem Beton
Zuwendungsempfänger:	Universität Stuttgart Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren Pfaffenwaldring 7 + 14 70569 Stuttgart Institut für Systemdynamik Waldburgstraße 17 + 19 70569 Stuttgart Institut für Werkstoffe im Bauwesen Pfaffenwaldring 4 70569 Stuttgart
Förderkennzeichen:	SWD-10.08.18.7-16.48
Förderstelle:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Projektsumme:	432.757,96 €
Fördermittelanteil:	278.412,92 €
Projektleitung:	Dr.-Ing. Walter Haase
Mitarbeiter:	Daniel Schmeer (ILEK), Benjamin Schönemann (ISYS), Olga Arkhipkina (IWB), Dennis Dobschanski (ILEK), Oliver Gericke (ILEK), Marzena Husser (ILEK), Sabrina Jilka (ILEK), Julian Pfänder (IWB), Francesco Ranaudo (ILEK), Marc Hymans (ILEK)
Studentische Mitarbeiter:	Ismael Delorenzo (ILEK), Alexander Dreher (ILEK), Maximilian Borbe (ILEK), Carl Niklas Haufe (ILEK)
Projektlaufzeit:	01.11.2016 – 30.11.2018 kostenneutral verlängert bis 28.02.2019
Berichtszeitraum:	01.11.2016 – 28.02.2019

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei der Autorenschaft mit der Reihenfolge: Daniel Schmeer, Benjamin Schönemann, Olga Arkhipkina, Walter Haase, Harald Garrecht, Oliver Sawodny und Werner Sobek

Dieser Forschungsbericht umfasst 130 Seiten.
Stuttgart, 25.03.2019

Dr.-Ing. Walter Haase



Danksagung

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert (Förderkennzeichen: SWD-10.08.18.7-13.48). Die Autoren bedanken sich für die gewährte Förderung und die überaus kompetente Begleitung des Projekts bei:

Dr.-Ing. Michael Brüggemann
Fraunhofer IRB

Unser weiterer Dank gilt den Mitgliedern der Arbeitsgruppe und den Industriepartnern, die das Projekt durch ihre großzügige Unterstützung ermöglicht haben:

Burkhard Schuller
Burkhard Schuller Baustoffservice GmbH

Dipl.-Phys. Georg Gertner
Cabot GmbH

Dr.-Ing. Ulrich Lotz & Dipl.-Ing. Steffen Patzschke
Fachverband Beton- und Fertigteilwerke Baden-Württemberg e. V.

Dr.-Ing. Jennifer Scheydt & Dipl.-Ing. Hilbert Atze
HeidelbergCement AG

Dipl.-Ing. (FH) Albrecht Richter
Liapor GmbH & Co. KG

Dr.-Ing. Olaf Leitzbach
MEVA Schalungs-Systeme GmbH

Dipl.-Ing. (FH) Jan Chrzanowski
Pekko Deutschland GmbH

Dr.-Ing. Thomas Müller
Sika Deutschland GmbH

Dr.-Ing. Ali Shams
Solidian GmbH

Dr.-Ing. Wolfgang Sundermann
Werner Sobek Stuttgart AG

**INHALTSVERZEICHNIS**

DANKSAGUNG	4
1 ZUSAMMENFASSUNG	8
2 EINLEITUNG (ILEK)	8
2.1 Inhalt	8
2.2 Projektziel	9
2.3 Sitzungen der Arbeitsgruppe	9
2.4 Arbeitsplan	9
3 STAND DER TECHNIK (ILEK)	10
3.1 Wärmedämmende Wandsysteme aus Beton	10
3.2 Gradientenbeton	13
3.2.1 Konzept und Anwendungsgebiete	13
3.2.2 Betontechnologie	13
3.2.3 Herstellungstechnologie	15
3.2.4 Entwurf funktional gradierter Betonbauteile	17
4 UNTERSUCHUNGSRAHMEN UND ZUSAMMENSTELLUNG NORMATIVER REGELUNGEN FÜR DIE AUSLEGUNG VON WANDBAUTEILEN (ILEK)	18
4.1 Untersuchungsrahmen	18
4.1.1 Festlegung der multifunktionalen Anforderungen	18
4.1.2 Festlegung von Anwendungsfall und Bauteilgeometrie	19
4.1 Statische Bemessung und Konstruktion von Betonbauteilen	20
4.1.1 Lastabhängiges Verhalten	20
4.1.2 Lastunabhängiges Verhalten	22
4.2 Bauphysikalische Bemessung von Wandbauteilen	26
4.2.1 Wärmeschutz	26
4.2.2 Feuchteschutz	26
4.2.3 Schallschutz	27
4.2.4 Brandschutz	28
5 WEITERENTWICKLUNG DER BETON- UND BEWEHRUNGSTECHNOLOGIE (AP1)	29
5.1 Entwicklungsstand der Betontechnologie zu Projektbeginn (ILEK)	29
5.2 Ziele und Anforderungen an die weiterzuentwickelnde Betontechnologie (ILEK)	30
5.3 Weiterentwicklung der Betonmischungen im Labor	32
5.3.1 Auswahl an Leichtzuschlägen (ILEK/IWB)	32
5.3.2 Bereitstellung von Betonen zum Nassspritzen durch die Firma HeidelbergCement (ILEK) ..	33
5.3.3 Entwicklung wärmedämmender Leichtbetone (IWB)	33



5.4	Bewehrungstechnologie (ILEK)	38
5.4.1	Auswahl der Bewehrung	38
5.4.2	Bewehrungssysteme	39
6	WEITERENTWICKLUNG DES AUTOMATISIERTEN HERSTELLUNGSVERFAHRENS (AP 2)	40
6.1	Analyse bestehender Herstellungstechnologien und Auswahl geeigneter Verfahren (ISYS/ILEK)	40
6.2	Weiterentwicklung des Nassspritzverfahrens (ISYS/IWB)	42
6.2.1	Anpassung der Betonmischungen	42
6.2.2	Anpassung der Betonverfahrenstechnik	44
6.2.3	Untersuchung von umweltbedingten Einflussfaktoren	47
6.3	Prozessparameteranalyse für das Nassspritzverfahren (ISYS)	48
6.3.1	Einflussfaktoren für das Nassspritzverfahren	48
6.3.2	Versuchsablauf zur Analyse der Einflussfaktoren	49
6.3.3	Prozessparameteranalyse für Betonmischung MI _{NS} (IWB)-V3.1	52
6.4	Schalungstechnologie (ISYS/ILEK)	59
6.5	Bewehrungstechnologie (ISYS/ILEK)	59
7	ENTWURF MULTIFUNKTIONAL GRADIERTER WANDBAUTEILE (AP 3, ILEK)	63
7.1	Entwurfsansatz	63
7.2	Numerische Berechnungsmethoden für die Nachweisführung	64
7.2.1	Tragfähigkeit	64
7.2.2	Wärmefluss	66
7.3	Mikrogradierte Sandwichwand	66
7.3.1	Allgemeine Lösung der Optimierungsaufgabe	66
7.3.2	Materialverteilung	69
7.3.3	Querschnittsoptimierung zur Gewichtsreduktion	72
7.3.4	Kompensation von Schwind- und Temperaturdehnungen	75
7.3.5	Nachweis zum Schall-, Feuchte- und Brandschutz	77
7.4	Mesogradierte Betonwand	78
7.4.1	Allgemeine Lösung der Optimierungsaufgabe	78
7.4.2	Hohlkugelverteilung	81
7.4.3	Nachweis zum Schall-, Feuchte- und Brandschutz	84
8	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN GRADIERTEN WANDBAUTEILEN (AP 4)	85
8.1	Untersuchungen zur Tragfähigkeit (ILEK)	85
8.1.1	Skalierung und Probekörpergeometrie	85
8.1.2	Probekörperherstellung des mikrogradierten Sandwichaufbaus	86
8.1.3	Bauteilprüfung	86
8.1.4	Versuchsergebnisse und Validierung der Berechnungsansätze	87
8.2	Untersuchungen der Eigenschaften von Betonmischungen und geschichteten Wandbauteilen (IWB)	90



8.2.1 Untersuchung des Trocknungsverhaltens 90

8.2.2 Untersuchung des Wasseraufnahmeverhaltens 91

8.2.3 Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit..... 92

8.2.4 Untersuchung des Schwindverhaltens 95

8.2.5 Bewertung der Untersuchungen 95

9 KONSTRUKTIVE DETAILAUSBILDUNG (AP 5, ILEK)..... 96

9.1 Grundlagen 96

9.2 Konzeptionelle Ausarbeitung von Anschlussdetails..... 97

9.2.1 Horizontaler Decken-Wand-Anschluss 97

9.2.2 Horizontaler Wand-Wand-/Wand-Fundament-Anschluss 99

9.2.3 Vertikaler Wand-Wand-Anschluss..... 100

9.2.4 Transportanker 102

10 PREISKALKULATION UND MARKTANALYSE FÜR DIE GRADIENTENWAND (AP 6, ILEK)103

10.1 Grundlagen und Eingrenzung der Preiskalkulation..... 103

10.2 Einzelkosten der Gradientenwand in der Herstellungsphase 105

10.2.1 Baustoffkosten 105

10.2.2 Kosten der Rüst- und Schalstoffe 108

10.2.3 Gerätekosten 108

10.2.4 Lohnkosten 109

10.2.5 Einzelkosten der Entwurfsvarianten in der Herstellung 110

10.3 Einzelkosten der Gradientenwand in der Errichtungsphase..... 114

10.3.1 Fertigteilkosten..... 114

10.3.2 Transport- und Montagekosten 114

10.3.3 Einzelkosten der Entwurfsvarianten im fertigen Gebäude 115

10.4 Marktanalyse 116

11 DEMONSTRATOR (AP 6, ILEK/ISYS) 117

12 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK (ILEK) 120

13 VERZEICHNISSE 122

13.1 Abbildungsverzeichnis 122

13.2 Tabellenverzeichnis 126

13.3 Literaturverzeichnis 127



1 Zusammenfassung

Die Baubranche ist konfrontiert mit einer immensen zu bewältigenden Bautätigkeit infolge einer steigenden Weltbevölkerung und zunehmenden Migrationsbewegungen bei gleichzeitiger Verknappung der weltweiten Ressourcen. Die Forderung nach Leichtbau im Bauwesen ist daher aktueller denn je. Ziel muss es sein, Bauteile möglichst leicht sowie recyclinggerecht zu konstruieren und daneben auch die für die Bauteilfertigung aufzuwendende fossil erzeugte, graue Energie zu minimieren [1].

Aus diesem Grund soll dieses Projekt der Entwurf und die Herstellung einer sortenreinen und gewichts-minimalen Bauweise für tragende und dämmende Außenwände aus gradiertem Beton erforschen. Gradierte Betonbauteile sind charakterisiert durch eine kontinuierliche Änderung der Porosität der Betonmatrix innerhalb des Bauteils. Mit diesem Ansatz kann beispielsweise das Gewicht der tragenden Konstruktion durch das gezielte Platzieren von Kavitäten in den niedrig beanspruchten Bereichen des Bauteils deutlich reduziert werden. Eine Erhöhung der Betonporosität hat zudem den Vorteil, dass die wärmedämmenden Eigenschaften verbessert werden. Ersterer Ansatz konnte bereits in vorherigen Forschungsarbeiten nachgewiesen werden, weshalb der Schwerpunkt der Untersuchungen in diesem Projekt auf der Entwicklung eines multifunktionalen und sortenreinen Außenwandbauteils liegt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten die gesetzten Ziele in allen Arbeitspaketen erreicht werden. Es wurden sowohl die Beton- als auch die Bewehrungstechnologie für gradierte Betonbauteile weiterentwickelt. Geeignete Herstellungsverfahren für multifunktional gradierte Außenwände konnten identifiziert werden und die automatisierten Fertigungstechniken wurden anwendungsspezifisch optimiert. Erstmals wurden innerhalb des Projekts die Anforderungen an die Bauteilauslegung definiert sowie Entwurfs- und Berechnungsansätze für multifunktional gradierte Wandbauteile aufgestellt. Mit den durchgeführten experimentellen Untersuchungen an skalierten Wandbauteilen konnten die aufgestellten Berechnungsansätze validiert und bestätigt werden. Erste Ansätze bei der konstruktiven Detailausbildung der Wandbauteile wurden aufgezeigt, die für die Montage als Fertigteil erforderlich sind. Auf Grundlage einer durchgeführten Wirtschaftlichkeitsanalyse konnte eine erste Abschätzung für einen möglichen Marktpreis der Wand erfolgen. Letztlich konnte das Potential der Technologie durch die Herstellung einer Demonstratorwand im Realmaßstab nochmals verdeutlicht werden.

Diese erzielten Ergebnisse im Bereich der Bauteilgradierung für den Anwendungsbereich der tragenden und dämmenden Außenwand werden im folgenden Abschlussbericht ausführlich erläutert.

2 Einleitung (ILEK)

2.1 Inhalt

Die Arbeiten und die erreichten Ziele des Forschungsprojekts „Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton“ werden nachfolgend dargestellt. Nach einem einführenden Kapitel über das Projekt werden aus dem derzeitigen Stand der Technik das Potential der Technologie und die notwendigen Arbeitspakete abgeleitet. Die weiteren Kapitel richten sich nach den Arbeitspaketen der Beantragung, beginnend mit der Weiterentwicklung der Betontechnologie und der Herstellungsverfahren, gefolgt vom Bauteilentwurf und der experimentellen Untersuchung gradierter Wandbauteile über die konstruktive Detailausbildung und die Marktanalyse für die entwickelte Technologie bis hin zu den Arbeiten für die Erstellung eines Demonstrators sowie der abschließenden Zusammenfassung mit den weiterführenden Arbeiten.

Für den Inhalt sind jeweils die bearbeitenden Institute für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) sowie Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart eigenverantwortlich zuständig.



2.2 Projektziel

Das Projektziel lautet gemäß der Beantragung: „Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung rein mineralischer funktional gradierter Wandbauteile, welche in der Lage sind, die Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Dauerhaftigkeit, das architektonische Erscheinungsbild und den Wärmeschutz gleichzeitig zu erfüllen. Dichte und hochfeste Bereiche werden innerhalb des Bauteilquerschnitts mit hochporösen niedrigfesten Zonen durch fließende Porositätsverläufe (Gradierungen) homogen und dauerhaft verbunden. Die Vorteile der angestrebten Lösung liegen in der sehr guten Rezyklierbarkeit (es handelt sich um ein rein mineralisches Bauteil), einer Massenersparnis von über 60 % und einer CO₂-Reduktion von über 35 % im Vergleich zu herkömmlichen Massivbauteilen sowie in dem Gewinn an Nutzfläche und der Energieeinsparung in allen Phasen des Produkt-Lebenszyklus.“

2.3 Sitzungen der Arbeitsgruppe

Während der Projektlaufzeit fanden folgende Arbeitsgruppentreffen am ILEK statt:

- 04.05.2017: KICK-OFF Meeting
- 05.09.2017: 1. Arbeitsgruppentreffen: Betontechnologie
- 08.10.2018: 2. Arbeitsgruppentreffen: Herstellungstechnologie

2.4 Arbeitsplan

Im Folgenden werden die Arbeitspakete gemäß Antrag aufgelistet, deren Bearbeitung vollständig abgeschlossen wurde. Die in den Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse werden in den weiteren Kapiteln detailliert beschrieben.

1. AP: Weiterentwicklung der Betonmischungen (Bearbeitungsstand: **abgeschlossen**)

Entwicklung und Auswahl geeigneter Leichtzuschläge mit geringer Dichte und hoher Tragfähigkeit; Abstimmung der Gradientenbetonmischungen auf die neuen Leichtzuschläge; Optimierung der Ökologie und der Ökonomie der Mischungen; Durchführung von Frischbeton- und Festbetonprüfungen; Untersuchungen zum autogenen Schwinden; Auswahl geeigneter Bewehrung.

2. AP: Weiterentwicklung des automatisierten Herstellungsverfahrens (Bearbeitungsstand: **abgeschlossen**)

Adaption der entwickelten Verfahren zur Herstellung funktional gradierter Wandbauteile (Trocken-, Nassspritzen, Schichtweises Gießen); Analyse der Herstellungsrestriktionen hinsichtlich der Genauigkeit des einstellbaren Gradienten; Auswahl geeigneter Verfahren; Kombination ausgewählter Mischungen, um gewünschte Eigenschaftsänderungen (Gradienten) zu erzielen; Abstimmung der entwickelten Mischungen auf das gewählte Herstellungsverfahren; Identifikation und Analyse der Prozessparameter; Anpassung der Prozesssteuerung und -regelung; Festigkeitsprüfungen an gradierten Probekörpern; Untersuchungen zur Einbringung der Bewehrung in das Bauteil im Herstellungsprozess.

3. AP: Auslegung und Skalierung der Wandbauteile (Bearbeitungsstand: **abgeschlossen**)

Zusammenstellung der nationalen und europäischen Regelungen und Anforderungen in statischer und bauphysikalischer Hinsicht für einschalige tragende und dämmende Wandbauteile; Dimensionierung verschiedener Wandaufbauten im Maßstab 1:1 nach statischen und bauphysikalischen Gesichtspunkten; Auslegung der Bewehrung; Untersuchung der Wandaufbauten mit numerischen Simulationen hinsichtlich Tragfähigkeit und Bauphysik (z.B. Abaqus und WuFi); Skalierung der Wandaufbauten auf den Labormaßstab.



4. AP: *Herstellung und Durchführung von Versuchen an skalierten Wandbauteilen* (Bearbeitungsstand: **abgeschlossen**)

Herstellung der skalierten Bauteile; visuelle und messtechnische Untersuchung der Qualität des hergestellten Gradienten anhand von Schliffbildern und Ultraschall-Untersuchungen; Untersuchung der axialen Tragfähigkeit und der Biegetragfähigkeit anhand von Bauteilversuchen; Ermittlung der relevanten bauphysikalischen Größen im Bauteilversuch; Auswertung der Versuche und Validierung der Annahmen.

5. AP: *Konstruktive Detailausbildung der Wandbauteile im Anschlussbereich* (Bearbeitungsstand: **abgeschlossen**)

Aufzeigen möglicher Detailausbildungen zur Krafteinleitung der Deckenlasten; Untersuchungen des Deckenanschlusses an die Gradientenwand; Analyse der Kopplung und Dichtung der Fertigteile in den Fugen; Einbinden von Öffnungen.

6. AP: *Demonstrator und Marktanalyse* (Bearbeitungsstand: **abgeschlossen**)

Zusammenführung der Arbeitspakete; Umsetzung der Forschungsergebnisse in Form einer Demonstratorwand im Maßstab 1:1; Analyse des Marktpreises vergleichbarer Wandsysteme; Schätzung eines möglichen Markteinführungspreises für die Gradientenwand.

7. AP: *Organisation, Dokumentation und Veröffentlichung* (Bearbeitungsstand: **abgeschlossen**)

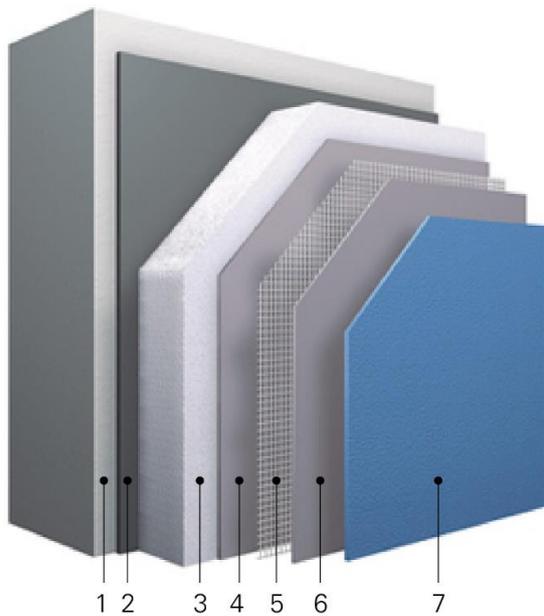
Durchführung von Projekttreffen; Verfassen eines Zwischen- und Abschlussberichts; Präsentation der Technologie.

3 Stand der Technik (ILEK)

3.1 Wärmedämmende Wandsysteme aus Beton

Seit der Einführung der Energieeinsparverordnung im Jahr 1977 steigen die Anforderungen an den Wärmeschutz von Bauteilen stetig. In erster Linie soll hierdurch der Energieverbrauch (vor allem fossilbasierter Energie) von Gebäuden reduziert und die Behaglichkeit in Wohn- und Arbeitsräumen gesteigert werden. Zu diesem Zweck muss ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der Bauteile erreicht werden, welcher mit unterschiedlichsten Bauweisen sichergestellt werden kann.

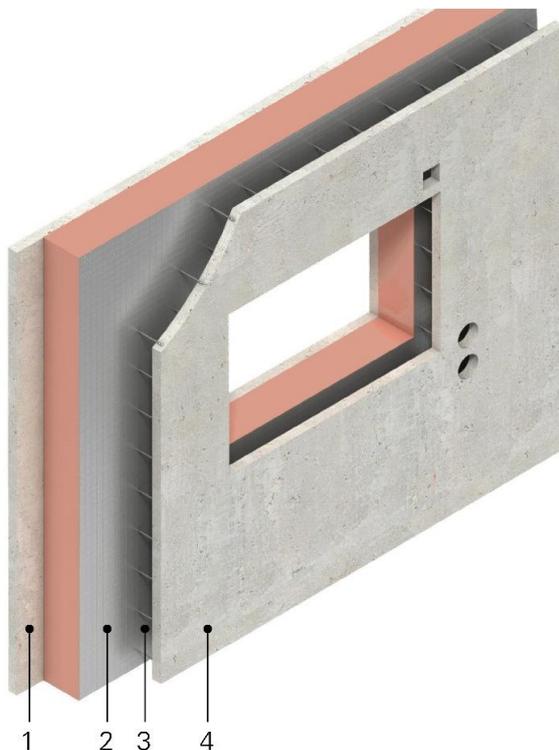
Meistverbreitet sind die Wärmedämmverbundsysteme bestehend aus einem Verbund zwischen tragendem Bauteil zur Standsicherheit (bspw. Mauerwerk oder Stahlbeton) und einer zumeist an der Wandaußenseite angebrachten Dämmung zur Isolierung (Abbildung 1) [1]–[3]. Der Verbund wird in der Regel aus einer geklebten Verbindung mit oder ohne Dübel realisiert. Durch einen zusätzlich auf die Dämmung aufgetragenen Unter- und Oberputz erfolgt der Witterungsschutz. Das Aussehen lässt sich durch den Putz individuell gestalten.



- 1 tragende Wand
- 2 Klebeschicht
- 3 Dämmstoff
- 4 Unterputzschicht
- 5 Gewebe
- 6 Oberputzschicht
- 7 Deckschicht

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Wärmedämmverbundsystems [4]

Unter der Sandwichbauweise wird eine mindestens dreilagige Konstruktion verstanden, die aus einer oberen und einer unteren Deckschicht sowie einem dazwischenliegenden Kern besteht (Abbildung 2). In der Baupraxis wird eine der Deckschichten als Tragschale und die andere als Vorsatzschale ausgebildet. Als Dämmmaterial für den dazwischenliegenden Kern wird zumeist ein Hartschaum verwendet. Deckschicht und Kern werden bei Sandwichwänden nicht miteinander verklebt. Der Verbund wird durch die punktuelle Verbindung der beiden Schalenaußenseiten mittels Tragankern und Halteankern sichergestellt [5]–[8].



- 1 äußere Deckschicht
- 2 Wärmedämmschicht
- 3 Verankerung
- 4 innere Deckschicht

Abbildung 2: Sandwichwand im Betonbau [9]

Aus der Forderung nach sortenreinen Bauweisen entwickelten sich in den letzten Jahren unterschiedlichste Wärmedämmbetone, die bei entsprechenden Wandstärken von 50 – 80 cm die Anforderungen der Tragfähigkeit und der Wärmedämmung in einem monolithischen Bauteil erfüllen (Abbildung 3) [10]–[12]. Mit der Verwendung von porösen Leichtzuschlägen wie Blähton, Blähglas, Bims oder Perlit und der Zugabe von Luftporenbildner kann die Rohdichte unter die von Leichtbeton (800 kg/m^3) gesenkt werden, weshalb man diese Betone auch als Infraleichtbeton bezeichnet [10].



Abbildung 3: Einfamilienhaus aus Infraleichtbeton [10]

Alle vorgestellten Wandsysteme erfüllen die Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Wärmedämmung, weisen jedoch hinsichtlich des Materialeinsatzes und der Rezyklierbarkeit erhebliche Unterschiede auf. So sind mit den Wärmedämmverbundsystemen und den Sandwichbauteilen geringe Wandstärken erzielbar. Diese können aber aufgrund der unterschiedlichen Werkstoffe nur aufwendig und nicht sortenrein recycelt werden. Im Fall der Wärmedämmverbundsysteme sind diese Bauteile je nach verwendeter Dämmung am Lebensende als Sondermüll zu entsorgen [13]. Die Rezyklierbarkeit ist bei der monolithischen Bauweise mit Wärmedämmbeton problemlos möglich und die verwendeten Materialien können in Form eines Up- oder Downcycling wiederverwendet werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Betonfestigkeit mit sinkender Rohdichte exponentiell abnimmt, sind bei der Verwendung von Infraleichtbeton sehr massive Wandstärken von bis zu 80 cm durchaus üblich. Hierdurch werden der Materialeinsatz und folglich der Ressourcenverbrauch deutlich erhöht. Zudem geht damit bei begrenzten Grundrissmaßen des Gebäudes ein Verlust von Nutzraum einher.

Die Gradientenbetontechnologie verspricht rein mineralische Außenwandbauteile zu realisieren, die alle Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Wärmeschutz erfüllen und dies mit geringeren Wandstärken als bei vergleichbaren leistungsfähigen wärmedämmenden Wandsystemen aus Beton. Die Vorteile liegen in der guten Rezyklierbarkeit, der Massen- und CO₂-Reduktion, dem Gewinn an Nutzfläche und in der Energieeinsparung in allen Phasen des Produktlebenszyklus.

3.2 Gradientenbeton

3.2.1 Konzept und Anwendungsgebiete

Das Konzept der funktionalen Gradierung von Bauteilen stammt aus den Materialwissenschaften [14]–[17] und wurde erstmals von Werner Sobek auf den Werkstoff Beton übertragen. Unter dem sog. Gradientenbeton versteht man nicht eine neue Art von Beton, gemeint ist vielmehr eine Werkstofftechnologie, bei der gezielt Kavitäten im Inneren der Betonbauteile platziert werden. Bei dieser Ein-Material-Technologie werden die Betoneigenschaften entlang mindestens einer Raumrichtung durch poren- bzw. schaubildende Technologien im Mikro-Maßstabsbereich (1 – 10 mm) oder durch den Einsatz mineralischer Hohlkugeln im Meso-Maßstabsbereich (10 – 250 mm) kontinuierlich geändert und somit an den vorhandenen inneren Beanspruchungszustand angepasst (Abbildung 4). Mit diesem Ansatz der Gradierung nur eines Werkstoffs in variierender Zusammensetzung wird neben der Gewichtsreduktion der Bauteile auch die jederzeitige Rezyklierbarkeit sichergestellt.

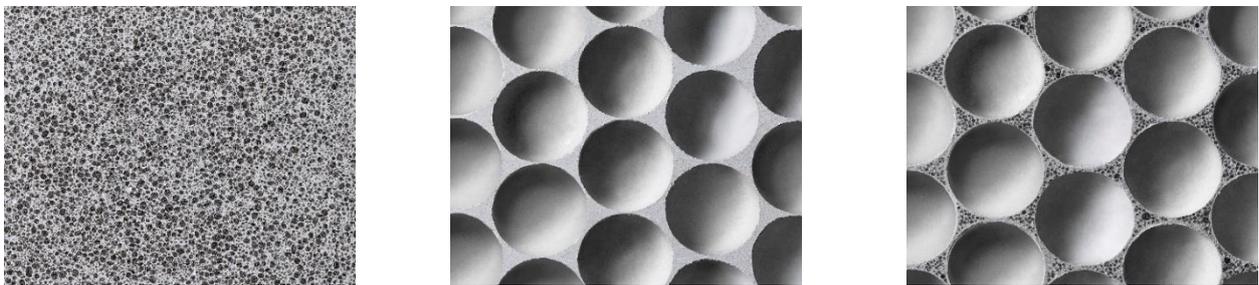


Abbildung 4: Gradierungsmaßstab: Mikrogradierung (links), Mesogradierung (mittig) und Kombination von Mikro- und Mesogradierung (rechts)

Betrachtet man die im Bauwesen eingesetzten Bauteile innerhalb der Tragkonstruktion, so sind die im Bauteilinneren vorherrschenden Spannungsfelder zumeist nicht homogen. Durch die Manipulation der Steifigkeit innerhalb des Bauteils mittels der funktionalen Gradierung können die Spannungsfelder im Sinne eines fully-stressed design homogenisiert werden [18]. Der Einsatz der Technologie in den biegebeanspruchten Bauteilen wie Decken und Balken konnte mit Masseneinsparungen von über 50 % bereits als zielführend bestätigt werden [19]–[21]. Mit der Platzierung von Poren innerhalb des Bauteils kann auch die Wärmeleitfähigkeit des Gesamtbauteils manipuliert werden. Somit lassen sich sortenreine und multifunktionale Bauteile realisieren, die gleichzeitig die Anforderungen der Tragfähigkeit und der Wärmedämmung mit einem Minimum an eingesetztem Material erfüllen.

3.2.2 Betontechnologie

Das Fünf-Stoff-System Beton bietet die Möglichkeit der Rezepturanpassung an eine Vielzahl von Anforderungsprofilen [9]. Die Mischungsentwicklung zielt primär darauf ab, Betone mit unterschiedlicher Festigkeit zu realisieren, deren Druckfestigkeit bei rund 20 N/mm² für Normalbeton beginnt und bei ultrahochfestem Beton auf über 150 N/mm² gesteigert werden kann [22]. Die Zugabe von Leichtzuschlägen zur Porenbildung (Korn-, Matrix- und Haufwerksporen) bewirkt eine deutliche Reduktion des Eigengewichts sowie der Druckfestigkeit von Beton und senkt durch die Maßnahme auch die Wärmeleitfähigkeit [12]. Diese Anpassungsfähigkeit macht sich die Mikrogradierung zunutze. Eine hochfeste Betonmischung (MI), bestehend aus Zuschlag, Zement, Wasser, Zusatzstoffen und –mitteln, sie wird an den höchstbelasteten Stellen im Bauteil eingesetzt. In Abhängigkeit des verwendeten Herstellungsverfahrens werden schrittweise oder kontinuierlich die schweren Bestandteile durch Leichtzuschläge bis hin zur Basismischung (MII) substituiert (Abbildung 5). Die Mischung MII ist aufgrund ihrer minimierten Dichte geeignet für den Einsatz in geringbelasteten Bauteilregionen und führt zu deutlichen Masseneinsparungen sowie zu einer deutlichen Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften [21].

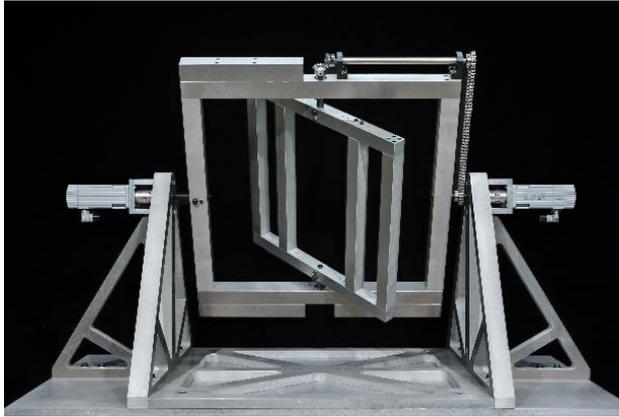


Abbildung 6: Zentrifuge (links) zur Herstellung von Betonhohlkugeln (rechts) [23]

3.2.3 Herstellungstechnologie

In den beiden von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten Projekten zum Gradientenbeton („Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen“ und „Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierte Elementdecken“) konnten die Grundlagen zur Herstellung funktional gradierten Betonbauteile erforscht werden. Im Rahmen der Untersuchungen stellten sich insbesondere das schichtweise Gießen sowie das Sprühverfahren als geeignete Fertigungsverfahren heraus. Bei Erstgenanntem werden Betone mit unterschiedlichen Mischungszusammensetzungen und Eigenschaften horizontal und vertikal im Bauteil geschichtet. Durch den Nass-in-Nass-Einbau wird der Verbund zwischen den Schichten sichergestellt. Die Übergangsbereiche können durch die Anzahl und Dicke der Schichten sowie durch den Grad der eingebrachten Betonmischungen gesteuert werden (Abbildung 7) [19].



Abbildung 7: Geschichteter Porositätsgradient [19]

Mittels Sprühverfahren lassen sich stufenlose und somit kontinuierliche Gradierungen erzielen. Hierzu sind zwei Betonmischungen mit stark unterschiedlichen Eigenschaften notwendig, welche durch eine Volumenstromregelung überlagert werden. Zur Förderung und Regelung des Massenstroms des Betons können sowohl ein Trocken- als auch ein Nassspritzverfahren eingesetzt werden. Die Gradientenbildung kann durch Überlagerung zweier Sprühstrahlen im Sprühnebel oder durch eine Zusammenführung der beiden Betone vor der Düse erfolgen (Abbildung 8).

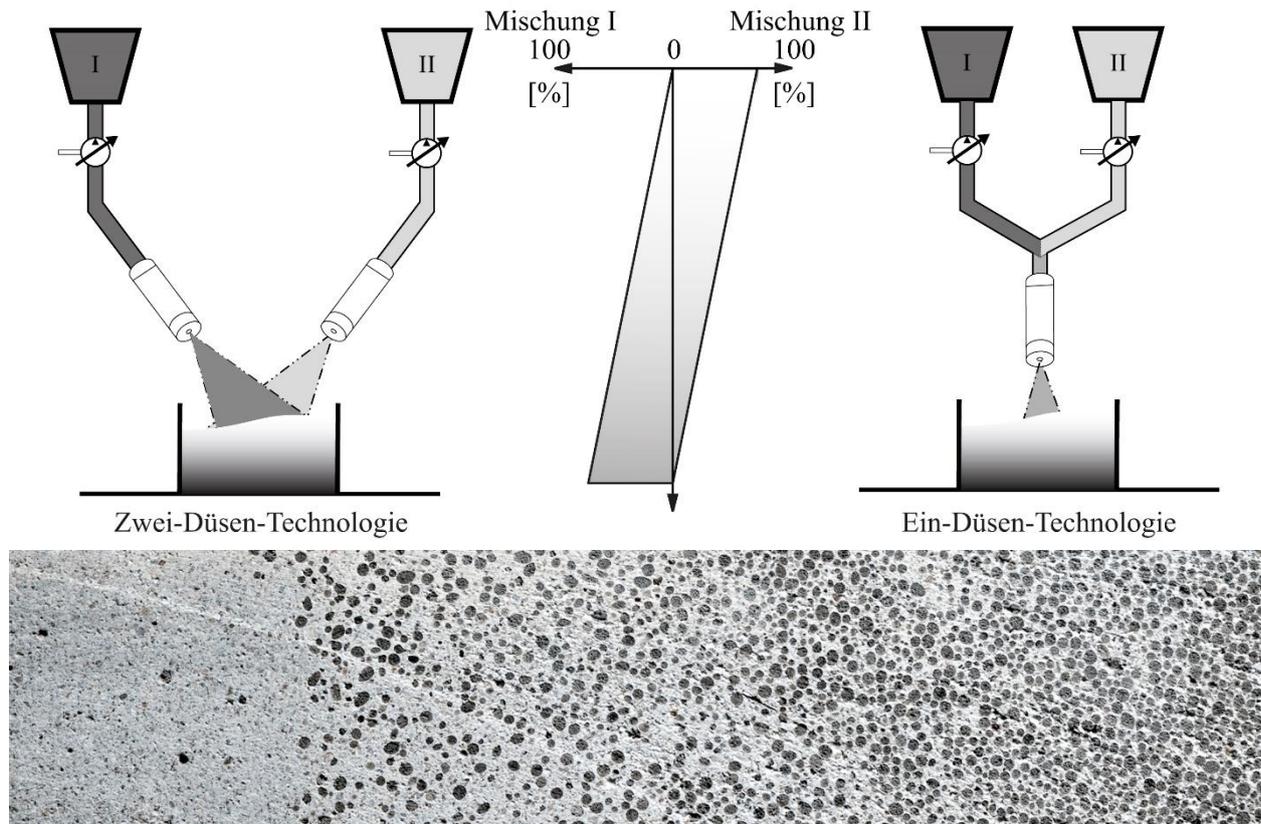


Abbildung 8: Konzept (oben) und Ergebnis (unten) des gradierten Sprühens mit der 2-Düsen-Technologie [21]

In zwei von der DFG geförderten Projekten im Rahmen des SPP 1542 – Leicht Bauen mit Beton („Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen“ und „Effiziente automatisierte Herstellung multifunktionaler gradierten Bauteile mit mineralisierten Hohlkörpern“) konnte das Gradientensprühverfahren in einer Pilotanlage, bestehend aus der Betonverfahrens- und der Applikationstechnik, von den Verfassern automatisiert werden [21]. Die Betonverfahrenstechnik setzt sich aus dem Misch- und dem Förderprozess zusammen (Abbildung 9). Beim Trockenspritzverfahren werden zwei Basismischungen MI und MII in je einem Zwangsmischer trocken vorgemischt und den Rotortrockenspritzmaschinen über Fallrohre zugeführt. Der gewünschte Materialstrom wird durch eine Drehzahlregelung der Maschinen und einen definierten Luftvolumenstrom pneumatisch zum Düsensystem gefördert. Vor dem Austritt des Materials an der Düse wird die trockene Ausgangsmischung in Abhängigkeit vom Massestrom und vom w/z-Wert mittels einer Vor- und Hauptbenetzung unter Verwendung eines Flüssigdosiergeräts benetzt. Die Gradierung erfolgt hierbei auf Basis der „Zwei-Düsen-Technologie“. Beim Nassspritzverfahren wird der Frischbeton direkt in den Herstellungsprozess zugeführt, die rheologischen Eigenschaften können in einem vorgelagerten Mischprozess mit hoher Güte eingestellt werden. Über die Regelung der Drehzahl der Schneckenradpumpen wird der Frischbeton im Dichtstrom zu der vorgelagerten Mischeinheit der „Ein-Düsen-Technologie“ gefördert. Zur Manipulation der Betoneigenschaften können den jeweiligen Materialströmen vor der Zusammenführung mittels Hydropumpen Additive zugeführt werden.



Abbildung 9: Rotortrockenspritzmaschinen (links) und Nassspritzmaschinen (rechts) [21]

Zur Herstellung gradierter Betonbauteile in reproduzierbarer und hoher Qualität muss neben der Beton-technologie auch die exakte Positionierung der Betone innerhalb des Bauteils sichergestellt werden. Hierzu wurde vom ISYS ein Prototyp eines Applikationssystems entwickelt und realisiert (Abbildung 10). Dieses besteht aus einem Mehrachslensystem mit drei translatorischen Freiheitsgraden zur Ausführung der Düsenführungsbewegung und einer Parallelkinematik mit sechs Freiheitsgraden zur Umsetzung der Düsenneigenbewegung. Die Bewegung der Parallelkinematik erlaubt die dreidimensionale Orientierung der Ausbringvorrichtung und durch eine überlagerte hochdynamische, elliptische Bewegung der Düsen die Homogenisierung des Materialauftrages.



Abbildung 10: Applikationssystem (links) mit Stewart-Gough-Plattform (rechts) [21]

3.2.4 Entwurf funktional gradierter Betonbauteile

Der Entwurf monofunktional gradierter Betonbauteile wurde maßgebend im Forschungsvorhaben „Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierter Elementdecken“ (gefördert durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau) für den Anwendungsfall der Geschossdecke entwickelt. Beim rein tragstrukturellen Entwurf wird mit der funktionalen Gradierung das Ziel verfolgt, eine gegebene Belastung unter Einhaltung von Tragfähigkeits- und Verformungsgrenzen mit einem Minimum an Eigengewicht der Konstruktion abzutragen. Das hierfür notwendige Gradientenlayout kann anhand unterschiedlicher Ansätze unter Berücksichtigung der in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens zur Verfügung stehenden

Betoneigenschaften und Fertigungsrestriktionen entworfen werden [21]. Wird das Material im Bauteilinneren nach den vorherrschenden inneren Kraftgrößen verteilt, so entsteht eine einfache Auflösung (Abbildung 11, oben), jedoch keine Gewichtsminimalität. Mit dem Transfer von Verfahren aus der Topologieoptimierung kann das Material bei jedweder Bauteilgeometrie im Sinne eines fully-stressed design angeordnet werden [24]. Die Komplexität der Materialverteilung richtet sich in erster Linie nach der Auflösung des Materialauftrags durch die gewählte Herstellungstechnologie inklusive derer Eigenschaftsspektrum der Betone (Abbildung 11, unten). Diese Faktoren beeinflussen somit die Effizienz und die Gewichtsersparnis der Bauteile maßgebend.

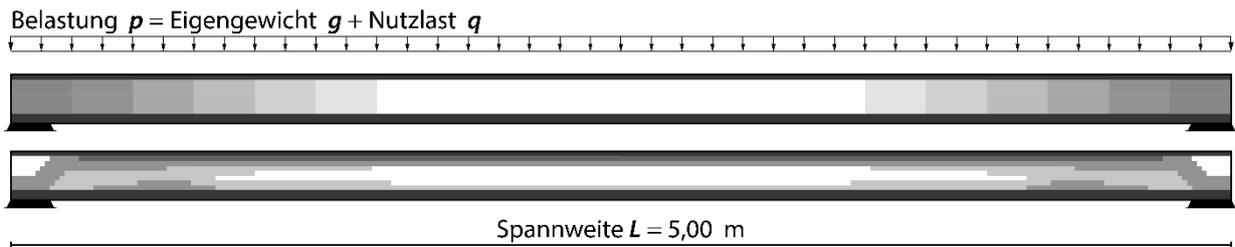


Abbildung 11: Gradientenlayout bestimmt durch die inneren Schnittkräfte im Bauteil (oben) und durch die Topologieoptimierung (unten)

4 Untersuchungsrahmen und Zusammenstellung normativer Regelungen für die Auslegung von Wandbauteilen (ILEK)

4.1 Untersuchungsrahmen

4.1.1 Festlegung der multifunktionalen Anforderungen

Multifunktionalität bezeichnet im Bauwesen das Prinzip, in einem Bauteil oder in einer Konstruktion neben dem Lastabtrag noch weitere, z.B. dämmende, raumabschließende oder ähnliche Funktionen zu integrieren [25]. Für die in diesem Projekt zu entwerfende Außenwand ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Funktionalitäten. Tabelle 4-1 fasst die wesentlichen Anforderungen, die an eine Außenwand gestellt werden, zusammen:

Tabelle 4-1: Anforderungen an eine tragende Außenwand [26]

Tragfähigkeit	Bauphysik	Sonstige
Standicherheit	Wärmeschutz	Ästhetische
Gebrauchstauglichkeit	Schallschutz	Leitungsführung
	Brandschutz	Öffnungen
	Feuchteschutz	
	Schlagregenschutz	

Konzeptionell könnte eine multifunktionale Gradientenwand aus einem mehrschichtigen Aufbau bestehen (Abbildung 12). Eine äußere Deckschicht mit integrierter Bewehrung übernimmt neben der Tragfunktion auch die Dichtigkeit und definiert die äußere Gestalt beispielsweise durch eine wasserabweisende Oberfläche in Sichtbetonqualität. Die innere Deckschicht kann unter Verwendung von Pigmenten individuell gestaltet werden und stellt ebenfalls die Tragfähigkeit sicher. Zwischen den Außenschichten wird ein mineralischer Dämmkern zum Wärmeschutz eingesetzt und durch einen fließenden Porositätsverlauf wird der dauerhafte Verbund der Funktionsschichten gewährleistet [19].

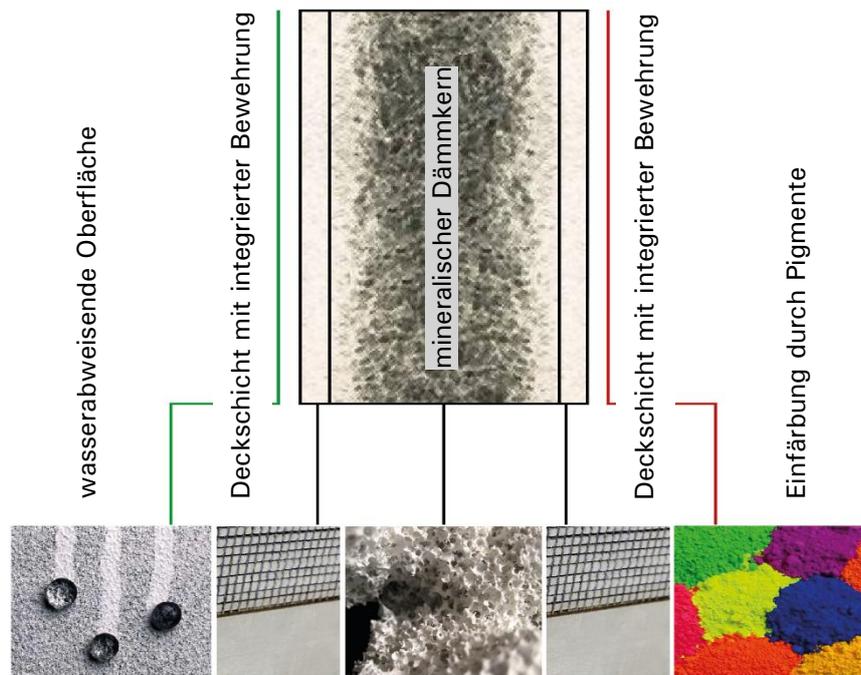


Abbildung 12: Konzeptioneller Aufbau einer multifunktionalen Gradientenwand

4.1.2 Festlegung von Anwendungsfall und Bauteilgeometrie

Der Entwurf befasst sich mit der Auslegung eines Außenwandelementes, das zunächst die Funktionen Tragen, Dichten und Dämmen vereint und darüber hinaus mit einer Oberfläche in Sichtbetonqualität gestaltet ist. Der Schallschutz spielt im Betonbau aufgrund der massiven Bauweise eine eher untergeordnete Rolle, ebenso wie der Brandschutz aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Beton [27]. Da sich jedoch das Gewicht einer Außenwand durch die Gradierung reduziert und die Wärmeleitfähigkeit verbessert, sollen diese bauphysikalischen Anforderungen ebenso wie der Feuchteschutz für jeden Entwurf bewertet werden.

Eine der entscheidenden Eingangsgrößen für den Bauteilentwurf ist neben den Anforderungen die Dimension des zu entwerfenden Bauteils und dessen Position in der Gesamtkonstruktion. Wärmedämmende Massivwände werden üblicherweise im Geschosswohnungsbau eingesetzt, weshalb für die weiteren Untersuchungen dieser Anwendungsfall zu Grunde gelegt wird. Außerdem wird die Vereinfachung getroffen, dass das Bauteil nur über der Geländeoberkante eingesetzt wird. Damit können horizontale Lasten auf die Wand (bspw. aus Erddruck) bei der Auslegung vernachlässigt werden.

Als Fallbeispiel wird ein dreigeschossiges Gebäude gewählt, um die einwirkenden Kräfte auf die Wandgeometrie zu definieren. Das Referenzsystem wird als ein 1,00 m breiter und 3,00 m hoher Wandausschnitt festgelegt. Hierauf werden die maßgebenden vertikal gerichteten Einwirkungen infolge der Weiterleitung der Lasten aus den Decken und des Eigengewichts der Wände angesetzt (Abbildung 13). Die Einwirkung aus Deckeneigengewicht je Geschoss beträgt $E_{d,di} = 38 \text{ kN/m}$ und bestimmt sich aus der Deckenspannweite von 7 m, der Deckendicke von 20 cm, der Wichte von Stahlbeton mit 25 kN/m^3

und einer typischen Nutzlast für Bürogebäude von $2,8 \text{ kN/m}^2$. Die Eigengewichtslast aus der Wand beläuft sich auf $E_{d,Wi} = 21 \text{ kN/m}$ unter der Annahme eines Flächeneigengewichts von 5 kN/m^2 . Die Einwirkungen auf die unterste Geschosswand sind rein von der Geschoszahl abhängig und betragen bei einem Geschoss ca. 38 kN/m . Damit ergibt sich bei sieben Geschossen ein Wert von ca. 390 kN/m (Abbildung 13).

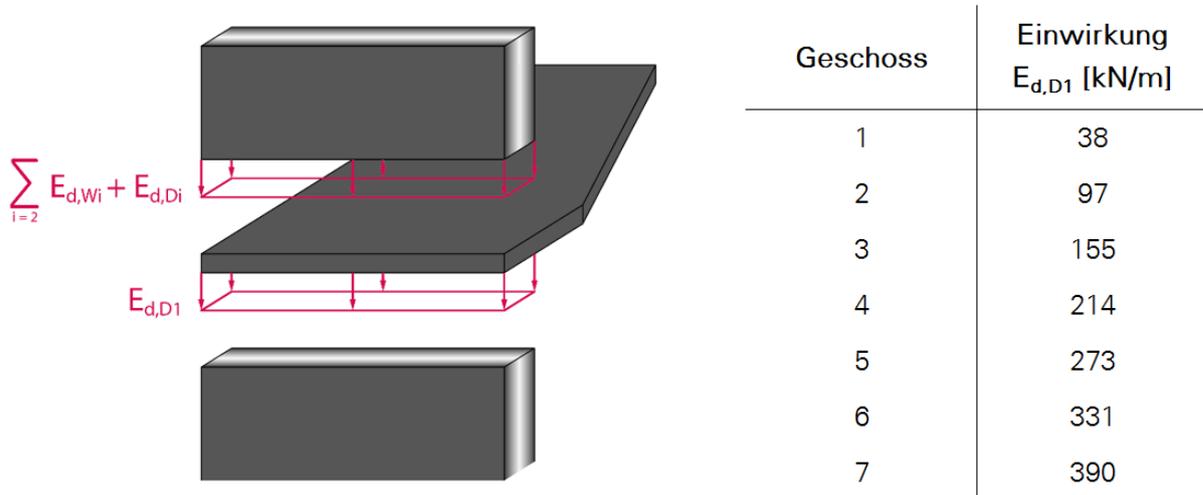


Abbildung 13: Einwirkungen auf das Referenzsystem und Betrag der Einwirkung in Abhängigkeit von der Geschoszahl

Die Bauteildicke wird erst in den nachfolgenden Kapiteln in Abhängigkeit der Anforderungen dimensioniert, trotzdem soll eine Zielvorgabe der Wandstärke definiert werden. Die zu entwerfende Gradientenbetonwand soll eine deutliche Massenreduktion aufweisen. Zudem soll ein wirtschaftlicher Transport des vorgefertigten Bauteils gewährleistet werden. Aus diesen Gründen und damit eine Vergleichsbasis zu Standardformaten des Mauerwerks gegeben ist, wurde in Absprache mit den Industriepartnern das Ziel einer maximalen Wandstärke von $36,5 \text{ cm}$ bei einer flächenbezogenen Masse von maximal 5 kN/m^2 festgelegt. Hierdurch sind bei standardmäßigen Transportmaßen nach StVZO §32 mindestens 25 laufende Meter Wand pro Transport möglich.

4.1 Statische Bemessung und Konstruktion von Betonbauteilen

4.1.1 Lastabhängiges Verhalten

4.1.1.1 Tragfähigkeitsnachweis einer Wand

Eine Wand ist definiert als ein Bauteil, dessen Länge mindestens der vierfachen Dicke entspricht [28]. Der Nachweis der Tragfähigkeit dieses Bauteils ist nach den anerkannten Regeln der Technik zu führen und in DIN EN 1992-1-1 [28] festgelegt. Die Norm gibt hierzu unterschiedliche Nachweisverfahren an. Im Rahmen des Projekts werden die vereinfachten Verfahren für unbewehrte und bewehrte Wände aus Beton angewandt. Diese besitzen Gültigkeit, wenn das druckbeanspruchte Bauteil eine erforderliche Grenzschlankheit einhält. Die Schlankheit λ ist definiert als das Verhältnis von Knicklänge l_0 und Flächenträgheitsradius i des ungerissenen Betonbauteils:



$$\lambda = l_0 / i \quad (4.1)$$

$$\text{mit: } l_0 = \beta \cdot l_s \quad (4.2)$$

$$i = \sqrt{I/A} \quad (4.3)$$

Der Flächenträgheitsradius wird bestimmt nach Gl.4.4 und ist abhängig von der Bauteilgeometrie und im Detail von der Breite b und der Dicke d der Wand:

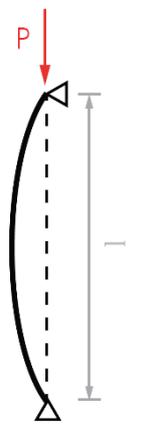
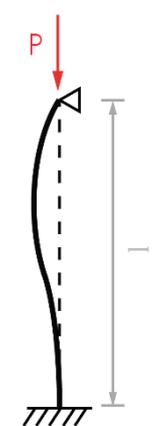
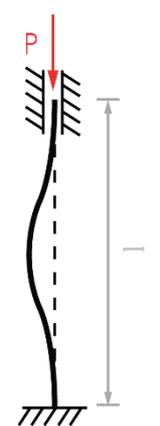
$$I = \frac{b \cdot d^3}{12} \quad (4.4)$$

$$A = b \cdot d \quad (4.5)$$

In die Knicklänge l_0 gehen ein: die lichte Bauteilhöhe l_s und der Knicklängenbeiwert β gemäß Euler (Tabelle 4-2). Die allgemeine kritische Knicklast nach Euler kann somit wie folgt berechnet werden:

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_0^2} \quad (4.6)$$

Tabelle 4-2: Knickbeiwerte für Eulerfall I – IV nach [29]

Eulerfall 1	Eulerfall 2	Eulerfall 3	Eulerfall 4
			
$\beta = 2,0$	$\beta = 1,0$	$\beta = 0,7$	$\beta = 0,5$

Für Bauteile aus Beton ergeben sich nach DIN EN 1992-1-1 andere Ansätze zur Berechnung der kritischen Knicklast. Für den vereinfachten Nachweis muss zunächst die Schlankheit des Wandbauteils begrenzt werden, damit der Gültigkeitsbereich des Verfahrens erfüllt ist. Dies ist bei unbewehrten Bauteilen gewährleistet, wenn der Wert $\lambda_{lim} = 86$ nicht überschritten wird. Für bewehrte als auch unbewehrte Bauteile kann die Grenzschlankheit auch alternativ über die Vernachlässigung der Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung gemäß DIN EN 1992-1-1 und dem für Deutschland gültigen nationalen Anhang wie folgt begrenzt werden:



$$\lambda_{lim} = 25 \text{ für } |n| \geq 0,41 \quad (4.7)$$

$$\lambda_{lim} = 16 / \sqrt{|n|} \text{ für } |n| < 0,41 \quad (4.8)$$

$$\text{mit: } n = N_{Ed} / A_c \cdot f_{cd} \quad (4.9)$$

Die bezogene Normalkraft n setzt sich zusammen aus der einwirkenden Normalkraft N_{Ed} im Verhältnis zum Bauteilwiderstand, gebildet aus dem Produkt aus Querschnittsfläche A_c und dem Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} . Für unverschiebliche Tragwerke kann unter Einhaltung der Grenzschlankheit folgender Widerstand des Bauteils $N_{Rd,\lambda}$ angesetzt werden:

$$N_{Rd,\lambda} = b \cdot d \cdot f_{cd} \cdot \Phi \quad (4.10)$$

$$\text{mit: } \Phi = 1,14 \cdot (1 - 2 \cdot e_{tot}/d) - 0,02 \cdot l_0/d \quad (4.11)$$

$$e_{tot} = e_0 + e_i \quad (4.12)$$

In den Widerstand fließen die Wandbreite b , die Wanddicke d , die Betondruckfestigkeit f_{cd} und ein Faktor Φ , der sowohl Lastausmitten e_{tot} als auch die Auswirkungen aus Theorie II. Ordnung und Kriechen berücksichtigt, ein. Der Wert e_0 beschreibt die Lastausmitte nach Theorie I. Ordnung und e_i die ungewollte Lastausmitte, welche näherungsweise mit $e_i = l_0/400$ angenommen werden kann [28].

4.1.2 Lastunabhängiges Verhalten

4.1.2.1 Schwinden

Schwinden, Kriechen und Relaxation sind zeitabhängige Verformungen, die die Gebrauchstauglichkeit von Betonbauteilen beeinflussen und sich auch auf die Tragfähigkeit auswirken können. Da es sich beim Kriechen um eine Dehnungszunahme unter einer vorgegebenen Spannung und bei der Relaxation um eine Abnahme der Spannung unter einer vorgegebenen Dehnung handelt, werden diese beiden vergleichbaren Mechanismen gemeinsam behandelt und in der Tragfähigkeit bereits durch den Korrekturfaktor Φ berücksichtigt. Demzufolge wird lediglich das Schwinden, als lastunabhängige Volumenverminderung weiter betrachtet. Die Gesamtdehnung des Schwindens $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ setzt sich zusammen aus den Dehnungen des Trocknungsschwindens $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ und des Schrumpfens $\varepsilon_{cas}(t)$, welches die Summe des chemischen und des autogenen Schwindens darstellt (Abbildung 14) [30].

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (4.13)$$

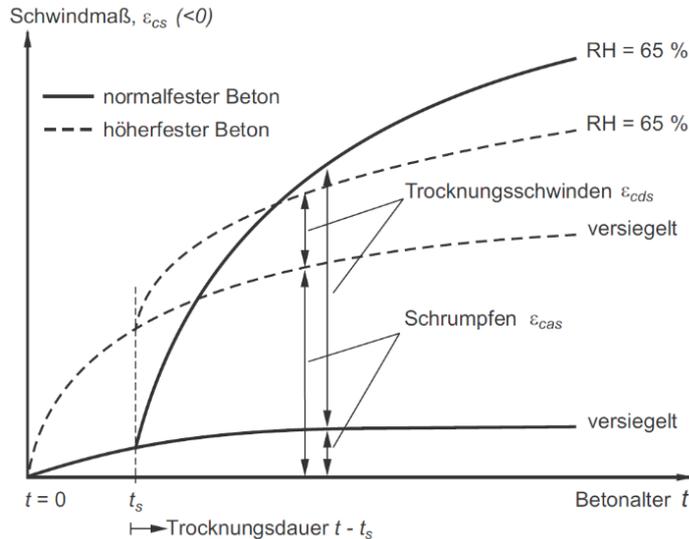


Abbildung 14: Entwicklung der Schwindverformung [30]

Die Schrumpfung wird maßgeblich von der Betonzusammensetzung gesteuert und wächst mit steigendem Zementanteil [30]. Der größte Dehnungsanteil tritt bereits während der Betonhärtung in den ersten Tagen auf und muss bei der Verwendung von unterschiedlichen Betonen innerhalb eines Bauteils berücksichtigt werden.

$$\epsilon_{cas}(t) = \epsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t) \tag{4.14}$$

Die Schrumpfung setzt sich aus einem zementartabhängigen Dehnungsfaktor $\epsilon_{cas0}(f_{cm})$ und einem Faktor für den zeitlichen Schrumpfvorgang $\beta_{as}(t)$ zusammen, die wie folgt berechnet werden können:

$$\epsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left(\frac{f_{cm}}{60 + f_{cm}} \right)^{2,5} \cdot 10^{-6} \tag{4.15}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0,2 \cdot \sqrt{\frac{t}{t_1}})} \tag{4.16}$$

Das Trocknungsschwinden erfordert eine Feuchtedifferenz zwischen innerer Bauteilfeuchte und Umgebungfeuchte. Das Trocknungsschwinden setzt mit dem Beginn der Austrocknung ein und ist abhängig von Bauteilform und dem Feuchteangebot der Umgebung [30].

$$\epsilon_{cds}(t, t_s) = \epsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \cdot \beta_{RH}(RH) \tag{4.17}$$

Die Gesamtdehnung setzt sich somit zusammen aus einem Dehnungsanteil $\epsilon_{cds0}(f_{cm})$, der von der Zementart abhängig ist, einem zeitlichen Faktor $\beta_{ds}(t - t_s)$ und einem Faktor $\beta_{RH}(RH)$, der die Umgebungfeuchte berücksichtigt.



$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{10})} \right] \cdot 10^{-6} \quad (4.18)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \sqrt{\frac{(t - t_s)/t_1}{350 \cdot \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 + (t - t_s)/t_1}} \quad (4.19)$$

$$\beta_{RH}(RH) = -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3 \right] \text{ für } 40\% < RH < 99\% \quad (4.20)$$

Die Beiwerte zur Berücksichtigung des Zementtyps sind nach [28] in Tabelle 4-3 zusammenfassend aufgelistet.

Tabelle 4-3: Beiwerte α_{as} , α_{ds1} und α_{ds2} in Abhängigkeit des Zementtyps

Festigkeitsklasse nach DIN EN 197-1	α_{as}	α_{ds1}	α_{ds2}
32,5 N	800	3	0,13
32,5 R; 42,5 N	700	4	0,12
42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	600	6	0,12

4.1.2.2 Temperatur

Die Oberflächen von Außenwänden unterliegen jährlichen Temperaturschwankungen gegenüber dem Einbauzustand bspw. durch Lufttemperatur oder Sonneneinstrahlung. Bei mehrschichtigen Bauteilen unter Verwendung von Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten führt dies zu Zwangsbeanspruchungen im Inneren des Bauteils. Diese müssen beim Entwurf bzw. der Bemessung entsprechend berücksichtigt werden. Das Deutsche Institut für Bautechnik hat folgende Temperatureinwirkungen für eine bauaufsichtliche Zulassung festgesetzt:

- Innen- und Außenseite der Tragschicht (ganzjährig): $\vartheta_i = +20^\circ$
- Außenseite der Vorsatzschicht im Sommer: $\vartheta_i = +65^\circ$
- Außenseite der Vorsatzschicht im Winter: $\vartheta_i = -20^\circ$
- Temperaturdifferenz gegenüber dem Einbauzustand: $\Delta T = \pm 45^\circ$
- Temperaturgradient der Vorsatzschale: $\Delta T \geq \pm 5^\circ$

Daraus ergeben sich gemäß [31] die in Abbildung 15 dargestellten, maßgebenden Einwirkungen unter Temperatur für Betonsandwichelemente. Unterschieden werden hierbei der Temperaturverlauf für Sommer und Winter aufgrund der Aufheizung und der Abkühlung der Außenoberfläche sowie die Änderung des Mittelwertes der Temperatur der Vorsatzschale.

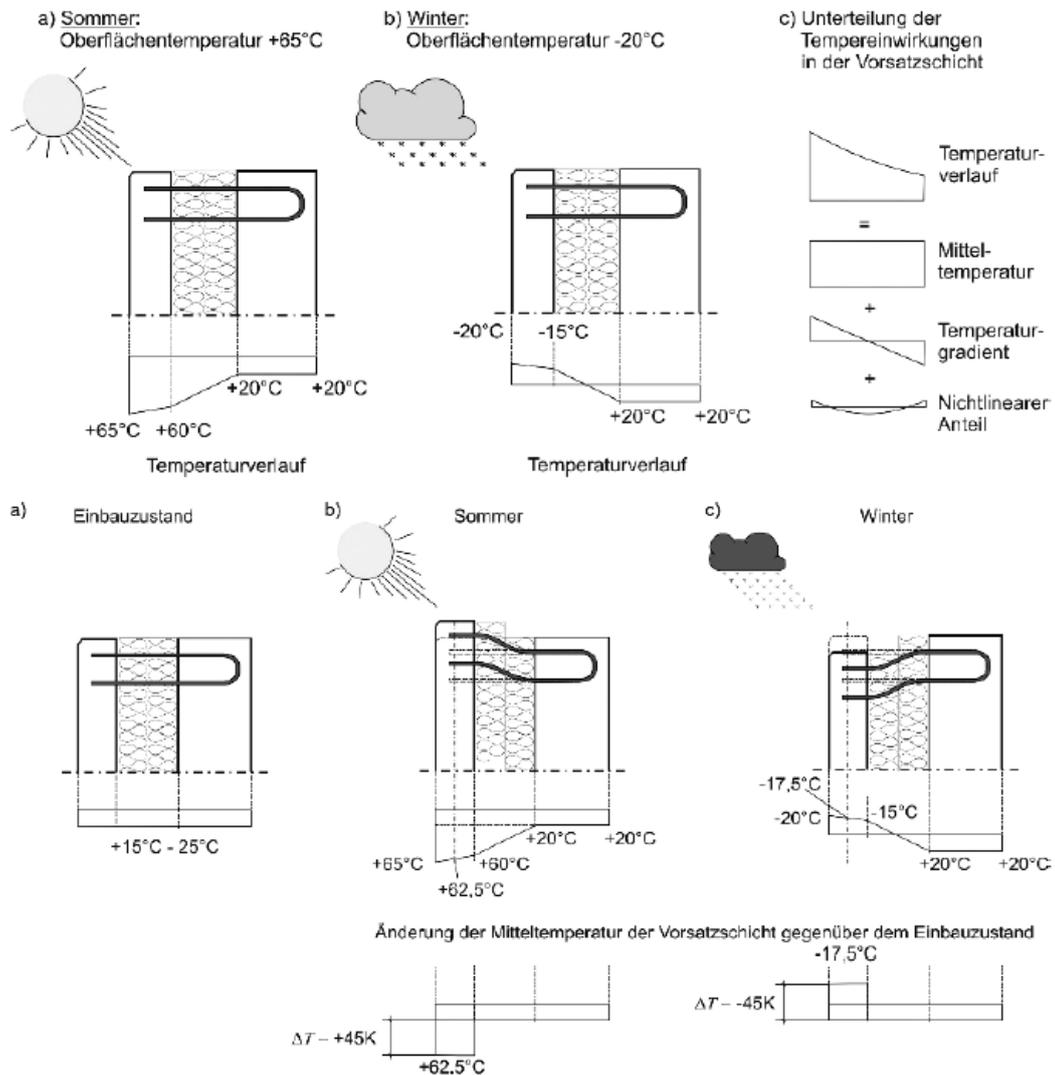


Abbildung 15: Temperaturverlauf in einem Betonsandwichelement (oben) und Änderung des Mittelwertes der Temperatur der Vorsatzschale (unten) [31]

Die infolge Temperaturbeanspruchung auftretenden Dehnungen können in Abhängigkeit des Temperatureausdehnungskoeffizienten α_T von Beton und des Temperaturgradienten ΔT wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (4.21)$$

Dabei kann nach Norm ein mittlerer Temperatureausdehnungskoeffizient von $\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6}/K$ für Normalbeton angesetzt werden. Bei Leichtbetonen hängt die Wärmedehnzahl maßgeblich von der verwendeten Gesteinskörnung ab und liegt in der Größenordnung zwischen $4 \cdot 10^{-6}/K$ und $14 \cdot 10^{-6}/K$.



4.2 Bauphysikalische Bemessung von Wandbauteilen

4.2.1 Wärmeschutz

Der bauliche Wärmeschutz hat einen erheblichen Einfluss auf die Behaglichkeit in Räumen und spielt im Wohnungsbau eine essentielle Rolle. Er dient nicht nur zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs, sondern auch zur Schaffung eines hygienischen Raumklimas (Funktionssicherheit des Gebäudes) und schützt vor Feuchteschäden aus klima- und nutzungsbedingter Feuchteeinwirkung (Dauerhaftigkeit der Bauteile) [32]. Um diese Aufgaben zu erfüllen, ist in der Energieeinsparverordnung (EnEV) der sogenannte Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) geregelt. Die EnEV 2017 besagt, dass der U-Wert für eine Außenwand nicht größer als $0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ sein darf.

Der Wärmedurchgangskoeffizient eines mehrschichtigen Bauteils ist abhängig von den einzelnen Schichtdicken und der Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Materialschichten. Die Berechnung des U-Wertes erfolgt über die Formel:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{si} + R_n + R_{se}} \leq 0,21 \quad (4.22)$$

mit:

- U : Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W/m}^2\text{K}$]
- R_t : Wärmedurchlasswiderstand der Wand [$\text{m}^2\text{K/W}$]
- R_n : Wärmedurchlasswiderstand des Schichtaufbaus [$\text{m}^2\text{K/W}$]
- R_{si} : Wärmeübergangswiderstand innen ($= 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$)
- R_{se} : Wärmeübergangswiderstand außen ($= 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$)

Die Wärmeübergangswiderstände sind keine Materialkonstanten, sondern beschreiben den Wärmeaustausch zwischen der umgebenden Luft und den Bauteiloberflächen mittels Konvektion. Aus diesem Grund muss danach unterschieden werden, ob der Wärmestrom durch vertikale (Wände) oder horizontale Flächen (Decken) fließt und ob es sich um die Gebäudeinnenseite (R_{si}) oder -außenseite (R_{se}) handelt. Die angegebenen Werte für R_{si} und R_{se} gelten für eine horizontale Richtung des Wärmestroms. Der Wärmedurchlasswiderstand R_n beschreibt den Widerstand, mit dem das Bauteil dem durchfließenden Wärmestrom entgegenwirkt und berechnet sich wie folgt:

$$R_n = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (4.23)$$

mit: d_i : Schichtdicke [m]
 λ_i : Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

4.2.2 Feuchteschutz

Der Feuchteschutz kann durch eine Verhinderung von Tauwasser- und Schimmelpilzbildung an Bauteiloberflächen sichergestellt werden. Dies kann nutzungstechnisch durch eine Reduktion der Wasserdampfproduktion und/oder eine Verbesserung der Lüftung oder konstruktiv durch einen verbesserten Wärmeschutz des Bauteils bzw. eine Verbesserung des Wärmeübergangs an der Wandoberfläche erfolgen [33]. Die beiden zuletzt genannten Maßnahmen können dadurch erreicht werden, dass die Bedingung $f_{Rsi} \geq 0,70$ erfüllt ist. Der dimensionslose Temperaturfaktor kann über die Raumluft- (θ_i) und Außenlufttemperatur (θ_e) sowie die innere Oberflächentemperatur (θ_{si}) bestimmt werden:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \geq 0,70 \quad (4.24)$$



Die Oberflächentemperatur von ebenen, homogen geschichteten Bauteilen ist wiederum vom Aufbau und somit vom U-Wert des Bauteils abhängig. Gemäß [33] tritt kein Schimmelbefall auf, wenn die Oberflächentemperatur θ_{si} von 12,6°C bei 20°C Raumlufthtemperatur und -5°C Außenlufttemperatur bei einer rel. Raumluftfeuchte von 50 % nicht unterschritten wird. Damit ist das Außenbauteil als ausreichend wärmedämmend anzusehen.

$$\theta_{si} = \theta_i - \frac{R_{si}}{R_{si} + R_n + R_{se}} \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (4.25)$$

4.2.3 Schallschutz

Die Erfordernisse aus dem Schallschutz für Wandelemente sind in DIN 4109-1 [34] und DIN 4109-2 [35] geregelt. Diese Anforderungen dienen dem Schutz der in den Räumen befindlichen Personen vor Geräuschen aus fremden Räumen (z.B. Nachbarwohnungen), Geräuschen von technischen Anlagen und vor Außenlärm. In der Praxis werden für ein Bauelement in der Regel zwei verschiedene Arten der Schalldämmung: Luftschalldämmung R'_w und Trittschalldämmung $L'_{n,w}$, bewertet, wobei Letztere für Wandbauteile nicht zu berücksichtigen ist. Die erforderlichen Grenzwerte für die Luftschalldämmung sind abhängig vom Gebäudetyp, dem Bauteil selbst, der Raumnutzung und dem Pegel der Lärmquelle. Für die Auslegung von Außenwandbauteilen werden zwei Fälle maßgebend. Die Schalldämmung von Haustrennwänden zwischen Reihen- und Doppelhäusern sowie die Einhaltung der allgemeinen Anforderungen der Luftschalldämmung von Außenbauteilen. Der erste Fall wird beeinflusst durch die Konstruktionsweise der Nachbarbebauung und muss für den Einzelfall geprüft werden. Im Folgenden beschränkt sich daher der Nachweis der Wandbauteile auf die Einhaltung der geforderten Bau-Schalldämm-Maße nach Art des Raums und Lärmpegelbereich, die nach Norm wie folgt festgelegt sind:

Tabelle 4-4: Anforderungen an die Schalldämmung von Wänden nach [29]

Lärmpegelbereich und Außenlärmpegel	Erforderliches Bau-Schalldämm-Maß	
	Aufenthaltsräume	Büroräume
I (bis 55 dB)	30 dB	30 dB
II (56 bis 60 dB)	30 dB	30 dB
III (61 bis 65 dB)	35 dB	30 dB
IV (66 bis 70 dB)	40 dB	35 dB
V (71 bis 75 dB)	45 dB	40 dB
VI (76 bis 80 dB)	50 dB	45 dB
VII (> 80 dB)		

Für die Auslegung der Wandbauteile wird als Orientierungswert bei der städtebaulichen Planung [36] der Lärmpegelbereich VI definiert, sodass ein erforderliches Bau-Schalldämm-Maß von mindestens 50 dB einzuhalten ist. Die Berechnung des bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes R'_w erfolgt nach DIN 4109-2 [35] und unterscheidet zwischen Rechenmodellen für verschiedene Bauweisen. Für die weiteren Betrachtungen im Projekt sind die Schallschutznachweise für die Direktschalldämmung von massiven Bauteilen von Bedeutung. Für die direkte Schallübertragung durch ein massives Bauteil kann das bewertete Schalldämm-Maß $R_{Dd,w}$ wie folgt ermittelt werden:



$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (4.26)$$

Zur Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes können zusätzliche Vorsatzkonstruktionen auf dem Bauteil angebracht werden, die durch den Faktor $\Delta R_{Dd,w}$ in der Berechnung berücksichtigt werden. $R_{s,w}$ beschreibt das bewertete Schalldämm-Maß des trennenden massiven Bauteils in dB. Dieses ist nach DIN 4109-32 abhängig von der Konstruktion und den verwendeten Werkstoffen. Auf der sicheren Seite liegend wird für die Nachweise gradiertter Wandbauteile das Masseverhalten von Beton gewählt, wodurch sich das bewertete Schalldämm-Maß wie folgt berechnet:

$$R_{s,w} = 30,9 \lg(m'_{ges}/m'_0) - 22,2 \quad (4.27)$$

mit: $R_{s,w}$: bewertetes Schalldämm-Maß [dB]
 m'_{ges} : flächenbezogene Masse des Materials mit $65 \text{ kg/m}^2 < m'_{ges} < 720 \text{ kg/m}^2$
 m'_0 : die Bezugsgröße mit $m'_0 = 1 \text{ kg/m}^2$

Die flächenbezogene Masse des Bauteils bestimmt sich aus der Dicke des Bauteils d_i und seiner Rohdichte ρ_i bzw. der Summation der einzelnen flächenbezogenen Schichten des Gesamtbauteils.

$$m'_{ges} = \sum_i d_i \cdot \rho_i \quad (4.28)$$

4.2.4 Brandschutz

Ein anforderungsgerechter Feuerwiderstand von tragenden Betonwänden kann nach DIN EN 1992-1-2 [28] anhand von Mindestwanddicken sichergestellt werden. Diese gelten nur für Normalbetone im Bereich der Rohdichten $2.000 \text{ kg/m}^3 < \rho < 2.600 \text{ kg/m}^3$. Für Leichtbetone mit haufwerksporigem Gefüge gibt DIN EN 1520 [37] Mindestmaße für Wanddicken bei Brandbeanspruchung an. Die Grenzwerte sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst. Dabei richten sich die Mindestwanddicken nach dem Ausnutzungsgrad im Brandfall μ_{fi} . Vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend schlägt DIN EN 1992-1-2 [28] die Verwendung des größten Ausnutzungsgrades vor. Für den vorgesehenen Einsatzbereich gradiertter Wandbauteile ist eine Feuerwiderstandsklasse von REI 90 als ausreichend anzusehen, woraus sich ein Mindestmaß der Wanddicke von 175 mm für Wände aus Leichtbeton mit beidseitigem Putz (Betondeckschicht) ergibt.

Tabelle 4-5: Mindestdicken für tragende Betonwände (*Werte gelten für Wände mit beidseitigem Putz)

Feuerwiderstandsklasse	Mindestmaß der Wanddicke [mm] bei Brandbeanspruchung auf einer Seite				
	Normalbeton [DIN 1992-1-2]		Leichtbeton [DIN EN 1520]		
	$\mu_{fi} = 0,35$	$\mu_{fi} = 0,70$	$\mu_{fi} = 0,2$	$\mu_{fi} = 0,5$	$\mu_{fi} = 1,0$
REI 30	100	120	115 (115)*	150 (115)*	175 (150)*
REI 60	110	130	150 (115)*	175 (150)*	200 (175)*
REI 90	120	140	150 (115)*	200 (175)*	240 (175)*
REI 120	150	160	150 (115)*	240 (200)*	300 (200)*
REI 180	180	210	175 (115)*	300 (200)*	300 (240)*



5 Weiterentwicklung der Beton- und Bewehrungstechnologie (AP1)

5.1 Entwicklungsstand der Betontechnologie zu Projektbeginn (ILEK)

Der Werkstoff Beton kann durch seine Zusammensetzung und Herstellung unterschiedliche Eigenschaften wie z.B. variable Rohdichten, Festigkeiten, Steifigkeiten und Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Durch die mögliche Kombination verschiedenster Betonmischungen innerhalb eines Bauteils kann dieses gleichzeitig unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Um dem gerecht zu werden, wurden in [19] unterschiedlichste Betonmischungen für das schichtweise Gießen (Index SG) gradierter Betonbauteile entwickelt (Tabelle 5-1). Das Eigenschaftsspektrum der Betone für das schichtweise Gießen wird begrenzt durch eine hochfeste Mischung (MI_{SG}) und zwei Leichtbetone (MII_{SG}), die sich durch die Wahl des verwendeten Leichtzuschlags unterscheiden. MII_{SG} (LM) setzt sich zusammen aus Zement, Wasser, dem Leichtzuschlag Blähglas der Firma Liaver (L) und Mikrohohlkugeln (M) als Porosierungsmittel. Bei der Mischung MII_{SG} (AM) wird als Leichtzuschlag Aerogel (A) und als Porosierungsmittel Mikrohohlkugeln verwendet. Zwischen den beiden Basismischungen gibt es mehrere Stufen der Gradientenbildung, die sich bezogen auf das Matrixvolumen unterschiedlich ausbilden können. Bei den Gradierungen G70 bis G30 werden in einem ersten Schritt die schweren Bestandteile durch den Leichtzuschlag Blähglas substituiert und im zweiten Schritt wird zusätzlich bei den Gradierungen G20 und G10 die Zementmatrix mit Mikrohohlkugeln porosiert.

Tabelle 5-1: Eigenschaften der Betone für das schichtweise Gießen [19]

Mischung	Betongefüge (Schliffbild)	$\rho_{Tr,10}$	ρ_{FB}	$f_{1c,cu}$	f_{1ct}	E_c	λ_{Tr}
		kg/dm ³	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	W/mK
MI _{SG} (AM)		0,21	0,32	0,26	0,13	163	0,03
MII _{SG} (LM)		0,33	0,49	1,63	0,66	1023	0,09
G10 _{SG} (LM)		0,59	0,70	5,27	1,06	3044	0,17
G20 _{SG} (LM)		0,81	0,96	8,00	1,36	5232	0,27
G30 _{SG} (L)		1,00	1,11	6,83	1,98	7070	0,37
G50 _{SG} (L)		1,35	1,69	21,06	3,17	14040	-
G70 _{SG} (L)		1,77	2,07	33,22	4,58	22841	1,00
MI _{SG}		2,08	2,23	57,46	6,16	35050	1,60

$\rho_{Tr,10}$

Trockenrohddichte

ρ_{FB}

Frischbetonrohddichte

$f_{1c,cu}$

einaxiale Druckfestigkeit

f_{1ct}

einaxiale Zugfestigkeit

E_c

E-Modul

λ_{Tr}

Wärmeleitfähigkeit

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren hin zu vollautomatisierten Sprühprozessen wurden sowohl für das Gradienten-Trockenspritzverfahren als auch für das Nassspritzverfahren jeweils eine höherfeste Basismischung MI und eine Leichtbetonmischung MII bereitgestellt. Diese konnten zu Projektbeginn noch nicht die erforderlichen niedrigen Dichten und damit die gewünschte niedrige Wärmeleitfähigkeit vorweisen, wie sie für eine ausreichende Wärmedämmung eines Betonbauteils nach EnEV notwendig wären. Abbildung 16 stellt den zu Beginn des Forschungsprojekts vorhandenen Eigenschaftsbereich von Betonrohddichte zu Betondruckfestigkeit für die unterschiedlichen Herstellungsverfahren gegenüber.

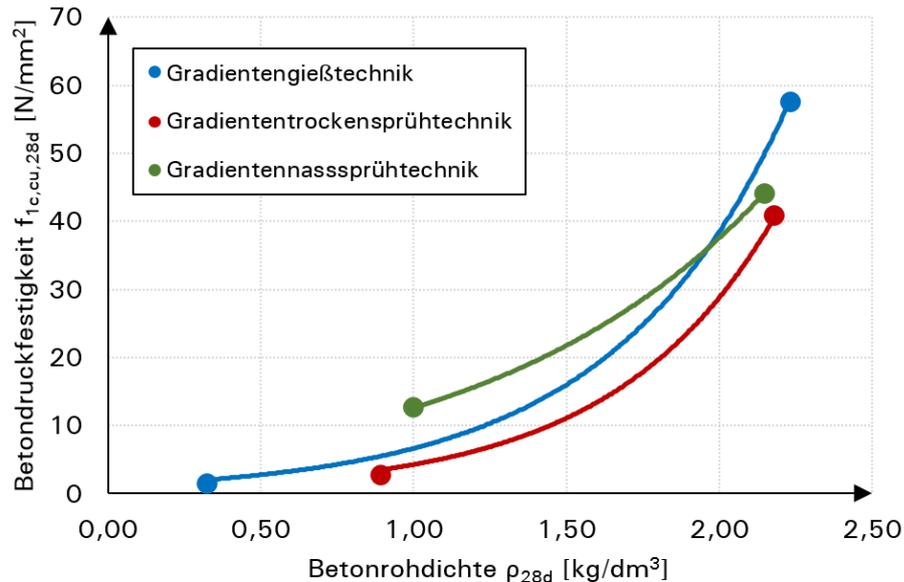


Abbildung 16: Betondruckfestigkeits-Dichte-Diagramm in Abhängigkeit des gradierten Herstellungsverfahrens

5.2 Ziele und Anforderungen an die weiterzuentwickelnde Betontechnologie (ILEK)

Für die betontechnologische Weiterentwicklung mit Ziel einer automatisierten Fertigung müssen Anforderungen für die Betoneigenschaften aufgestellt werden. Dabei bedarf die notwendige Mischungsentwicklung nicht nur der Festlegung bzw. Vorgabe von geforderten Eigenschaftsprofilen, sondern auch der Einbeziehung der charakteristischen Einflüsse aus der Herstellung. Schließlich sind neben Dichte, Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit Aspekte des Schwindens, der Förderbarkeit (Konsistenz) und des Erstarrungsverhaltens in der Rezepturenentwicklung zu berücksichtigen. Explizit gilt es, zwei Basismischungen zu entwickeln, bei denen eine die Tragfähigkeit sicherstellt und die andere den Wärmeschutz garantiert. Für die Basismischung II wurde anhand des übergeordneten Ziels einer Wand von ca. 36,5 cm Breite die maximal zulässige Wärmeleitfähigkeit abgeschätzt. Vereinfachend erfolgt die Abschätzung über die Annahme, dass der U-Wert der 36,5 cm breiten Wand rein durch den Wärmedurchlasswiderstand der Wand R_n erreicht wird. Damit leitet sich der Grenzwert der maximal zulässigen Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{MII} \approx 0,07 \text{ W/mK}$ ab, der in der Mischungsentwicklung erreicht werden sollte (Abbildung 17).

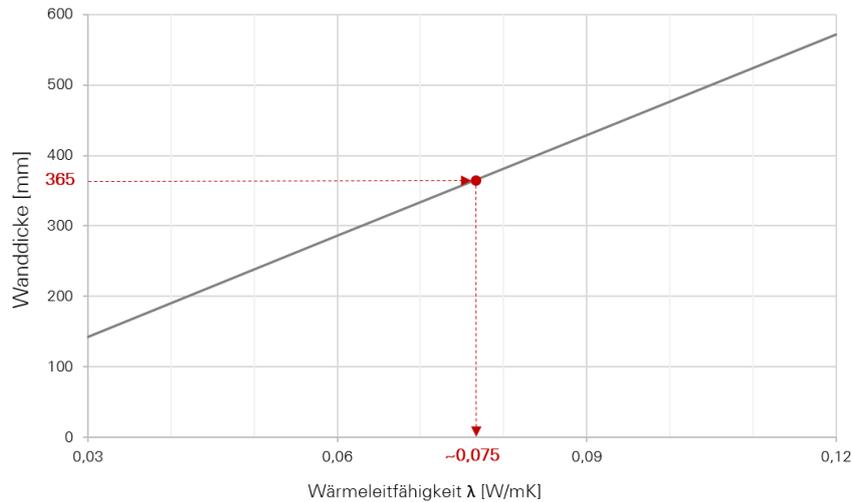


Abbildung 17: Maximal zulässige Wärmeleitfähigkeit zum Erreichen einer Wandstärke von 36,5 cm

Einhergehend mit der Forderung nach einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit werden geringe Rohdichten notwendig, da die beiden Eigenschaften in Korrelation zueinanderstehen. Die Erfahrungen zeigen, dass die minimal zu erreichenden Rohdichten stark von dem verwendeten Herstellungsverfahren abhängig sind. So wird beispielsweise durch das Trockenspritzverfahren, bei dem das Material mit hohem Luftdruck gefördert wird, der Beton während des Materialauftrags stark verdichtet. Daher kann mit dieser Methode nicht der geforderte Dichtebereich für die Mischung MII erreicht werden. Aus diesem Grund konzentriert sich die Mischungsentwicklung auf die Bereitstellung von geeigneten Betonrezepturen für die Nassspritztechnologie. Diesbezüglich wurde ein Anforderungskatalog (Tabelle 5-2) aufgestellt, welcher die Grundlage für die Mischungsweiterentwicklung der beiden Basismischungen für das Nassspritzverfahren darstellt.

Tabelle 5-2: Anforderungskatalog für die Mischungsentwicklung

	Basismischung MI	Basismischung MII
Festigkeit	≥ 60 N/mm ²	5 - 10 N/mm ²
Dichte	/	≤ 500 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	/	λ ≤ 0,07 W/mK
Größtkorn	max. 4 mm	max. 4 mm
Konsistenz	F4 - F5	F4 - F5
Erstarrungszeit	10 - 15 min	10 - 15 min
Verarbeitungszeit	60 - 90 min	60 - 90 min
Schwindmaß	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen
Rückprall	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen
Staubentwicklung	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen
Mischtechnik	Zwangsmischer (kein Intensivmischer)	Zwangsmischer (kein Intensivmischer)

5.3 Weiterentwicklung der Betonmischungen im Labor

5.3.1 Auswahl an Leichtzuschlägen (ILEK/IWB)

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit der Basismischung MII müssen Leichtzuschläge analysiert und für den Einsatz ausgewählt werden. Gemäß dem Projektziel sind diese auf einer mineralischen Basis zu wählen, um die Sortenreinheit und letztlich die Rezyklierbarkeit der Wandbauteile sicherzustellen. Eine entsprechende Kategorisierung und Auswahl von Leichtzuschlägen erfolgte bereits im Forschungsprojekt „Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen“ [19]. Gemäß DIN EN 12620 [38] wird Gesteinskörnung als Leichtzuschlag bezeichnet, wenn die Kornrohichte $\rho_a \leq 2.000 \text{ kg/m}^3$ oder die Schüttdichte $\rho_b \leq 1.200 \text{ kg/m}^3$ betragen. Zudem lassen sich Leichtzuschläge in natürliche (Naturbims, Lavastein, Tuffstein) und industriell hergestellte Zuschläge (Blähton, Blähschiefer, Perlite, Vermiculite, Blähglas, Kesselsand, Hochofenschlacke) unterteilen (Abbildung 18).

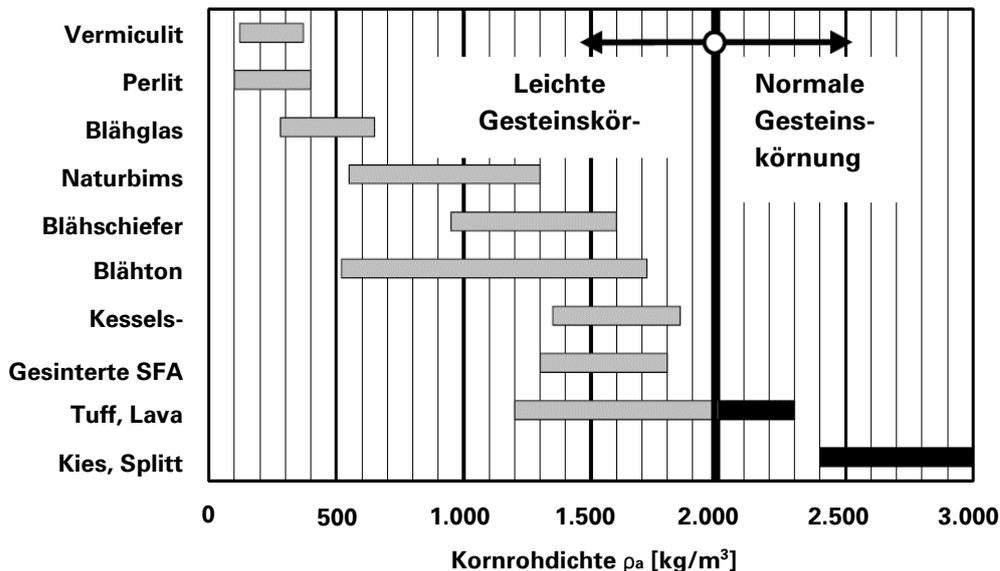


Abbildung 18: Kornrohichte verschiedener Leichtzuschläge [39]

Die Produktion von industriell hergestellten Zuschlägen erfolgt meist bei Temperaturen zwischen 1.100°C und 1.300 °C durch Aufblähung im Drehofen. Dagegen waren natürliche Leichtzuschläge bereits durch vulkanische Aktivität hohen Temperaturen ausgesetzt. Aufgrund der hohen Temperaturen verbrennen oder verdampfen bei beiden Arten bestimmte Anteile der Rohmasse, sodass nach dem Abkühlen eine zellenartige Struktur zurückbleibt. Durch die Wahl des Ausgangsmaterials und der Herstellungstechnik lassen sich die im Forschungsprojekt angestrebten Körnungsbereiche von bis zu 4 mm abdecken. Im Vergleich zur natürlich gewonnenen und gebrochenen Gesteinskörnung bietet das geblähte Granulat (Blähglas und Blähton) den Vorteil, dass die Außenhaut prozessbedingt gesintert und somit wasserresistent ist. Dies hat den Vorteil, dass bei der Herstellung von Leichtbeton auf zusätzliches Anmachwasser verzichtet werden kann und nur der wirksame Teil zur Benetzung des Bindemittels und der Leichtkornoberfläche hinzugegeben werden muss. Dadurch muss nur eine geringe Wassermenge bei der Trocknung entweichen und es können höhere Betonfestigkeiten erzielt werden.

5.3.2 Bereitstellung von Betonen zum Nassspritzen durch die Firma HeidelbergCement (ILEK)

Gemäß dem Anforderungskatalog für die Mischungsentwicklung wurden vom Projektpartner HeidelbergCement zwei Betone mit unterschiedlichen Eigenschaften entwickelt und für das Projekt zur Verfügung gestellt. Die höherfeste Basismischung $MI_{NS}(HC)$ besteht aus Zuschlag mit einem Größtkorn von 4 mm, Spritzbetonzement, Kalksteinmehl sowie Fließmittel und Wasser. Das Erstarrungsverhalten wird durch die Zugabe von Beschleuniger positiv beeinflusst. In den Spritzbetonversuchen im Technikum von HeidelbergCement konnte mit dieser Mischung eine Rohdichte von 2.200 kg/m^3 und eine 1-Tages-Druckfestigkeit von 33 N/mm^2 erreicht werden. Bei der Leichtbetonmischung $MII_{NS}(HC)$ wurde im Gegensatz zur Mischung $MI_{NS}(HC)$ das Gesteinskorn durch den Leichtzuschlag Blähglas ersetzt. Hierbei wurde eine annähernd gleiche Korngrößenverteilung und Sieblinie im Vergleich zu $MI_{NS}(HC)$ gewählt. Bei den Spritzversuchen im Technikum von HeidelbergCement konnte eine gleichmäßige Förderung und Materialauftrag des Leichtbetons sichergestellt werden. Mit dieser Mischung wurde nach der Materialapplikation eine Betonrohichte von 1.200 kg/m^3 und eine 1-Tages-Druckfestigkeit von 14 N/mm^2 erzielt.



Abbildung 19: Sprühstand im Technikum von HeidelbergCement (links) und Sprühprobe der Mischung $MII_{NS,HC}(L)$ (rechts)

5.3.3 Entwicklung wärmedämmender Leichtbetone (IWB)

In den ersten Voruntersuchungen wurde der Fokus auf die leichte Mischung MII gelegt. Ziel war es, eine möglichst hohe volumenspezifische Menge von leichten Gesteinskörnungen einzusetzen. Unterschiedlichste Leichtkornmaterialien wurden verwendet, um die Rohdichte zu minimieren. Zudem wurde aus ökologischen Gründen der Zementgehalt in den Gemischen reduziert. Um eine gute Förderbarkeit sicherzustellen, wurden alle zementreduzierten Leichtbetonmischungen mit einem hohen Anteil an Flugasche hergestellt. Flugasche hat eine nahezu perfekte runde Kornform und ermöglicht dem erhärtenden Beton infolge der sich einstellenden puzzolanischen Reaktion eine stete zeitliche Zunahme der Festigkeit. Die kugelartige Form und die hohe Feinheit der Flugasche sind zudem vorteilhaft für die Pumpförderung im Hinblick auf das Nassspritzverfahren.

In den Voruntersuchungen wurde zudem überprüft, ob sich die Leichtbetone aus den unterschiedlichen Leichtkornmaterialien bezüglich ihrer Verarbeitbarkeit und ihrer Fließeigenschaften unterscheiden. Um den Einfluss des jeweiligen Leichtkornmaterials bewerten zu können, wurde das Wasseraufnahmevermögen der entwickelten Mischungen bestimmt und vergleichend bewertet.

Mit den Gesteinen vulkanischen Ursprungs konnten Rohdichten von 570 kg/m^3 (85 V-% Perlit, $MII_{L,IWB}(P)$), 740 kg/m^3 (81 V-% Bims, haufwerksporig, $MII_{L,IWB}(Bi)$) bzw. 805 kg/m^3 (81 V-% Bims, gefügedicht) erreicht werden. Der Unterschied ist auf die höhere Rohdichte von Bims (ca. 750 kg/m^3) gegenüber der von Perlit (ca. 210 kg/m^3) zurückzuführen. Hinzu kommt die geringere Eigenfestigkeit von Perlit. Dies ist auch der Grund, weshalb Perlit nur in kleineren Korngrößen verfügbar ist. Mit kleineren Korngrößen geht aber auch eine Erhöhung des Zementleimanspruchs einher. Bei Perlit handelt



es sich zudem um ein kantiges Leichtkornmaterial. Die kantige Kornform ist im Hinblick auf die Verarbeitungseigenschaften von Nachteil. Bei beiden Materialien spielt jedoch die Wasseraufnahme der offenenporigen Struktur der leichten Gesteinskörnungen eine große Rolle. Beide Mischungen haben einen Wasserbindemittelwert von 0,81 (Perlit und Bims, haufwerksporig) bzw. 1,02 (Bims, gefügedicht). Im weiteren Verlauf der Untersuchungen konnte ein Wasserbindemittelwert von 0,7 (65 V-% Perlit) erreicht werden. Dazu musste jedoch auf einen Luftporenbildner zurückgegriffen werden, der aus ökologischer Sicht von Nachteil ist. Verwendet man zudem eine Mischung aus Perlit und robustem Blähglas, kann der w/b-Wert auf 0,65 (67 V-% Perlit und Blähglas) reduziert werden. Allerdings muss wegen der geringen Festigkeit von Perlit auf die Anwendung dieser Leichtbetonzusammensetzung beim Nassspritzverfahren verzichtet werden.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Verarbeitung von Aerogelen. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei der Verwendung von Aerogel in Höhe von 21 M-% bezogen auf die Bindemittelmenge eine Trockenrohddichte von ca. 250 kg/m³ erreicht werden kann ($M_{II, IWB}(A)$). Jedoch weist der erhärtete Leichtbeton kaum messbare Festigkeiten auf. Zudem neigt der Leichtbeton zu starker Schwindverformung. Auch hier ist ein Wasserzementwert von mehr als 1 nötig, um eine streichfähige und gefügedichte Struktur zu erhalten. Zudem kommt es zur Entmischung des Aerogelbetons. Um den w/b-Wert zu reduzieren und eine bessere Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, müssen mehrere Maßnahmen ergriffen werden. Zum einen wird eine Beimischung eines formbeständigeren Leichtzuschlags wie Perlit oder Blähglas empfohlen. Andererseits ist auch hier der Einsatz von Luftporenbildner von Vorteil. Zwar sind Luftporen wärmeleittechnisch ungünstiger als Aerogel, der Luftporenbildner erhöht aber die Verarbeitbarkeit des aerogelbasierten Betons. Nichtsdestotrotz ist der Einsatz einer solchen Betonmischung beim Nassspritzen auszuschließen. Aerogel ist ein derart fragiles Leichtkornmaterial, das händisch dem Zementleim untergemischt werden muss. Die Förderung im Pumpschlauch führte auf Grund der hohen Partikelreibung und der daraus resultierenden Zerstörung des Aerogelgranulats am Versuchsstand zu keinem zielführenden Ergebnis für die geprüften Rezepturen.

Die Verarbeitung von Vermiculithen wird ausgeschlossen, da diese durch den Aufblähvorgang bei der Herstellung eine nur sehr geringe Festigkeit aufweisen und somit nur bedingt verarbeitet werden können. Infolge der leichten Schädigung können die Bruchstücke des leichten Kornmaterials einen sehr hohen Wasseranspruch besitzen.

Erfolgversprechender ist die Verwendung von Blähglas. Bei einem Wasserzementwert von 0,63 und einem volumenspezifischen Einsatz von 85 V-% Blähglas werden Rohdichten zwischen 550 kg/m³ und 750 kg/m³ erreicht (vgl. Tab. 5-3 bis 5-5). Der Wert der Dichte ist abhängig vom Einsatz und der Wirksamkeit von Luftporenbildnern. Der große Vorteil von Blähglas ist die Oberfläche der einzelnen Partikel. Diese ist durch den Herstellungsprozess geschlossen, wodurch die Wasseraufnahme praktisch ausgeschlossen werden kann. Zudem weist Blähglas die größte Festigkeit im Vergleich zu den anderen vorgestellten Materialien auf. Hierdurch lassen sich Festigkeitswerte von mehr als 8 N/mm² bei einer Dichte von 750 kg/m³ erreichen.

Auf die Untersuchung von Blähthon wurde aufgrund der Ähnlichkeit zu Blähglas bisher verzichtet. Grundsätzlich ist die Rohddichte von Blähglas geringer als die von Blähthon, so dass in den weiteren Untersuchungen die Verwendung von Blähglas als zielführender erachtet wird.



Tabelle 5-3: Entwickelte Leichtbetone und deren Eigenschaften

MII _{L,IWB} (P) (Perlit)	MII _{L,IWB} (Bi) (Bims)	MII _{L,IWB} (A) (Aerogel)	MII _{L,IWB} (L) (Blähglas)
85 M% Perlit 15 M% Bindemittel	81 M% Bims 19 M% Bindemittel	81 M% Bims 19 M% Bindemittel	85 M% Blähglas 15 M% Bindemittel
w/z-Wert: 0,81	w/z-Wert: 0,81	w/z-Wert: > 1,0	w/z-Wert: 0,63
Rohdichte 570 kg/m ³	Rohdichte 750 kg/m ³	Rohdichte 250 kg/m ³	Rohdichte 550 kg/m ³
			

Tabelle 5-4: Verbesserte, im Labor entwickelte Leichtbetone verschiedener Zuschläge und deren Eigenschaften

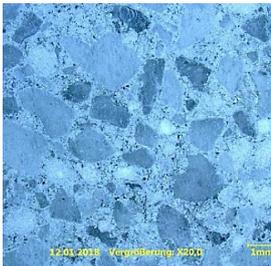
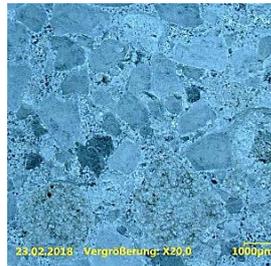
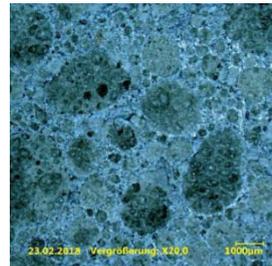
MII _{L,IWB} (PL) (Perlit-Blähglas)	MII _{L,IWB} (AP) (Aerogel-Perlit)	MII _{L,IWB} (AL) (Aerogel-Blähglas)	MII _{L,IWB} (L)-1 (Blähglas)
67 V-% Perlit-Blähglas 33 V-% Bindemittel	45 V-% Aerogel 22 V-% Perlit 33 V-% Bindemittel	53 V-% Aerogel 15 V-% Blähglas 32 V-% Bindemittel	65 V-% Blähglas 35 MV-% Bindemittel
w/b-Wert: 0,65	w/b-Wert: 0,72	w/b-Wert: 0,66	w/b-Wert: 0,65
0,6 M-% Luftporenbildner [bzgl. BM]	1 M-% Luftporenbildner [bzgl. BM]	1 M-% Luftporenbildner [bzgl. BM]	kein Luftporenbildner
Rohdichte, ofentrocken 596 kg/m ³	Rohdichte, ofentrocken 475 kg/m ³	Rohdichte, ofentrocken 481 kg/m ³	Rohdichte, ofentrocken 618 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit 0,158 W/mK	Wärmeleitfähigkeit 0,0899 W/mK	Wärmeleitfähigkeit 0,0978 W/mK	Wärmeleitfähigkeit 0,168 W/mK
Druckfestigkeit -	Druckfestigkeit 2 N/mm ²	Druckfestigkeit 1,7 N/mm ²	Druckfestigkeit 9,7 N/mm ²
Verarbeitbarkeit Gießen	Verarbeitbarkeit Gießen	Verarbeitbarkeit Gießen	Verarbeitbarkeit Gießen, Nassspritzen
			



Tabelle 5-3 stellt vergleichend den anfänglichen Entwicklungsstand der leichten Mischungen mit verschiedenen leichten Gesteinskörnungen dar. Diese dienten als Basis für die weitere Mischungsentwicklung. In Tabelle 5-4 sind einige dieser weiterentwickelten Mischungen dargestellt. Die vier Mischungen zeigen, dass sich nur die Mischung MII_{L,IWB(L)} mit Blähglas als Leichtzuschlag für das Nassspritzen eignet. Dies hat vor allem mit den Festigkeitseigenschaften des Gesteinskorns zu tun, die sich auch in der Druckfestigkeit des Betons widerspiegeln. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Mischungsentwicklung auf Basis des Leichtkornmaterials „Blähglas“ fortzusetzen. Neben den betontechnologischen Eigenschaften haben auch verfahrenstechnische Eigenschaften einen Einfluss auf den Werkstoff und dessen Rohdichte. Folglich müssen die verfahrenstechnischen Einflüsse im nächsten Schritt berücksichtigt werden. Tabelle 5-5 stellt den weiteren Verlauf der Mischungsentwicklung mit Blähglas dar und setzt diese in Zusammenhang mit der ursprünglichen MII-Blähglas-Mischung und mit der Mischung, die schlussendlich beim Spritzroboter eingesetzt wird. Die ausführliche Beschreibung der Mischungsentwicklung, die in Kombination mit der Anlagentechnik einhergeht, erfolgt im Kapiteln Anpassung der Betonmischungen 6.2.1 und 6.2.2.

Tabelle 5-5: Laborweiterentwicklung der Mischung MII_{L,IWB(L)} mit dem Zuschlag Blähglas und Vergleich mit der am Versuchsstand verwendeten Mischungen MII_{NS,IWB(L)}, die die tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort berücksichtigt

MII _{L,IWB(L)} -1	MII _{L,IWB(L)} -2	MII _{L,IWB(L)} -3	MII _{NS,IWB(L)}
65 V-% Blähglas 35 V-% Bindemittel	67 V-% Blähglas 33 V-% Bindemittel	57 V-% Blähglas 43 V-% Bindemittel	62 V-% Blähglas 38 V-% Bindemittel
w/b-Wert 0,65	w/b-Wert 0,65	w/b-Wert 0,48	w/b-Wert 0,65
Ohne Luftporenbildner Größtkorn 4 mm	Mit Luftporenbildner Größtkorn 4 mm	Mit Luftporenbildner Größtkorn 1 mm	Mit Luftporenbildner Größtkorn 4 mm
Rohdichte, ofentrocken $\rho = 618 \text{ kg/m}^3$	Rohdichte, ofentrocken $\rho = 581 \text{ kg/m}^3$	Rohdichte, ofentrocken $\rho = 867 \text{ kg/m}^3$	Rohdichte, ofentrocken $\rho = 784 \text{ kg/m}^3$ (vorher) $\rho = 953 \text{ kg/m}^3$ (nachher)
Wärmeleitfähigkeit nach Pumpen 0,2373 W/mK	Wärmeleitfähigkeit nach Pumpen 0,1679 W/mK	Wärmeleitfähigkeit nach Pumpen 0,2728 W/mK	Wärmeleitfähigkeit nach Pumpen 0,2632 W/mK ^(*)
Schlechte Pumpbarkeit und Kornbruch ($\Delta\rho = +33,4 \%$)	Mittelmäßige Pumpbarkeit und Kornbruch ($\Delta\rho = +14,4 \%$)	Bessere Pumpbarkeit und kaum Kornbruch ($\Delta\rho = +2,2 \%$)	Gute Pumpbarkeit, kaum Kornbruch ($\Delta\rho = +17,7 \%$)

^(*) Ermittelt nach Nanogramm aus [40]

Ein weiterer Ansatz für die Herstellung von gradierten Wandbauteilen mit einem wärmedämmenden Innenkern wäre der kombinierte Einsatz moderner Betonschäume mit gespritzten Wandschalen. Wie die Dissertation von [41] aufzeigt, sind Dichten von unter 400 kg/m^3 mit Schaumbetonen, bezeichnet als Mineralschaum, erreichbar. Mit Rohdichten von unter 250 kg/m^3 sind vermutlich die gewünschten Wärmeleitfähigkeiten von unter $0,075 \text{ W/mK}$ erreichbar (Abbildung 20). Allerdings zeigen Festigkeitsuntersuchungen an Mineralschäumen eine geringe Druckfestigkeit (Abbildung 20). Der direkte Spritzauftrag eines wärmedämmenden Mineralschaumbetons lässt sich daher weitestgehend ausschließen. Bei den Voruntersuchungen wurde ein Zementschaum getestet, mit dem mineralisierte Schäume mit Rohdichten zwischen 195 und 205 kg/m^3 erzielt werden konnten. Diese Mineralschäume erwiesen sich jedoch als sehr porös (Abbildung 21, links). Selbst leichte Berührungen führten häufig zu Fehlstellen und zum Abbruch bzw. zur Schädigung des erhärteten Materials.

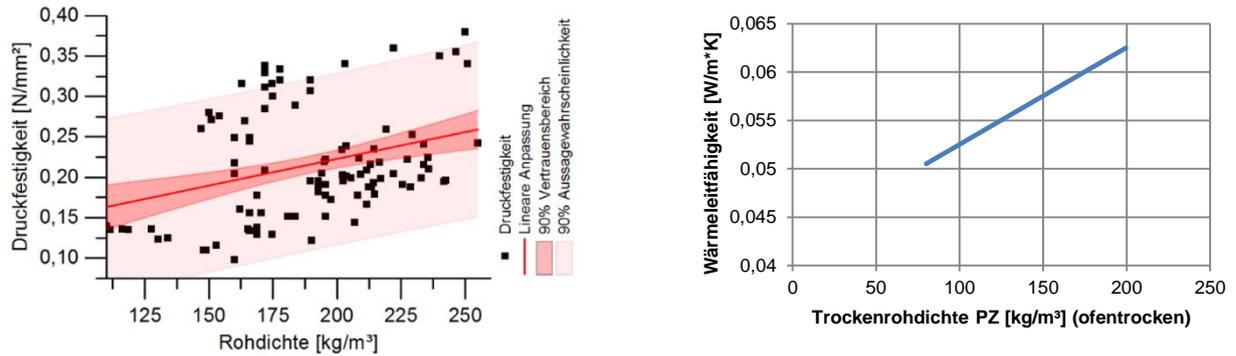


Abbildung 20: Verhältnis zwischen Druckfestigkeit und Trockenrohddichte mineralisierter Schäum [41] (links); Erwartungswerte für die Wärmeleitfähigkeit von ofentrockenen Mineralschäumen [42] (rechts).

Ein direkter Spritzauftrag der Betonmischung MI auf einen zuvor aufgetragenen Mineralschaum kann demzufolge ausgeschlossen werden. Um den Prozessverlauf von Herstellung der äußeren Schalen und dem nachfolgenden Befüllen der Kernschicht mit Mineralschaum zu simulieren, wurden mit der Mischung MI Hohlzylinder hergestellt. Anschließend wurden die Zylinder nach dem Aushärten mit drei verschiedenen Schäumen befüllt. Nach sieben Tagen wurden die quasi zweischichtigen Zylinder visuell untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die drei Innenkerne aus mineralisiertem Schaum der hergestellten Probekörper allesamt zusammengefallen sind (Abbildung 21, rechts). Für dieses Verhalten können mehrere Gründe benannt werden. Zum einem kann angenommen werden, dass der Schaum nicht hinreichend im Kern verteilt wurde, so dass die Einfüllmenge für das vollständige Verfüllen des Hohlvolumens zu gering war. Des Weiteren kann während des Transports der mit Schaum gefüllten Hohlzylinder zum Klimaraum, wo der Schaum aushärten sollte, das instabile und filigrane Gefüge des Schaumes zusammengefallen sein. Ein dritter Grund kann im hohen Schwindbestreben des mineralisierenden Schaumes liegen. Es ist davon auszugehen, dass eine Kombination der drei möglichen Beanspruchungen zum Einfallen des Schaumes führte. Über die Stabilität im Verlaufe der Erhärtung muss der mineralisierte Schaum auch einen guten Verbund zur Zylinderschale erreichen. Hierzu könnte beispielweise die innenseitige Schalenoberfläche des Zylinders aufgeraut werden. Zum jetzigen Entwicklungsstand eignet sich der am IWB entwickelte mineralisierte Schaum aber noch nicht für die Anwendung in multifunktionalen Wandelementen. Die Entwicklung von mineralisierten Schäumen stellt dennoch eine spannende, zukünftige Forschungsaufgabe dar. Hierbei müsste eine Schaumzusammensetzung herausgearbeitet werden, die eine hinreichende Festigkeit und ein minimales Schwinden sicherstellt, um als Material für eine ökologisch attraktive Dämmschicht mit sehr guter Recyclingfähigkeit in multifunktionalen Wandelemente genutzt werden zu können.



Abbildung 21: Balken aus porösem mineralisiertem Schaum (links); Hohlzylinder mit eingefallener Schaumfüllung (rechts).

5.4 Bewehrungstechnologie (ILEK)

5.4.1 Auswahl der Bewehrung

Bei Wänden handelt es sich um Bauteile, die überwiegend auf Druck beansprucht sind und nur untergeordnete Biegebeanspruchungen infolge Windbelastung, exzentrischer Lasteinleitung oder Auswirkungen aus Theorie II. Ordnung besitzen. Die aus der Beanspruchung resultierenden Zugkräfte sind daher als betragsmäßig gering einzuschätzen. Aus diesem Grund eignen sich insbesondere textile Bewehrungen aus Carbon-, alkalibeständigen Glas- oder Basaltfasern für den Einsatz. Diese technischen Textilien werden aus Rovings hergestellt, wobei die Anzahl an Filamenten je Roving stark variieren kann. Zudem sind unterschiedliche Maschenwinkel bei textilen Gelegen herstellbar, um die Eigenschaften der Bewehrung auf die Beanspruchung anzupassen. Mit der Verwendung von hochfesten Faser-materialien können gegenüber Stahlbewehrungen geringere Querschnitte zur Aufnahme der Zugbeanspruchung ausgebildet werden. Ein weiterer Vorteil ist die nicht vorhandene Korrosionsanfälligkeit des Bewehrungsmaterials, wodurch auf übermäßige Betondeckungen, die lediglich zum Korrosionsschutz bei Stahlbewehrungen notwendig sind, verzichtet werden kann. Für die Untersuchungen wurden die in Tabelle 5-6 aufgelisteten, ebenen Bewehrungen gewählt. Diese weisen einen ausreichenden Bewehrungsgehalt auf, um die zu erwartenden Zugkräfte abzutragen. Zudem werden durch das feinmaschige Gitter die Rissbreiten beschränkt und die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils sichergestellt.

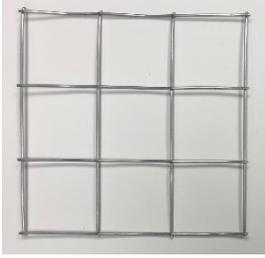
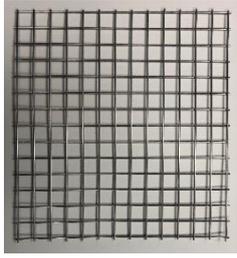
Tabelle 5-6: Gewählte textile Bewehrung von der Firma solidian

Bezeichnung	Q85/85-CCE-21	Q142/142-CCE-38	Q145/145-AAE-25
Muster			
Fasermaterial	Carbon	Carbon	AR-Glas
Tränkung	Epoxidharz	Epoxidharz	Epoxidharz
Achsabstand [mm]	21	38	25
Faserquerschnitt [mm ²]	1,81	5,42	3,69
Bewehrungsfläche [mm ² /m]	85	142	145

Neben Bewehrungen aus Fasermaterialien können auch Mikrobewehrungen aus Edelstahl eingesetzt werden (Tabelle 5-7). Eine Mikrobewehrung besteht zumeist aus einem geschweißten Gitter aus Drähten (0,1 – 5,0 mm) mit Maschenweiten von 10 bis 50 mm [43]–[45]. Der Aufbau kann individuell an die Beanspruchung angepasst werden. Durch die Verwendung von Edelstahl wird eine hohe Korrosionsbeständigkeit bei einer derzeit noch verbesserten Rezyklierfähigkeit gegenüber nicht metallischer Faserverbundbewehrung erreicht.



Tabelle 5-7: Gewählte Mikrobewehrung

Bezeichnung	50/2-1.4301	25/2-1.4301	10/1,2-1.4301
Muster			
Werkstoff	Edelstahl (1.4301)	Edelstahl (1.4301)	Edelstahl (1.4301)
Achsabstand [mm]	50	25	10
Drahtdurchmesser [mm]	2,0	2,0	1,2
Bewehrungsfläche [mm ² /m]	63	126	113

5.4.2 Bewehrungssysteme

Der Verbund der beiden äußeren Deckschichten kann einerseits über die Gradierung der Betone im Kern sichergestellt werden, sodass lediglich eine ebene Bewehrung in den Deckschichten zu verlegen wäre. Andererseits können die Deckschichten durch ein schubsteifes Bewehrungssystem dauerhaft miteinander verbunden werden. Hierzu müssen die beiden ebenen Bewehrungslagen über eine Schubbewehrung fixiert werden. Der Projektpartner solidian GmbH bietet hierzu entsprechende Formbewehrungen an. Gewählt wurden die in Abbildung 22 dargestellten U- und TZ-Profile für weitere Untersuchungen.

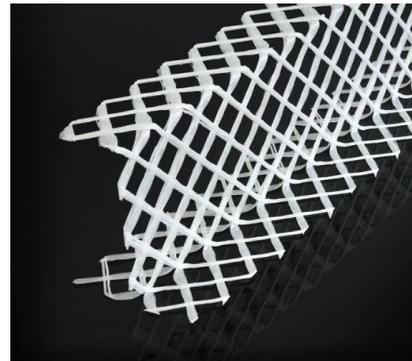
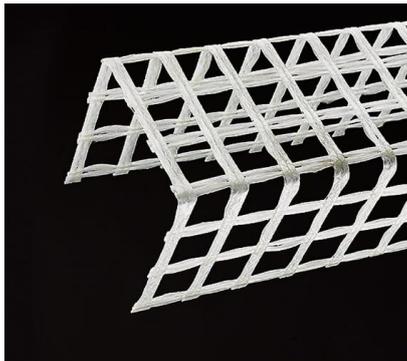


Abbildung 22: U-Profil (links) und TZ-Profil (rechts) als Schubbewehrung (Quelle: Solidian)

Die Herstellung des Bewehrungssystems und des Bauteils in Gänze kann in Abhängigkeit des gewählten Fertigungsverfahrens in unterschiedlichen Vorfertigungs- und Automatisierungsgraden durchgeführt werden. Abbildung 23 (links) stellt das halbfertige Bewehrungssystem (Variante 1) bestehend aus einer Deckschichtbewehrung und einer daran befestigten U-förmigen Schubbewehrung dar. Die zweite Bewehrungslage der Deckschicht wird während der Bauteilfertigung in einem zusätzlichen Arbeitsschritt mit der Schubbewehrung verbunden. Eine vollständige Vorfertigung der Bewehrung (Variante 2) ist auch möglich, wie sie am Beispiel in Abbildung 23 (rechts) zu sehen ist. Das Bewehrungssystem besteht aus zwei Deckschichtbewehrungen vom Typ Q142/142-CCE-38, welche mit TZ-Profilen schubsteif verbunden sind.

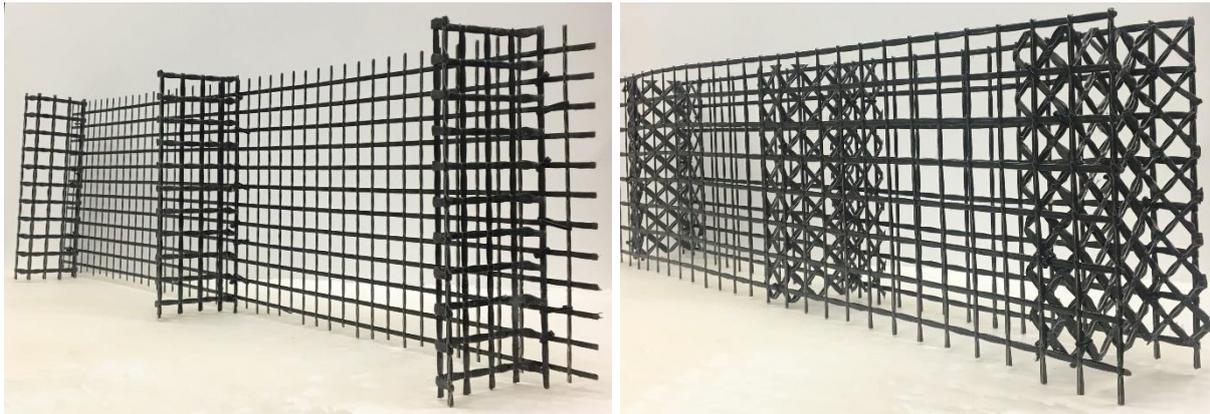


Abbildung 23: Unterschiedliche Vorfertigungsgrade des Bewehrungssystems

6 Weiterentwicklung des automatisierten Herstellungsverfahrens (AP 2)

6.1 Analyse bestehender Herstellungstechnologien und Auswahl geeigneter Verfahren (ISYS/ILEK)

Zur Herstellung von gradierten, multifunktionalen Wandbauteilen stehen drei verschiedene Fertigungsansätze zur Auswahl: das Trockenspritzen, das Nassspritzen und das Gießen. Ein direkter Vergleich der Eigenschaften dieser Verfahren ist in Tabelle 6-1 dargestellt und wird nachfolgend genauer erläutert. Beim Trockenspritzen sind mit den aktuellen Mischungen Rohdichten von 1.100 bis 2.300 kg/m³ erreichbar. Die Komplexität von den Rezepturen ist relativ gering. Durch eine Wahl einer gleichmäßigen Korngrößenverteilung konnte einer Entmischung während der pneumatischen Flugförderung entgegen gewirkt werden. Aufgrund der hohen Austrittsgeschwindigkeit des Betons an der Düse ist die anfallende Rückprallmenge im Vergleich zum Nassspritzen relativ hoch. Als Rückprall werden Partikel bezeichnet, die beim Materialauftrag nicht im Zementleim gebunden werden können und sich lose in der näheren Umgebung anhäufen. Leichtzuschläge sind in dieser Hinsicht besonders problematisch, da sie aufgrund der geringen Dichte stärker beschleunigt werden, weshalb sie an der Auftragsfläche nicht ausreichend haften und abprallen. Der Reinigungsaufwand des Gesamtprozesses ist beim Trockenspritzen relativ gering, da die Partikel den größten Teil der Förderstrecke ohne Zugabe von Wasser transportiert werden und noch kein Hydratationsprozess zwischen Zement und Wasser eingeleitet wird. Materialablagerungen sind in der Regel innerhalb der Förderleitung erst ab der Benetzungsstelle kurz vor der Düse zu erwarten. Ein automatisierter Betrieb des Trockenspritzverfahrens ist am prototypischen Versuchstand implementiert. Die Herstellung von Bauteilen erfolgt schichtweise. Ökologisch betrachtet sind der hohe Zementgehalt in den Basismischungen und der hohe Verbrauch von Druckluft zur Gewährleistung einer kontinuierlichen Materialförderung nachteilig zu bewerten. Im Hinblick auf die Herstellung gradiertter Wandbauteile mit u.U. extrem porösen und wenig widerstandsfähigen Kernzonen aus Leichtbeton offenbaren sich weitere Nachteile des Verfahrens. Aufgrund der hohen Verdichtungsenergie beim Trockenspritzen werden die erwünschten Porositäten und Luftkammern im Bereich der wärmedämmenden Zonen mit Leichtbeton komprimiert. Zudem können Suspensionen, Mineralschäume und bspw. Aerogel nicht zerstörungsfrei gefördert und appliziert werden. Daher ist dieses Herstellungsverfahren lediglich für äußere Deckschichten der Wandbauteile aus hochfestem Beton zu empfehlen. Beim schichtweisen Aufbau des liegenden Wandelements ergibt sich beim Auftrag der oberen Deckschicht die weitere Problematik der hohen Prozesskräfte, die zu einer unerwünschten Verdichtung bzw. zur Zerstörung von porösen Strukturen in den Kernzonen der Wandbauteile führen können.



Das Nassspritzen weist im Vergleich zum Trockenspritzen einige Vorteile für eine Automatisierungslösung auf. Zum einen sind die Möglichkeiten zur Verwendung von zementreduzierten, ökologisch optimierten Betonrezepturen größer. Zum anderen ist der Bedarf an Druckluft deutlich geringer, da die Förderung druckbasiert erfolgt. Lediglich die Zerstäubung des Frischbetonstroms an der Düse sowie das mögliche Eindüsen eines Erstarrungsbeschleunigers erfolgen pneumatisch. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Menge des anfallenden prozessbedingten Rückprallmaterials aus. Die Verfahrenstechnik stellt jedoch hohe Ansprüche an die Frischbetoneigenschaften, was zu einer deutlich komplexeren Mischungsentwicklung führt. Der erzielbare Bereich der Frischbetonrohddichten lag bei Projektbeginn bei 1.500-2.300 kg/m³. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass jedoch bei diesem Verfahren mit der vorliegenden Anlagentechnik Mineralschäume und Aerogel nicht zerstörungsfrei förderbar sind. Beim druckbasierten Fördern des Frischbetons werden die porösen Strukturen zwischen Schnecke und Schneckenmantel in den Nassspritzmaschinen irreversibel aufgebrochen und die hohen Drücke innerhalb der Förderstrecke verhindern einen unbeschädigten Materialtransport. Im Vergleich zum Trockenspritzen ist der Reinigungsaufwand hoch, da in jedem Abschnitt der Förderung Frischbeton eingesetzt wird. Dieser kann sich ablagern und erstarren, was zu unerwünschten Verengungen innerhalb der Förderleitung und damit zu einem erhöhten Risiko von Blockaden führen kann. Eine vollständige Reinigung der gesamten Anlage nach jeder Versuchsdurchführung ist unumgänglich. Hinsichtlich der automatisierten Herstellung gradiert Wandbauteile wird dem Nassspritzverfahren gegenüber dem Trockenspritzverfahren ein deutlich größeres Potential beigemessen. Mit einer geeigneten Betonrezeptur können die hochfesten Deckschichten der Wandbauteile erstellt werden. In welcher Form eine zerstörungsfreie Applikation der oberen Deckschicht auf eine hochporöse Kernschicht erfolgen kann, bleibt in den Untersuchungen zu ermitteln. In der Verwendung einer Leichtbetonmischung ohne Aerogel oder Schaumstrukturen für die Herstellung der hochporösen Kernzone bzw. der gradierten Übergangszonen wird weiteres Potential gesehen.

Beim Gießen kann ein umfassender Rohdichtebereich von 300-2.300 kg/m³ abgedeckt werden. Für die Herstellung gradiert Wandbauteile wird das Verfahren in diesem Projekt nur als sekundäre Option nach dem Nassspritzen bzw. eventuell in Kombination mit dem Nassspritzen verfolgt. Der Versuchstand ist auf die automatisierte Herstellung mit Spritzbeton und nicht für das Gießen ausgelegt. Der große Vorteil beim Gießen ist die Herstellung von hochporösen, wärmedämmenden Kernschichten infolge sehr niedriger Rohdichtebereich, die prozessbedingt erreicht werden kann. In Abhängigkeit der Betonrezeptur muss in einem zusätzlichen Arbeitsschritt die nachträgliche Verdichtung des Betons erfolgen, da diese nicht während des Materialauftrags erfolgen kann. Dies erhöht beim Gießverfahren die Gefahr von Delaminationen zwischen einzelnen Bauteilschichten im Vergleich zum Spritzbeton.

Tabelle 6-1: Vergleich der Eigenschaften möglicher Herstellungsverfahren.

Parameter	Gießen	Trockenspritzen	Nassspritzen
Dichtebereich	300-2.300 kg/m ³	1.100-2.300 kg/m ³	1.500-2.200 kg/m ³
Benötigte Mischungen	> 2	Mind. 2	Mind. 2
Anforderungen an die Mischungsentwicklung	Mittel	Gering	Hoch
Betonqualität	Hoch	Mittel	Hoch
Automatisierungsgrad	Nicht vorhanden	Vorhanden	Vorhanden
Wartungsaufwand des Fertigungsverfahrens	Mittel	Gering	Hoch
Eignung für Herstellung gradiert Wandbauteile	Vorteilhaft	Nachteilig	Vorteilhaft



Nach Analyse der Vor- und Nachteile der jeweiligen Fertigungsverfahren für die Herstellung multifunktionaler Wandbauteile wird das Trockenspritzen aufgrund der aufgeführten Argumente zurückgestellt. Der Forschungsfokus wird auf die Weiterentwicklung des Nassspritzverfahrens gelegt, da nach Meinung der Forschergruppe hier das größte Potential für eine automatisierte Vorfertigung der Wandbauteile vorhanden ist. Das Gießen wird als Ausweichlösung angesehen, falls mit dem Nassspritzen nicht in den abgezielten niedrigen Rohdichtebereich vorgedrungen werden kann.

6.2 Weiterentwicklung des Nassspritzverfahrens (ISYS/IWB)

6.2.1 Anpassung der Betonmischungen

Die am Versuchsstand zur Verfügung stehende Verfahrenstechnik stellt hohe Anforderungen an die Mischungsentwicklung. Der Beton muss die Förderleitung und Spritzdüse möglichst vollständig und homogen durchfließen können. Zudem ist ein Mindestmaß an Fließfähigkeit notwendig, um ein effizientes Ansaugen der Förderpumpe zu gewährleisten. Jedoch darf diese auch nicht zu hoch sein, um eine ausreichende Frühfestigkeit des Frischbetons beim Materialauftrag sicherzustellen. Der Frischbeton darf sich nicht zu stark durch die hohe Einwirkung von Scherkräften im Bereich der Förderschnecke sowie durch Reibung an den Förderleitungswänden entmischen. Die radiale und laterale Kornverschiebung durch genau diese Scherkräfte ist auf ein Minimum zu reduzieren. Eine ausreichende Schmierung der Förderleitung mit einer Zementlösung unterstützt die Ausbildung eines sogenannten Schmierfilms. Dieser sorgt für eine reibungsärmere Förderung. Über die Anpassung der Sieblinie und des Betongefüges kann die Robustheit gegenüber Kornverschiebung erhöht werden und zu starkes Sedimentieren von schwereren Betonbestandteilen vermieden werden. Dies war ein zentraler Aspekt der Mischungsentwicklung und -anpassung auf die Gegebenheiten am Versuchsstand, sodass die entwickelten Betonrezepturen am Versuchsstand einsetzbar sind.

Der Verlauf der Mischungsentwicklung für die Normalbeton-Rezeptur $MI_{NS(IWB)}$ und die Leichtbeton-Rezeptur $MI_{LS(IWB)}$ ist schematisch in Abbildung 24 dargestellt. Bei der Mischung MI wurde ausgehend von der unter Laborbedingungen entwickelten Rezeptur ($MI_{NS(IWB)-1}$) zunächst ein Stabilisator ergänzt ($MI_{NS(IWB)-2}$). Dieser verbessert das Wasserrückhaltevermögen und steigert die Kohäsion in der Betonmischung. Somit wird unerwünschter Entmischung und Betonbluten entgegengewirkt und die Mischung wird stabiler und homogener. Jedoch war der verwendete Stabilisator nach einiger Zeit nicht mehr verfügbar, so dass auf ein alternatives Produkt eines anderen Herstellers gewechselt werden musste ($MI_{NS(IWB)-3}$). Zuletzt fand noch eine Optimierung der Rezeptur unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten statt, bei der die verwendete Menge an Fließmittel und Stabilisator reduziert und durch eine leichte Erhöhung des Wassergehalts ausgeglichen wurde ($MI_{NS(IWB)-3.1}$). Diese Rezeptur erfüllt alle geforderten Eigenschaften des Anforderungskatalogs. Den Anforderungen der Verfahrenstechnik wie Pumpbarkeit, Stabilität und Robustheit gegenüber schwankenden Umweltbedingungen genügt der entwickelte Beton ebenfalls. Die erreichte Rohdichte liegt bei etwa 2.200 kg/m^3 . Die Druckfestigkeit an Mörtelprismen liegt nach sieben Tagen bei bereits 69 N/mm^2 und die Biegezugfestigkeit bei etwa 11 N/mm^2 . Da Flugasche in der Rezeptur enthalten ist, steigen die Werte für Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28 Tagen Lagerung nochmals weiter an auf 90 N/mm^2 (siehe Tabelle 6-2).



Tabelle 6-2: Anpassung der Rezepturen aus den Laborversuchen MI_{NS}(IWB)-1.0 und MII_{NS}(IWB)-1.0 auf die Erfordernisse der Verfahrenstechnik und Bedingungen am Versuchsstand für das Nassspritzen.

Rezeptur	MI _{NS} (IWB)-1.0	MI _{NS} (IWB)-3.1	MII _{NS} (IWB)-1.0	MII _{NS} (IWB)-4.2
Zusammensetzung	58,5 V-% Sand 41,5 V-% Bindemittel	56,0 V-% Sand 44,0 V-% Bindemittel	65,0 V-% Sand 35,0 V-% Bindemittel	62,0 V-% Sand 38,0 V-% Bindemittel
w/b-Wert	0,425	0,460	0,650	0,650
LPB	-	-	-	0,4 M-%
Rohdichte (ofentrocken)	2.381 kg/m ³	2.133 kg/m ³ (v.Pumpen) 2.205 kg/m ³ (n.Pumpen)	618 kg/m ³	784 kg/m ³ (v. Pumpen) 953 kg/m ³ (n. Pumpen)
Wärmeleitfähigkeit	-	-	0,168 W/mK	0,330 W/mK
Druckfestigkeit	66,7 N/mm ² (28d)	69,0 N/mm ² (7d) 90,0 N/mm ² (28d)	9,7 N/mm ² (28d)	19,5 N/mm ² (7d) 26,2 N/mm ² (28d)

Die Entwicklung und Anpassung der Leichtbetonrezeptur MII_{NS}(IWB) mit dem Blähglas Liaver als Leichtzuschlag stellte sich als deutlich komplexer und aufwändiger heraus als ursprünglich angenommen. Nicht nur Entmischung und Robustheit gegenüber den Umwelteinflüssen gilt es hier zu beachten. Die Problematik des Kornbruchs bei der druckbasierten Dichtstromförderung sowie die unerwünschte Verdichtung des Leichtbetongefüges kommen erschwerend hinzu. Letzterem kann unter anderem auch durch die Anpassung der Verfahrenstechnik begegnet werden, wie im nachfolgenden Abschnitt genauer erläutert wird. Bei der Mischungsentwicklung wurde ebenfalls mit einer im Labor erprobten Rezeptur (MI_{NS}(IWB)-1) begonnen. Durch die Hinzunahme eines Stabilisators (MI_{NS}(IWB)-2) sowie der Reduktion von Wasser (MI_{NS}(IWB)-2.1) und Fließmittel (MI_{NS}(IWB)-2.2) konnten die Stabilitäts- und Robustheitseigenschaften des Leichtbetons verbessert werden. Auch hier musste der Stabilisator ausgewechselt werden (MI_{NS}(IWB)-3). Durch die Ergänzung eines Luftporenbildners gelang es die Rohdichte des Betons weiter zu reduzieren. Die Erhöhung der Anteile von Wasser und Luftporenbildner (MI_{NS}(IWB)-3.1) sowie die Reduktion von Fließmittel (MI_{NS}(IWB)-3.2) erzielten eine weitere Reduktion der Rohdichte und eine bessere Verarbeitbarkeit. Mit einer Anpassung der Mengenverhältnisse der Ausgangsstoffe (Zement, Flugasche, Silika und Liaver der Körnung 0,25-1 mm) und der Hinzunahme von größerer Blähglaskörnung (1 - 4 mm) erhoffte man sich ein besseres Körnungsgefüge (MI_{NS}(IWB)-4). Eine weitere Abnahme der Rohdichte war die Folge. Eine Optimierung der Rezeptur unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten erfolgte ebenfalls durch Reduktion der verwendeten Mengen an Fließmittel und Zement (MI_{NS}(IWB)-4.1). Eine kleinere Substitution von Wasser durch Fließmittel führte zur finalen Mischungsrezeptur (MI_{NS}(IWB)-4.2). Eine weitere Erhöhung des Luftporenbildners führte zu keiner Verbesserung (MI_{NS}(IWB)-4.3). Die finale Rohdichte liegt bei etwa 1.100 kg/m³ nach dem Ausschalen und bei 953 kg/m³ im ofengetrockneten Zustand. Bei der ursprünglichen Rezeptur ergaben sich Rohdichten von 1.500-1.600 kg/m³ nach dem Pumpvorgang. Nach Lagerung und Prüfung der Probeprismen ergaben sich eine Betondruckfestigkeit von 19,5 N/mm² sowie eine Biegezugfestigkeit von 2 N/mm² nach sieben Tagen. Nach 28 tägiger Lagerung stieg die Druckfestigkeit beeinflusst durch die Eigenschaften der enthaltenen Flugasche nochmals an auf 26,2 N/mm² (siehe Tabelle 6-2).

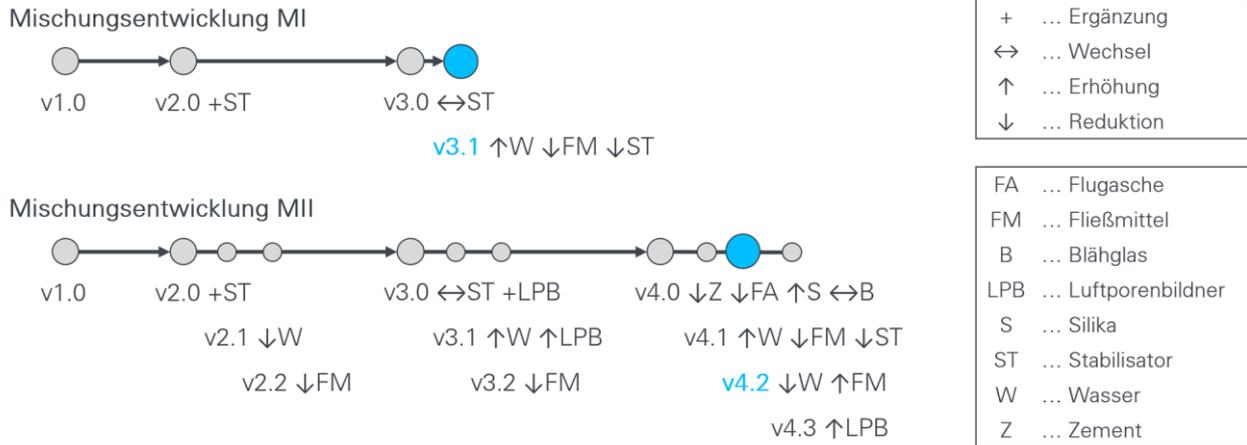


Abbildung 24: Verlauf der Mischungsentwicklung für die beiden Nassspritzbetone MI_{ns}(IWB) und MI_{ns}(IWB)

6.2.2 Anpassung der Betonverfahrenstechnik

Neben den Mischungsparametern wurde auch iterativ die Verfahrenstechnik angepasst, da diese maßgebenden Einfluss auf die Eigenschaften und die Qualität des Betons haben. Zunächst musste von dem leistungsfähigeren Labor-Zwangsmischer vom Typ CEM 60S ELBA der Firma Amman Elba Beton GmbH (Abbildung 25) auf den am Versuchsstand zur Verfügung stehenden Zwangsmischer vom Typ WM Jetmix 125 der Firma Werner Mader GmbH (Abbildung 25) umgestellt werden. Dies hatte eine systematische Anpassung der Mischregime für beide Betonmischungen MI und MII über mehrere Versuchsreihen zur Folge. Die Mischzeiten sowie die Reihenfolge der Zugabe der Inhaltsstoffe haben dabei großen Einfluss auf die Betonqualität. Die andere Bauform und Beschaffenheit der Mischwerkzeuge in Kombination mit einem weniger leistungsfähigen Antrieb führen zu einer Erschwerung eines vergleichbar guten Aufschlusses der Feinststoffe am Versuchsstand.

Für die Verdichtung und den Kornbruch, die beide die Eigenschaften des zu fördernden Leichtbetons negativ beeinflussen, sind maßgeblich die Schneckeneinheit der Schneckenpumpe sowie die Beschaffenheit der Förderleitung verantwortlich. Im Vergleich zu einer ebenfalls getesteten Leichtbetonrezeptur des Industriepartners HeidelbergCement verfügt die am IWB entwickelte Mischung MII aus ökologischen Gründen über eine geringere Menge an Zement. Dies hat jedoch zur Folge, dass die Leichtzuschläge im direkten Vergleich weniger gut von Zementleim ummantelt und dadurch vor hoher Scherbelastung geschützt werden. Vermehrter Kornbruch ist das Resultat. Um diesen auf ein Minimum zu reduzieren, wurden drei Konfigurationen der Schneckeneinheit untersucht. Für die Schneckenpumpe vom Typ WM Variojet FU bietet die Firma Werner Mader GmbH einen großen Schneckenmantel KP45 für die Förderung eines Größtkorns von 8 mm an. Alternativ gibt es die beiden kleineren Schneckenmäntel KP20+ sowie eine wassergekühlte Variante (KP20w) für ein Größtkorn von 4 mm (Abbildung 25). Diese verfügen über eine kleinere Schnecke und eine härtere Gummierung im Mantel. Diese Art von Pumpe ist für geringere Fördermengen im Vergleich zu beispielsweise Kolbenpumpen geeignet. Sie zeichnet sich durch eine kontinuierliche Förderung im Dichtstromverfahren aus. Denn für ein unterbrechungsfreies Spritzen wird eine möglichst geringe Pulsation in der Förderung verlangt.



Abbildung 25: Förderereinheit WM Variojet FU der Firma Werner Mader GmbH (links) mit unterschiedlichen Schnecken inklusive Schneckenmantel, Labor-Zwangsmischer CEM 60 S ELBA (mittig) und Zwangsmischer WM Jetmix 125 (rechts)

Es wurde für die Leichtbetonmischungen des IWB und von HeidelbergCement (HC) experimentell untersucht, welche Auswirkungen das Fördern durch die unterschiedlichen Schneckeneinheiten (KP20+ und KP45) sowie durch unterschiedliche Schläuche (\varnothing 35 mm und \varnothing 50 mm) hat.

Beim Pumpen durch die verschiedenen Schneckeneinheiten kam es aufgrund des größeren Anteils an Zementleim bei der HC-Rezeptur zu keiner signifikanten Verdichtung bei Förderung mit der KP20+ und der KP45-Schnecke. Dies ist aus dem Rohdichte-Druckfestigkeits-Diagramm in Abbildung 26 ersichtlich. Für die Mischung MII_{NS}(HC) variierte die Rohdichte der ofengetrockneten Prüfkörper zwischen 940-1.000 kg/m³. Es ist anzumerken, dass es bei der Förderung durch Schnecke und Schlauch zu einer starken Erwärmung des Frischbetons kam mit Temperaturanstiegen von über 20 °C. Dies hatte eine höhere Frühfestigkeit des Betons zur Folge und beeinträchtigte eine kontinuierliche Förderung enorm. Bei Verwendung des Schlauchs mit Durchmesser \varnothing 35 mm konnte keine dauerhafte Förderung erreicht werden und es kam zur Bildung von einzelnen Stopfern bis hin zum vollständigen Verschluss der Förderleitung.

Bei MII_{NS}(IWB) lässt sich eine deutliche Dichtezunahme durch die Pumpförderung erkennen. Zum einen wird durch den Förderdruck Zementleim in die vorhandenen Freiräume in der Betonmatrix an Stellen der Luftporen gedrückt. Zum anderen kommt es durch die Scherkräfte und die Reibung zu vereinzelt Kornbruch der Leichtzuschläge. Dies hat ein Eindringen des Zementleims in die Kapillaren der Blähglasbruchstücke zur Folge. Bei der Mischungsversion MII_{NS}(IWB)-3 war noch eine Dichtezunahme von 903 kg/m³ auf 1.287 kg/m³ (+ 42 %) bei der Verwendung der Schnecke KP45 sowie auf 1.172 kg/m³ (+ 30 %) bei der Verwendung der Schecke KP20+ zu verzeichnen. Erst durch die Weiterentwicklung der Betonrezeptur konnte die Rohdichtezunahme und der Kornbruch reduziert werden. Für die Kombination der Schnecke vom Typ KP45 mit einem Schlauchdurchmesser von \varnothing 50 mm kam es zu einer Rohdichtezunahme von lediglich 787 kg/m³ auf 963 kg/m³ (+ 22 %) bei jedoch deutlich geringerer Anfangs-Rohdichte für die Mischungsversion MII_{NS}(IWB)-4.2. Die Verdichtung ist der Schnecke zuzuordnen, wie in Abbildung 26 ersichtlich wird. Bei der Kombination aus KP20+ und einem Schlauchdurchmesser von \varnothing 35 mm kommt es durch die Schnecke zu einer Rohdichtenerhöhung von etwa 765 kg/m³ auf 871 kg/m³ (+ 14 %). Die weitere Förderung durch den Schlauch führt zu einer Rohdichte von 1.037 kg/m³ (+ 35 %). Der Kornbruch war hauptsächlich dem 4 mm-Größtkorn des Leichtzuschlags zuzuordnen, wie in den Abbildungen in Tabelle 6-3 erkennbar ist. Mit der wassergekühlten Schnecke KP20w mit dem Schlauch vom Durchmesser \varnothing 35 mm konnten für die IWB-Mischung sogar noch leicht verbesserte Ergebnisse erzielt werden. Hier nahm die Rohdichte von 748 kg/m³ durch die Schnecke auf 805 kg/m³ (+ 8 %) und durch die Schlauchförderung auf 983 kg/m³ (+ 31 %) zu.

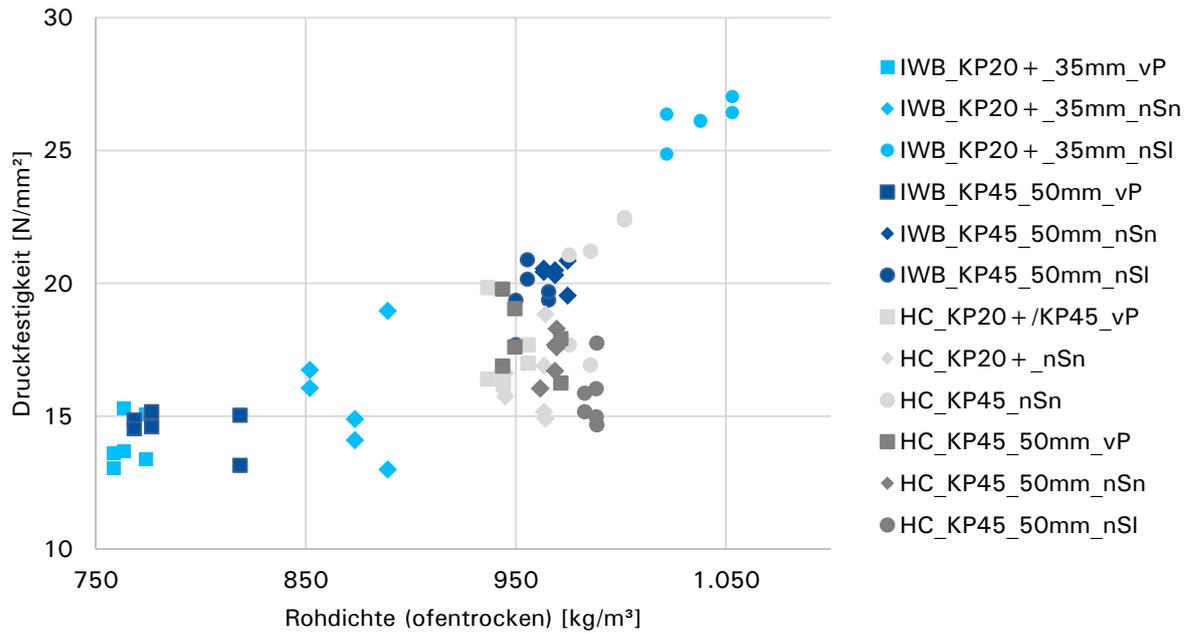


Abbildung 26: Rohdichte-Festigkeitsdiagramm für die Leichtbetonmischung MII_{NS}(IWB)-4.2 und MII_{NS}(HC) bei Förderung durch die Schnecke KP20+ und einem Schlauchdurchmesser von Ø 35 mm sowie durch die Schnecke KP45 und den Schlauchdurchmesser von Ø 50 mm (vP = vor dem Pumpen, nSn = nach der Schnecke, nSl = nach dem Schlauch)

Tabelle 6-3: Versuchsergebnisse zur Untersuchung auf Verdichtung und Kornbruch

Bezeichnung	MII _{NS} (HC)	MII _{NS} (IWB)	MII _{NS} (IWB)
Schnecke	KP45	KP45	KP20w
Schlauchdurchmesser	50 mm	50 mm	35 mm
Rohdichte nach Mischen	1.100 kg/m ³	901 kg/m ³	890 kg/m ³
Rohdichte nach Schnecke	1.121 kg/m ³	1.096 kg/m ³	962 kg/m ³
Rohdichte nach Schlauch	1.156 kg/m ³	1.091 kg/m ³	1.150 kg/m ³
Kornbruch nach Schnecke			
Kornbruch nach Schlauch			

Ein weiterer Aspekt bei den Untersuchungen zur Verfahrenstechnik war die Länge und Konfiguration der Förderstrecke. Je länger die Förderleitung des Systems ist, desto mehr Beton muss vorgehalten werden, um diese zu füllen. Dadurch steigt nicht nur der Aufwand bei der Mischung, sondern auch das abzutragende Gewicht der Förderleitung. Auch die zu passierende Oberfläche nimmt mit der Leitungslänge zu. Dadurch steigt die Scherbelastung auf den Frischbeton infolge der Wandreibung und die Gefahr der Entmischung. Somit sollte die Leitungslänge auf ein Mindestmaß reduziert werden, ohne jedoch den Arbeitsraum des Applikationssystems einzuschränken. Auf eine ausreichende Förderlänge zur Vergleichmäßigung des Förderstroms und der Elimination von eventuellen Pulsationen durch die Pumpe gilt es ebenfalls zu achten.

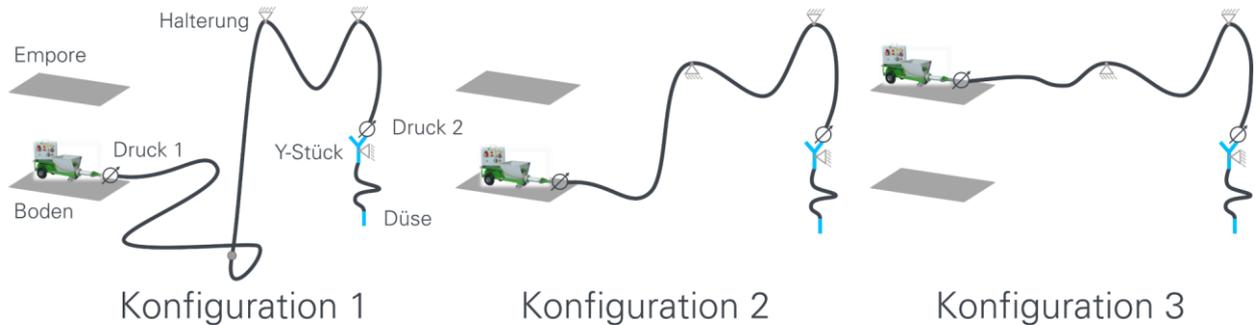


Abbildung 27: Unterschiedliche Konfigurationen für den Aufstellungsort der Nass-Spritzmörtel sowie für die Länge und Führung der Förderleitung

Zunächst wurde die Länge der Förderleitungen um 10 m reduziert (Abbildung 27: Konfiguration 1 → Konfiguration 2,) um die Oberflächenreibung und die dadurch induzierten Scherkräfte zu verringern. Dies führte zu weniger Entmischung. Weniger Belastung der Auflager der Schlauchleitung durch eine geringere Menge Frischbeton innerhalb der Förderleitungen ist ein weiterer positiver Nebeneffekt. Insbesondere die erhöhten Staudrucke in den vertikalen Förderleitungsabschnitten trugen zur unerwünschten Verdichtung des Frischbetons bei. Durch die Positionierung der Schneckenpumpen auf einer erhöhten Position konnte diesem Aspekt Rechnung getragen werden (Abbildung 27: Konfiguration 2 → Konfiguration 3).

6.2.3 Untersuchung von umweltbedingten Einflussfaktoren

Als weitere Herausforderung wurden die schwankenden Umweltbedingungen am Versuchsstand vermutet. Die Anlage steht in einer Holzlagerhalle, welche zur Belüftung nach außen hin offen und nicht klimatisiert ist. Dadurch sind alle gelagerten Ausgangsstoffe den starken Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen im Tagesverlauf unterworfen. Unterschiede von bis zu 15 °C und 36 % Luftfeuchtigkeit wurden zwischen einzelnen Versuchstagen im exemplarischen Zeitraum von Juni bis August 2018 festgestellt. Nimmt man das Ausbreitmaß als Kenngröße für den Einfluss der Temperatur auf die Betoneigenschaften, ist bis auf den Messausreißer am 27.08.2018 keine direkte Korrelation zur Temperatur oder zur Luftfeuchtigkeit ersichtlich (Abbildung 28). Die vermutete Problematik konnte somit widerlegt werden und eine gute Reproduzierbarkeit der Betonkonsistenz nachgewiesen werden.

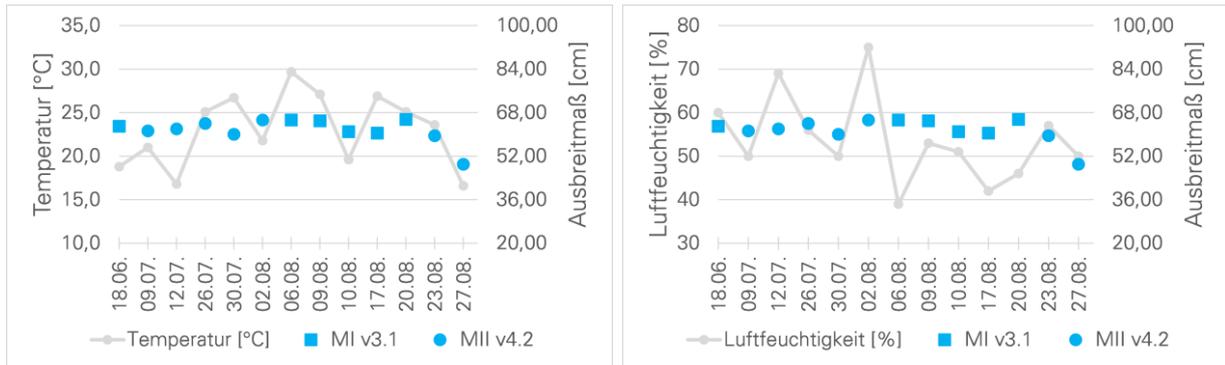


Abbildung 28: Verlauf der Temperatur an einzelnen Versuchstagen innerhalb des Zeitraums von Juni bis August 2018 sowie das entsprechende Ausbreitmaß für die Mischung MI_{NS}(IWB)-3.1 und die Mischung MII_{NS}(IWB)-4.2

6.3 Prozessparameteranalyse für das Nassspritzverfahren (ISYS)

6.3.1 Einflussfaktoren für das Nassspritzverfahren

Das erwünschte Ziel eines spritzbaren Leichtbetons mit einer Rohdichte von unter 500 kg/m³ für eine ausreichende Wärmedämmung bei möglichst minimaler Wandstärke konnte jedoch bisher nicht erreicht werden. Daher wird zunächst nur für die Mischung MI_{NS}(IWB)-V3.1 der Nassspritztechnologie eine Prozessparameteranalyse für den Materialauftrag durchgeführt. Dies bildet die Grundlage für einen zielgerichteten, automatisierten Betrieb des Nassspritzverfahrens.

Neben den betontechnologischen Einflussfaktoren, die bereits in der Mischungsentwicklung analysiert wurden, lässt sich über mehrere Stellgrößen innerhalb des Prozesses gezielt Einfluss auf die Charakteristik des Materialauftrags und die Eigenschaften des applizierten Nassspritzbetons nehmen. Diese sogenannten Prozessparameter lassen sich in allgemeine verfahrenstechnische Einflussfaktoren und spezifische Einflussfaktoren der Düsenbewegung unterteilen.

Allgemeine verfahrenstechnische Einflussfaktoren sind Parameter, die von der Gesamtmaschinenkonzeption abhängen [46]–[49]. Beim Nassspritzverfahren wird die gesamte Wassermenge bereits dem Betongemisch beigegeben, weshalb sich die Betrachtung auf die Förderung im Dichtstrom inklusive Druckluftzugabe beschränkt. Im Anschluss an die Frischbetonherstellung ist die nächste Stellgröße innerhalb des Förderprozesses die Drehzahl der Schneckenpumpe. Sie hat direkten Einfluss auf den geförderten Beton-Massenstrom. Im weiteren Verlauf der Förderung kann an der Düse die Druckluft zur Zerstäubung des Materialflusses gezielt zudosiert werden. Dies kann druck- oder volumenbasiert erfolgen. Die Menge bzw. der eingestellte Eindüsdruck der Luft beeinflusst die Austrittsgeschwindigkeit der Materialpartikel und somit auch die zugeführte Verdichtungsenergie und das Rückprallverhalten des Spritzguts maßgeblich. Ein geringer Einfluss der Luft auf die Aufweitung des Sprühstrahls wird ebenfalls erwartet. Des Weiteren bewirkt beim Nassspritzverfahren mit Dichtstromförderung eine hohe Luftzugabe an der Düse eine Separation des Mischungsverbundes. Schwankungen im Luftstrom sollten vermieden werden, um einen kontinuierlichen und gleichmäßigen Materialauftrag zu gewährleisten. Bei der Verwendung von Spritzbeton kommt der Düsenführung entscheidende Bedeutung im Hinblick auf die Qualität des Spritzbetons zu. In der Regel erfolgt die Düsenführung bei den meisten Anwendungen immer noch manuell durch einen erfahrenen und geübten Düsenführer. Die Düsenbewegung lässt sich dabei in eine Düsenführungsbewegung und eine Düseneigenbewegung unterteilen. Die Führungsbewegung bestimmt den Auftragsort, die jeweilige Verweildauer über der Auftragsfläche sowie den Auftragswinkel. Wohingegen die Eigenbewegung zur besseren Homogenisierung des Sprühstrahls führt somit die Qualität der Materialverteilung auf der Auftragsfläche verbessert. Der Schichtaufbau sowie die Schichtdicke können durch die Führungsgeschwindigkeit der Düse beeinflusst werden. Die Düsenführungsgeschwindigkeit hat keinen direkten Einfluss auf die Spritzbetondruckfestigkeit [47]. Der Düsenabstand beeinflusst die kinetische Energie des Spritzbetons beim Auftreten auf die



Auftragsfläche und ist maßgebend für die Verdichtung des Betons bei der Spritzbetonherstellung [46]. Ein geringerer Düsenabstand hat zur Folge, dass die kinetische Energie des Spritzguts beim Auftreffen auf die Auftragsoberfläche erhöht ist. Dies bewirkt eine stärkere Verdichtung, führt jedoch auch zu erhöhtem Rückprall. Zudem reduziert sich die effektive Auftragsfläche bei Annäherung der Düse. Der Düsenwinkel beschreibt die Neigung der Düse zu Auftragsfläche und dieser sollte im Optimalfall senkrecht zur Auftragsfläche stehen [47]. Abweichungen des Düsenwinkels von 90° führen zu erhöhtem Rückprall und können die bereits hergestellte Spritzbetonschicht auflockern. Die Untersuchungen in [47] zeigen, dass eine kreisförmige Düseneigenbewegung einer pendelförmigen vorzuziehen ist. Die kreisförmige Bewegung führt zu einer größeren Auftragsfläche und begünstigt die Homogenität des Nassgemischs [46]. Größere Radien dieser Kreisbewegung erzielen einen besseren Vermischungseffekt im Spritzbetonstrahl und können die Festigkeit sowie die Gleichmäßigkeit positiv beeinflussen [47]. Höhere Kreisfrequenzen der Düseneigenbewegung tragen ebenfalls zu einer besseren Durchmischung im Spritzstrahl bei [47].

6.3.2 Versuchsablauf zur Analyse der Einflussfaktoren

Die Analyse der wesentlichen Einflussgrößen des untersuchten Nassspritzverfahrens hat die Zielsetzung die Systemeinstellungen zu ermitteln, die einen reproduzierbaren und geregelten, automatisierten Betrieb des Verfahrens ermöglichen. Die nachfolgenden Parameter wurden hierbei näher untersucht:

- Allgemeine verfahrenstechnische Einflussfaktoren
 - Drehzahl der Nassspritzmaschine [U/s]
 - Luftdruck [bar]
- Verfahrenstechnische Einflussfaktoren der Düsenführungsbewegung
 - Bewegungsgeschwindigkeit [mm/s]
 - Düsenabstand [m]
- Verfahrenstechnische Einflussfaktoren der Düseneigenbewegung
 - Kreisfrequenz [Hz]

Alle aufgeführten Parameter sind gezielt steuer- bzw. regelbar und haben direkten Einfluss auf die Spritzbetonqualität und auf das charakteristische Profil des Materialauftrags. Um den Einfluss des jeweiligen Parameters auf den Prozess zu analysieren, wurde ein Versuchsablauf konzipiert. Zunächst wird der Frischbeton entsprechend des entwickelten Mischregimes im Zwangsmischer in ausreichender Menge für die Versuchsdurchführung hergestellt. Die Schlauchleitung wird mit einer Wasser-Zement-Lösung vorbenetzt, um eine bessere Frischbetonförderung zu gewährleisten. Anschließend wird der Frischbeton einer der Schneckenpumpen auf der Empore (Abbildung 27: Konfiguration 3) sukzessive zugeführt. Vor jedem Versuchsdurchlauf wird je ein Schalungskörper für eine Spritzbahn und eine Prismenschalung zur Herstellung von Probekörpern im Arbeitsraum positioniert (Abbildung 29, oben). Die gewünschten Prozessparameter für den Versuchsdurchlauf werden eingestellt und das Düsensystem zum Startpunkt des Verfahrens verfahren. Die beiden Schalungskörper werden vorab mit einem Trennmittel eingerieben, um die Probekörper später besser auslösen zu können. Mit der aktuellen Parameter-Konfiguration wird dann der Förder- und Spritzprozess angefahren, bis sich ein kontinuierlicher Förderzustand einstellt. Sobald dieser erreicht ist, beginnt der eigentliche Versuch. Zunächst wird eine Spritzbahn appliziert (Abbildung 29, mittig) und anschließend eine Prismenschalung mit drei Probekörpern der Abmessung 40 mm x 40 mm x 160 mm nach DIN EN 196-1 hergestellt (Abbildung 29, unten). Danach wird die Förderung gestoppt und das Düsensystem an den Startpunkt zurück verfahren. Die beiden Schalungen werden ausgetauscht, ein neuer Prozessparameter-Datensatz kann eingestellt und ein neuer Versuchsdurchlauf gestartet werden. Durch dieses Vorgehen werden die Standzeiten der Spritzbetonanlage möglichst geringgehalten und möglichem Aushärten des Frischbetons in der



Förderleitung vorgebeugt. Die Arbeitsschritte der Oberflächenvermessung der gespritzten Struktur und das Abwiegen der geförderten Materialmenge können zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden. Nach Abschluss der Versuche muss die Anlagentechnik möglichst zügig leer gefahren und von Frischbeton gereinigt werden. Die hergestellten Prismen werden normgerecht gelagert und anschließend geprüft. Dies liefert über die jeweils über drei Probekörper gemittelten Werte für die Rohdichte, die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit. Die hergestellten Spritzstreifen werden mittels zweier Distanz-Lasersensoren an jeweils drei Stellen orthogonal zur Auftragsrichtung vermessen. Dies liefert ein gemitteltes, charakteristisches Auftrags-Höhenprofil für den jeweiligen Prozessparameter-Datensatz. Zudem wird das auf der Schalung haftende sowie lose Material separat gewogen. Dadurch lassen sich der geförderte Massenstrom und die prozentuale Rückprallmenge rekonstruieren. Zusammenfassend lässt sich die Versuchsdurchführung in folgende Schritte unterteilen:

1. Herstellung des Frischbetons
2. Anfahren des Nassspritzprozesses
3. Einstellung eines Prozessparameter-Datensatzes
4. Anfahren des Nassspritzprozesses mit aktuellem Datensatz
5. Applikation einer charakteristischen Spritzbahn mit einem aktuellen Datensatz
6. Herstellung von Probekörpern in einer Prismenschalung mit einem aktuellen Datensatz
7. Rückkehr zum Startpunkt des Versuchsablaufs und Austausch der Schalungen für Spritzbahn und Probekörper. Wiederholung der Schritte 3-6 mit weiteren Prozessparameter-Datensätzen.
8. Reinigung der Komponenten
9. Vermessung der Spritzbahnen, Abwiegen des applizierten Materials, Abwiegen des Rückpralls, Abwiegen der Probekörper und normgerechte Lagerung
10. Normgerechte Prüfung der Probekörper auf Biegezug- und Druckfestigkeit



Abbildung 29: Genereller Aufbau (oben) des Versuchsablaufs zur Analyse der Einflussfaktoren des Nassspritzverfahrens für die Mischung M_{INS}(IWB)-3.1. Zunächst wird eine charakteristische Bahn für die aktuelle Prozesskonfiguration von rechts nach links appliziert (mittig). Anschließend werden Probekörper nach DIN EN 196-1 hergestellt (unten).

6.3.3 Prozessparameteranalyse für Betonmischung M_{INS}(IWB)-V3.1

6.3.3.1 Variation der Drehzahl der Schneckenpumpe

Wie bereits eingangs des Kapitels erwähnt, wird nur für die Mischung M_{INS}(IWB)-V3.1 der Nassspritztechnologie eine Prozessparameteranalyse für den Materialauftrag durchgeführt. Dies bildet die Grundlage für einen zielgerichteten, automatisierten Betrieb des Nassspritzverfahrens. Die eingesetzten Schneckenpumpen der Firma Werner Mader GmbH vom Typ WM Variojet FU können im Drehzahlbereich von 0.87 U/s bis 3.71 U/s betrieben werden. Für die Untersuchungen wurden drei exemplarische Drehzahlen ausgewählt: Eine niedrige Drehzahl von 1.31 U/s, eine mittlere Drehzahl von 2.16 U/s und eine hohe Drehzahl von 3.06 U/s. Diese drei Arbeitspunkte wurden jeweils für identische restliche Prozessparameter analysiert. Die Düsenführungsgeschwindigkeit betrug jeweils 100 mm/s. Die Düsenneigenbewegung wurde als kreisförmig mit einem Radius von 35 mm und einer Frequenz von 2 Hz festgelegt. Die Spritzdüse wurde für jeden Versuch senkrecht zur Auftragsoberfläche orientiert. Diese Parameter wurden basierend auf Literaturwerten und Erfahrungswerten aus dem Trockenspritzen gewählt und in Voruntersuchungen validiert. Die drei Drehzahlen wurden für zwei unterschiedliche Luftdrücke (0.8 bar und 1.4 bar) und drei unterschiedliche Düsenabstände (0.15 m, 0.20 m und 0.25 m) analysiert.

In Abbildung 30 sind exemplarische Spritzbahnen für die untersuchten Drehzahlen abgebildet. Der Düsenabstand betrug dabei 0.15 m und die Luft wurde an der Düse mit einem Druck von 0.8 bar zugeführt. Für die niedrige Drehzahl ist der Materialauftrag noch relativ „dünn“, während sich für die anderen beiden Drehzahlen ein gleichmäßiger Spritzstreifen ausbildet. Die Tropfen, die besonders in den Randbereichen der Spritzstreifen auffallen, sind durch den Schmierfilm des Förderstroms bedingt. Dieser Schmierfilm ist durch die radiale Kornverschiebung aufgrund der reibungsinduzierten Scherkräfte innerhalb der Förderleitung sehr feinststoffreich.



Abbildung 30: Blick von oben auf die Spritzschalung: Spritzbahnen für die drei untersuchten Drehzahlen der Nassspritzmaschine bei 0.8 bar Druckluft und einem Düsenabstand von 0.15 m. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen.

Mit zunehmender Drehzahl nimmt erwartungsgemäß auch der Massenstrom zu (Abbildung 31). Für den niedrigen und mittleren Drehzahlbereich ergibt sich ein annähernd lineares Verhalten, das unabhängig vom Düsenabstand und vom Luftdruck des an der Düse zugeführten Luftvolumenstroms ist. Für den mittleren und höheren Drehzahlbereich approximiert eine lineare Kennlinie das Verhalten bis auf einen Ausreißer ebenfalls noch hinreichend genau. Es ist zu beachten, dass die Messpunkte für 3.06 U/s jedoch eine höhere Streuung aufweisen. Die prozentuale Rückprallmenge zeigt eine nichtlineare Abnahmen bei zunehmender Drehzahl (Abbildung 31). Bei größerem Auftragsvolumen baut sich



schneller eine haftfähige und ausreichend große Oberfläche auf und somit prallen weniger Partikel des Spritzguts zurück. Eine abnehmende Exponentialfunktion approximiert die Messdaten gut. Für eine ausreichende Validierung sind weitere Datenpunkte notwendig. Insgesamt liegt die Rückprallmenge erwartungsgemäß deutlich unter den Werten beim Trockenspritzen (ca. 20%) und belegt damit einen Vorteil.

Ein exemplarischer Satz von charakteristischen Spritzstreifen für variierende Drehzahlen und konstante weitere Prozessparameter ist in Abbildung 32 visualisiert. Diese Spritzstreifen sind aus den gemittelten Lasermessdaten der sechs Messschriebe rekonstruiert. Sie bilden später die Grundlage für die digitale Planung des Schichtauftrags im automatisierten Betrieb. Durch den zunehmenden Massenstrom steigen erwartungsgemäß mit der Drehzahl auch die aufgetragene Schichthöhe und die Schichtbreite. Eine Variation der Drehzahl hat keinen signifikanten Einfluss auf die Betoneigenschaften. Sowohl die Betondruckfestigkeit als auch die Biegezugfestigkeit der hergestellten Probekörper verhält sich annähernd konstant über die untersuchten Arbeitspunkte. Die mittlere Druckfestigkeit liegt nach sieben Tagen bei 111,95 N/mm² und die mittlere Biegezugfestigkeit bei 14,17 N/mm². Die mittlere Rohdichte nach dem Ausschalen der Probekörper betrug 2.204 kg/m³ und 2.102 kg/m³ im ofentrockenen Zustand.

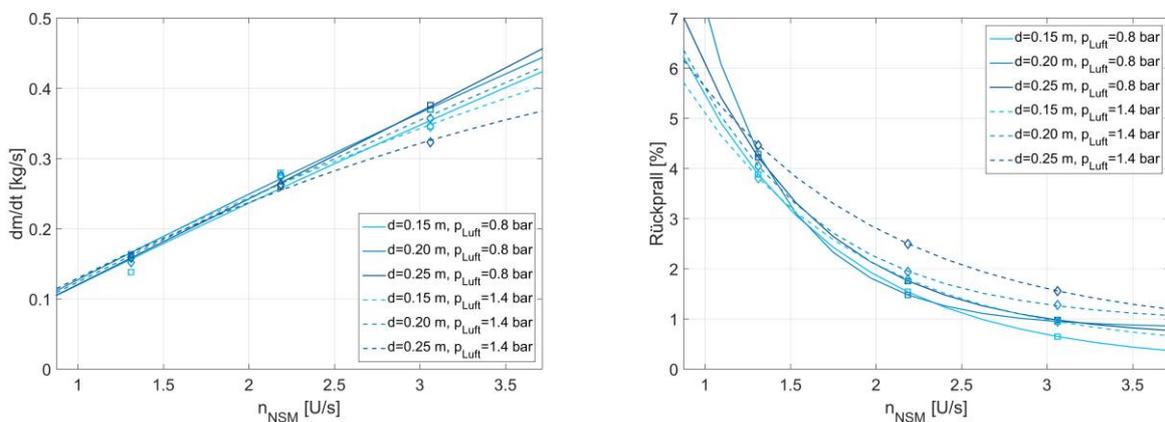


Abbildung 31: Einfluss der Drehzahl der Nassspritzmaschine auf den geförderten Massenstrom (links) und die prozentuale Menge an Rückprall (rechts).

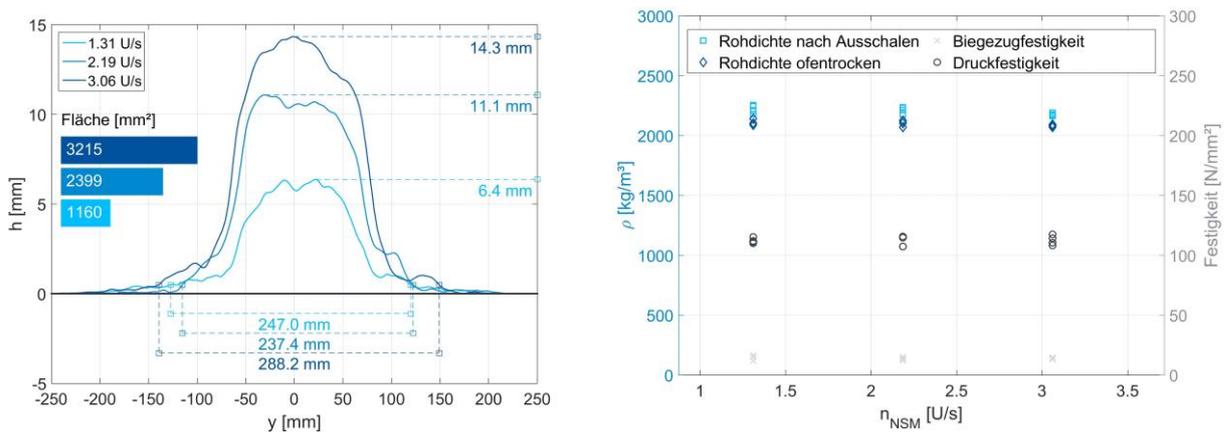


Abbildung 32: Vermessene Spritzstreifen bei einem Düsenabstand von 15 cm und 0.8 bar Luftdruck (links) für drei unterschiedliche Drehzahlen der Nassspritzmaschine. Einfluss der Drehzahl auf die Beton-Rohdichte, die Biegezug- und die Druckfestigkeit (rechts).

6.3.3.2 Variation des Luftdrucks

In Abbildung 33 sind exemplarische Spritzbahnen für unterschiedliche Luftdrücke abgebildet. Der Düsenabstand betrug dabei 0.15 m und der Frischbeton wurde bei einer Drehzahl von 2.19 U/s gefördert. Zunehmender Luftdruck führt zu einer Entmischung des Spritzbetons, was anhand des verstärkten Auftretens von Zementleim am Rand und auf dem Spritzbetonauftrag gut zu erkennen ist. Die Rückprallmenge steigt nur in sehr geringem Maße mit dem Luftdruck an. Einen maßgeblicheren Einfluss hat die Drehzahl der Nassspritzmaschine bzw. der davon abhängige Frischbeton-Massenstrom (Abbildung 34). Für die meisten der untersuchten Konfigurationen führt die höhere Druckluft zu einer leicht reduzierten Auftragshöhe, die mit einer geringen Zunahme an aufgetragenem Material in den Randbereichen des Spritzstreifens einhergeht (Abbildung 34). Auf die Rohdichte der untersuchten Betonmischung, sowie auf die Biegezug- und die Druckfestigkeit hat die Druckluft, die an der Spritzdüse zugeführt wird keinen ersichtlichen Einfluss (Abbildung 35).

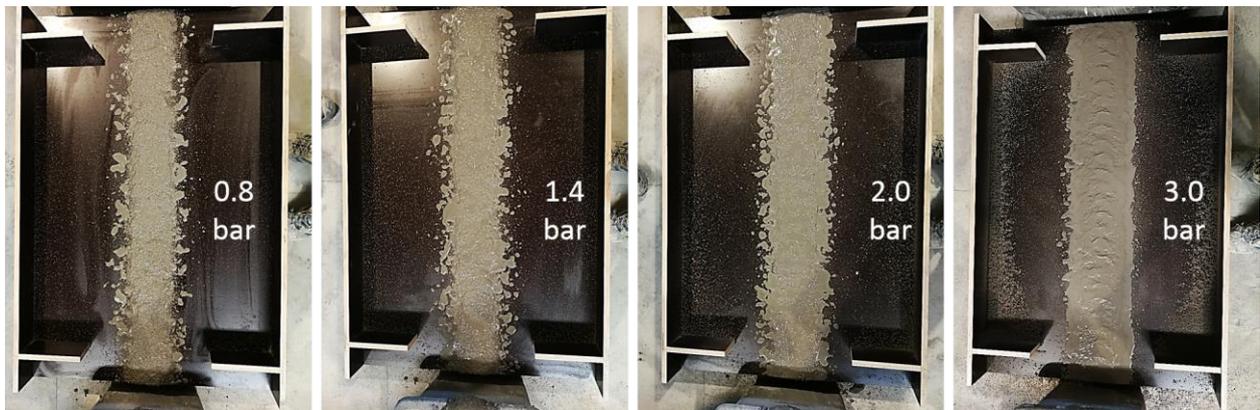


Abbildung 33: Spritzbahnen für vier unterschiedliche Luftdrücke bei einer Nassspritzmaschinen-Drehzahl von 2.19 U/s und einem Düsenabstand von 0.15 m. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen.

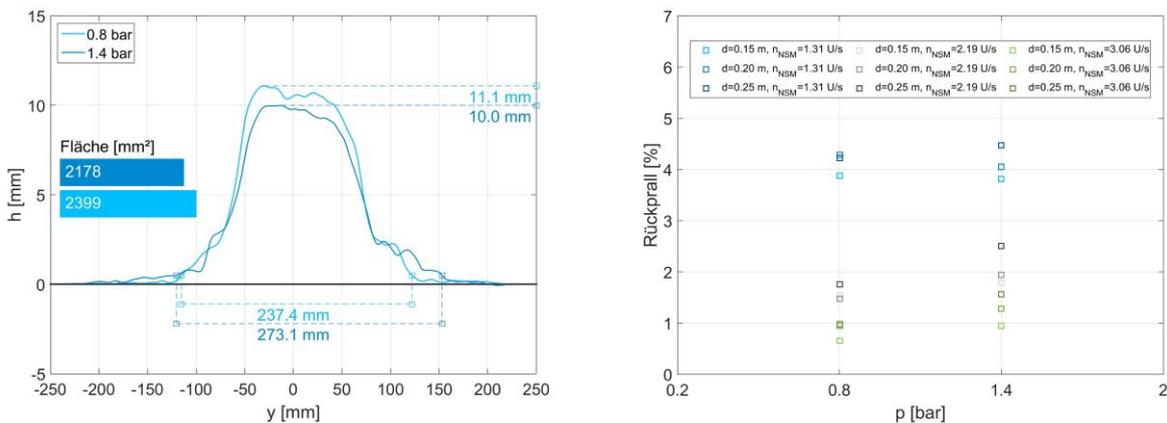


Abbildung 34: Vermessene Spritzstreifen bei einem Düsenabstand von 15 cm und einer Drehzahl von 2.19 U/s (links) für zwei unterschiedliche Luftdrücke. Einfluss des Luftdrucks auf die prozentuale Menge an Rückprall (rechts).

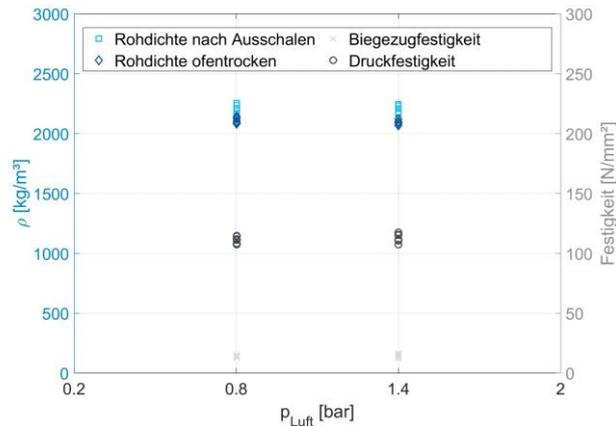


Abbildung 35: Einfluss des Luftdrucks auf die Beton-Rohdichte, die Biegezug- und die Druckfestigkeit.

6.3.3.3 Variation der Düsenführungsbewegung

Die Düsenführungsbewegung setzt sich aus drei maßgeblichen Komponenten zusammen. Dies ist zunächst die Düsenführungsgeschwindigkeit. Sie bestimmt die Verweildauer der Düse über der jeweiligen Auftragszone. Des Weiteren wird die Führungsbewegung durch den Düsenabstand und den Auftragswinkel charakterisiert. Der Auftragswinkel wird dabei zwischen Düse und Auftragsoberfläche gemessen. Das Applikationssystem ermöglicht Auftragswinkel im Bereich zwischen 60 ° und 120 °. Die Erfahrungen aus dem Trockenspritzen und Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei ebener Auftragsoberfläche die Düse im 90 °-Winkel orientiert werden sollte, um einen symmetrischen Schichtauftrag mit möglichst geringem Rückprallwert zu erreichen. Daher wurden nur unterschiedliche Führungsgeschwindigkeiten und Düsenabstände genauer untersucht.

Mit abnehmender Führungsgeschwindigkeit steigt das Materialvolumen auf der Auftragsfläche durch die längere Verweildauer. Dies führt zu einer Vergleichmäßigung des Materialauftrags (Abbildung 36). Bei 200 mm/s lässt sich die überlagerte Düseneigenbewegung bereits deutlich in der Spritzbahn erkennen. Diese Kopplung gilt es bei der Wahl der beiden Prozessparameter zu berücksichtigen. Da die Geschwindigkeit der Düseneigenbewegung durch das Leistungsvermögen der Aktorik des Hexapods limitiert ist, wird automatisch dadurch auch die maximale Düsenführungsgeschwindigkeit begrenzt. Die Auftragshöhe und die Breite der Spritzstreifen steigt erwartungsgemäß ebenfalls bei abnehmender Führungsgeschwindigkeit (Abbildung 37). Auftragshöhe und die Fläche unter der Hüllkurve zeigen ebenso wie die applizierte Betonmasse eine exponentielle Abnahme bei steigender Führungsgeschwindigkeit (Abbildung 37).

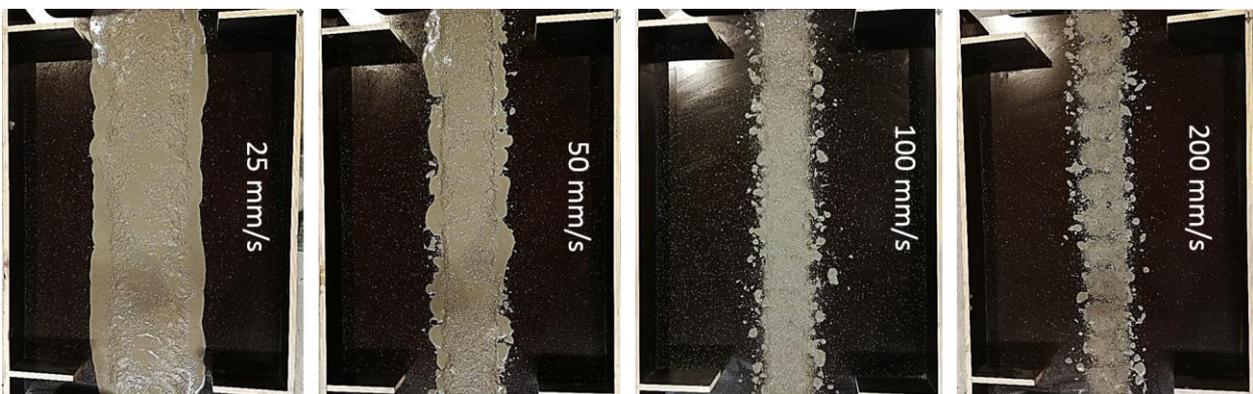


Abbildung 36: Spritzbahnen für vier untersuchte Düsenführungsgeschwindigkeiten bei 0.8 bar Druckluft und einem Düsenabstand von 0.15 m. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen.

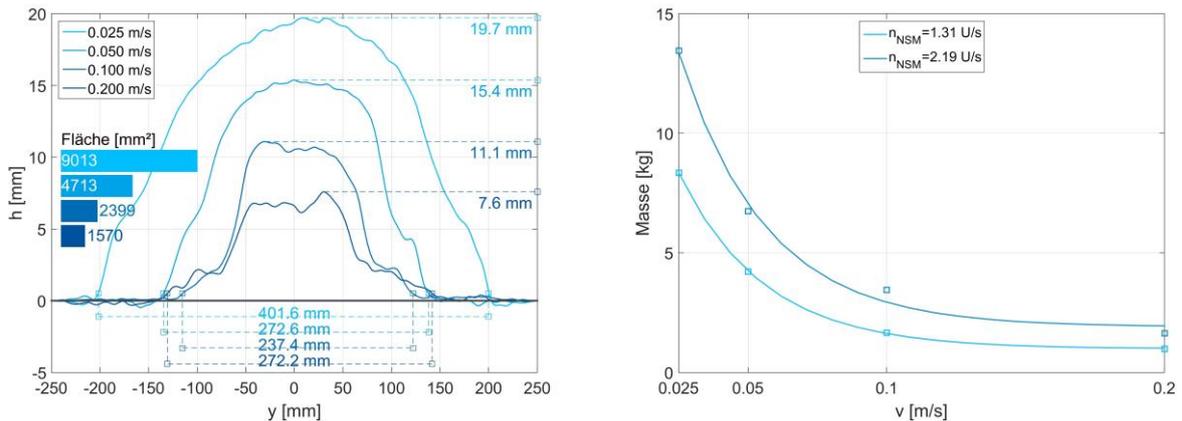


Abbildung 37: Vermessene Spritzstreifen für vier unterschiedliche Düsenführungsgeschwindigkeiten bei einer Drehzahl von 2.19 U/s, einem Düsenabstand von 0.15 m und einem Luftdruck von 0.8 bar (links). Einfluss der Führungsgeschwindigkeit auf die applizierte Betonmasse (rechts).

Eine Vergrößerung des Düsenabstands führt dazu, dass das Spritzgut sich durch die Strahlaufweitung nach Düsenaustritt auf einer größeren Auftragsfläche verteilt. Bei den charakteristischen Spritzstreifen macht sich diese durch eine abnehmende Auftragshöhe und durch eine zunehmende Auftragsbreite bemerkbar (Abbildung 38). Ähnlich wie bei der Variation der Druckluft hat auch der Düsenabstand nur einen geringen Einfluss auf das Rückprallverhalten im Vergleich zur Variation der Förderleistung (Abbildung 38).

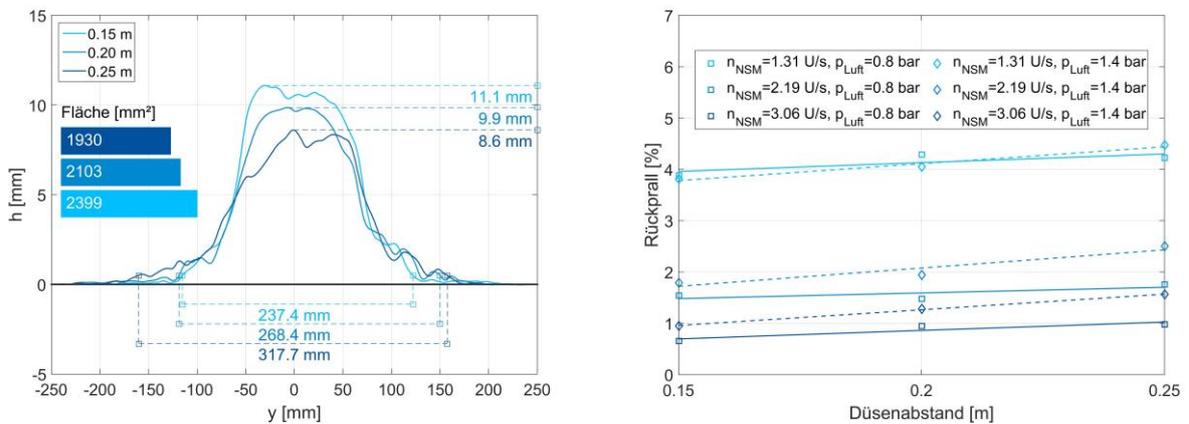


Abbildung 38: Vermessene Spritzstreifen für unterschiedliche Düsenabstände bei einer Drehzahl von 2.19 U/s und einem Luftdruck von 0.8 bar (links). Einfluss des Düsenabstands auf die Rückprallmenge (rechts).

6.3.3.4 Variation der Düseneigenbewegung

Die Erfahrungen beim Trockenspritzen und Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine kreisförmige Eigenbewegung, die der Düsenführungsbewegung überlagert wird, sich positiv auf die Homogenität des Spritzguts und auf die Gleichmäßigkeit beim Materialauftrag auswirkt. Daher wurde diese Form einer pendelförmigen oder einer elliptischen Eigenbewegung vorgezogen. Als guter Radius für die Kreisform hat sich ein Wert von 0.035 m bewährt. In Abbildung 39 ist eine Spritzbahn ohne Düseneigenbewegung im Vergleich zu zwei Spritzbahnen mit Eigenbewegung bei unterschiedlichen Kreisfrequenzen dargestellt. Die Wahl der Kreisfrequenz ist auf die Düsenführungsgeschwindigkeit abzustimmen,

wie bereits im vorherigen Abschnitt festgestellt wurde. Ohne Eigenbewegung wird das Material konzentrierter auf der Auftragsfläche appliziert, was sich in Form einer größeren Auftragshöhe und einem schmaleren Spritzstreifen niederschlägt (Abbildung 40).

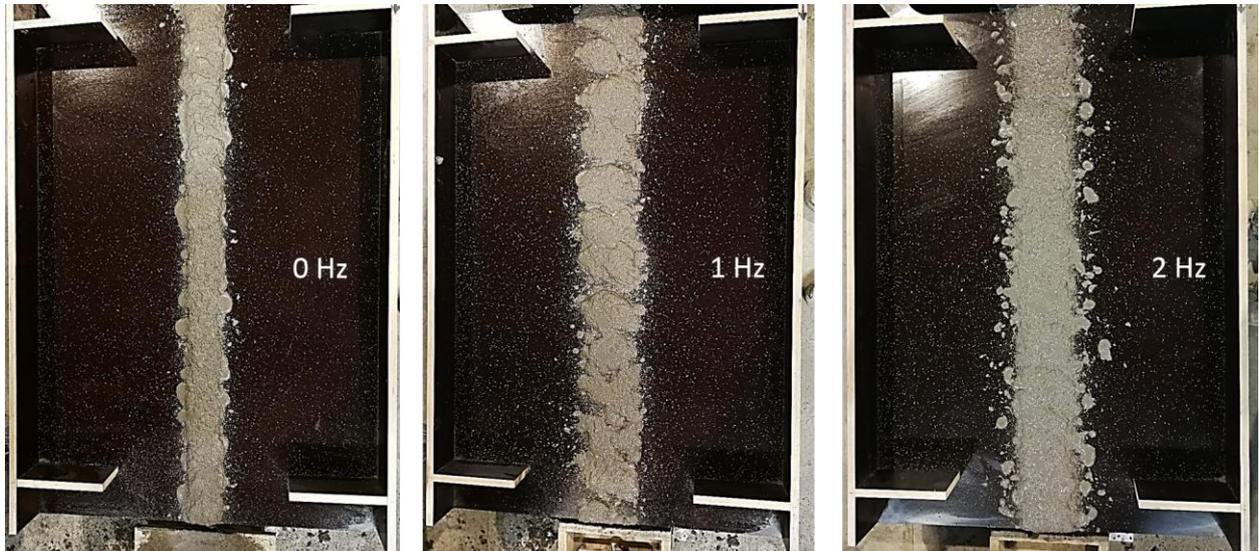


Abbildung 39: Spritzbahnen für drei Rotationsgeschwindigkeiten der kreisförmigen Düseneigenbewegung bei 0.8 bar Druckluft, 0.15 m Düsenabstand und einer NSM-Drehzahl von 2.19 U/s. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen.

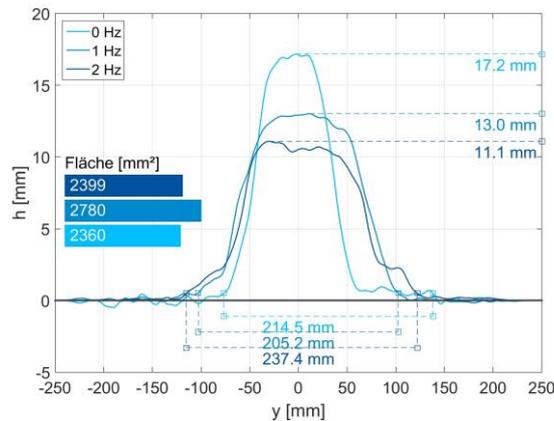


Abbildung 40: Vermessene Spritzstreifen für unterschiedliche Frequenzen der kreisförmigen Düseneigenbewegung.

6.3.3.5 Validierung des Verfahrens

Auf Basis der Analyse der Prozessparameter für die untersuchte Mischung MI_{NS}(IWB)-3.1, wurde der automatisierte Betrieb des Nassspritzverfahrens mit dieser Betonmischung vorbereitet. Die Validierung des Prozesses wurde anhand von quaderförmigen Musterbauteilen mit den Abmessungen von 1200x100x100 mm durchgeführt. Der generelle Ablauf der Herstellung eines Satzes von vier Probekörpern ist in Abbildung 41 dargestellt. Vor Einbringen der Bewehrung wird zunächst eine dünne Schicht zur Gewährleistung der Betonmindestdeckung appliziert. Anschließend werden die Probekörper sukzessive in mehreren Lagen aufgebaut. Nach Herstellung der letzten Schicht wurde eventuell überschüssiges Material manuell abgezogen. Der Vergleich zwischen Sollprofil und vermessener Schichtstruktur zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 42). Bei einem Schichtauftrag mit zu großer Schichthöhe zeigt sich jedoch, dass ein Teil des applizierten Materials in Düsenführungsrichtung durch Druckluft vorangeschoben wird. Dies führt zu einem unebenen Schichtprofil (Abbildung



42). Durch Zudosierung eines Erstarrungsbeschleunigers an der Düse oder durch entsprechende Schichtplanung kann dieser Problematik entgegen gewirkt werden.

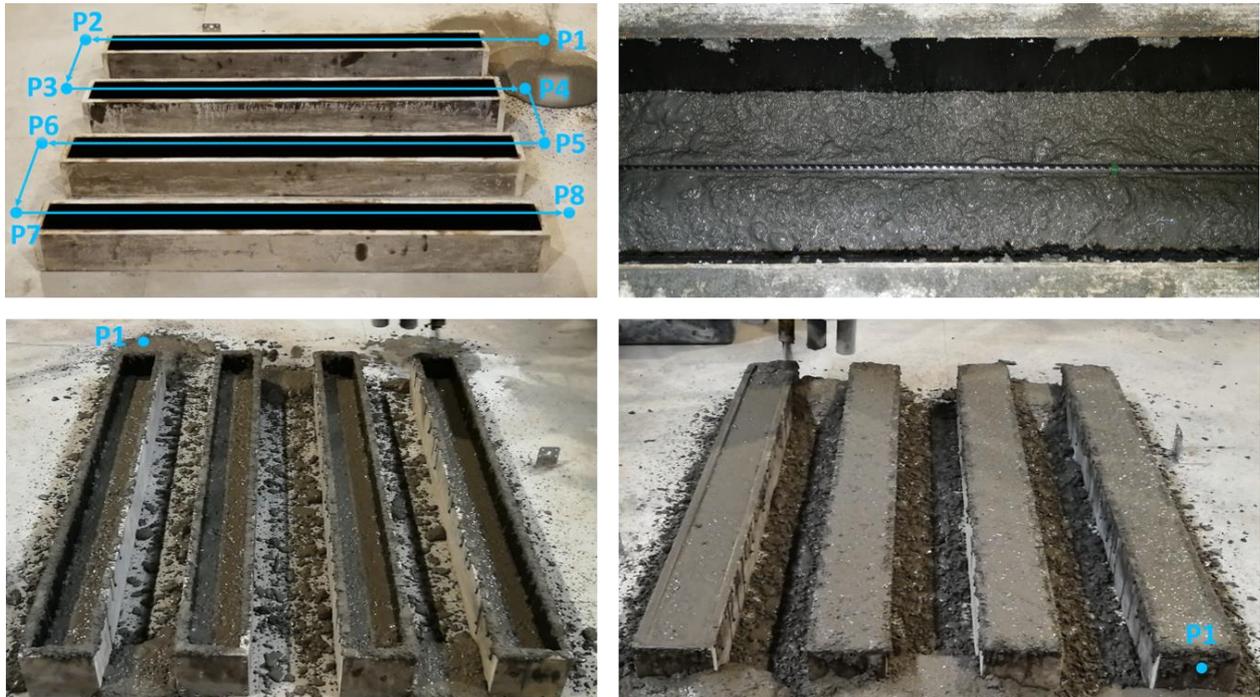


Abbildung 41: Herstellung von vier Probekörper der Abmessungen 1200x100x100 mm. Schematische Trajektorie für eine Bauteilschicht (oben links), Einlegen der Bewehrung (oben rechts), Spritz-auftrag einer mittleren Schicht (unten links) und Herstellung der letzten Bauteilschicht (unten rechts).

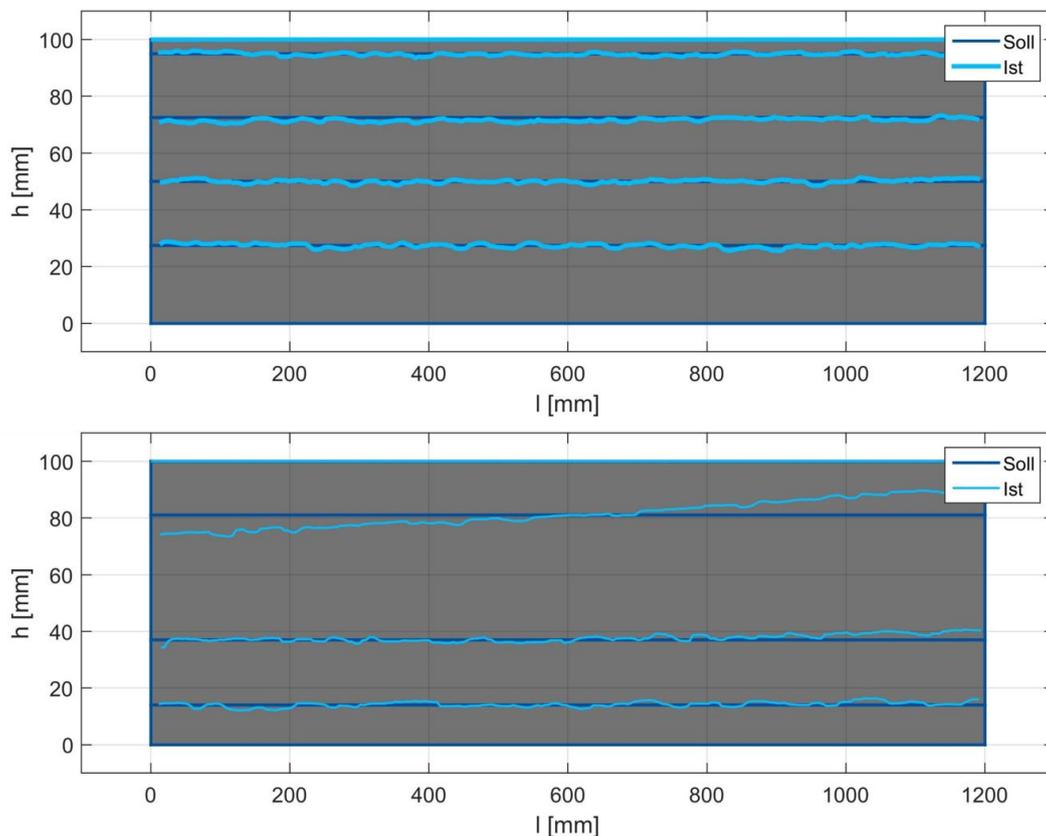
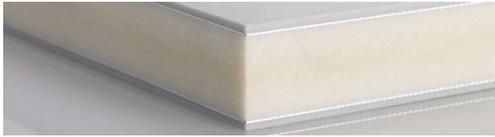
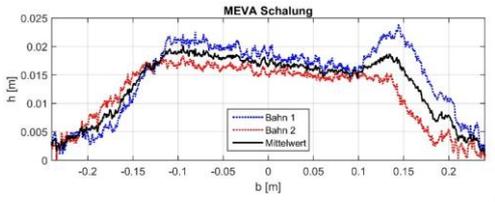
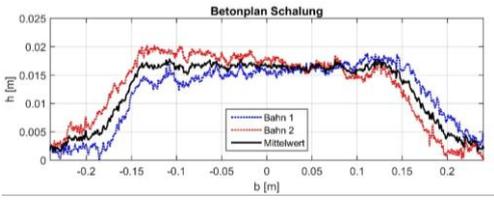


Abbildung 42: Vergleich zwischen Sollprofil und gemessener Schichtstruktur gemittelt über vier Probekörper (oben) und für einen Probekörper mit einer großen Zwischenschicht (unten).

6.4 Schalungstechnologie (ISYS/ILEK)

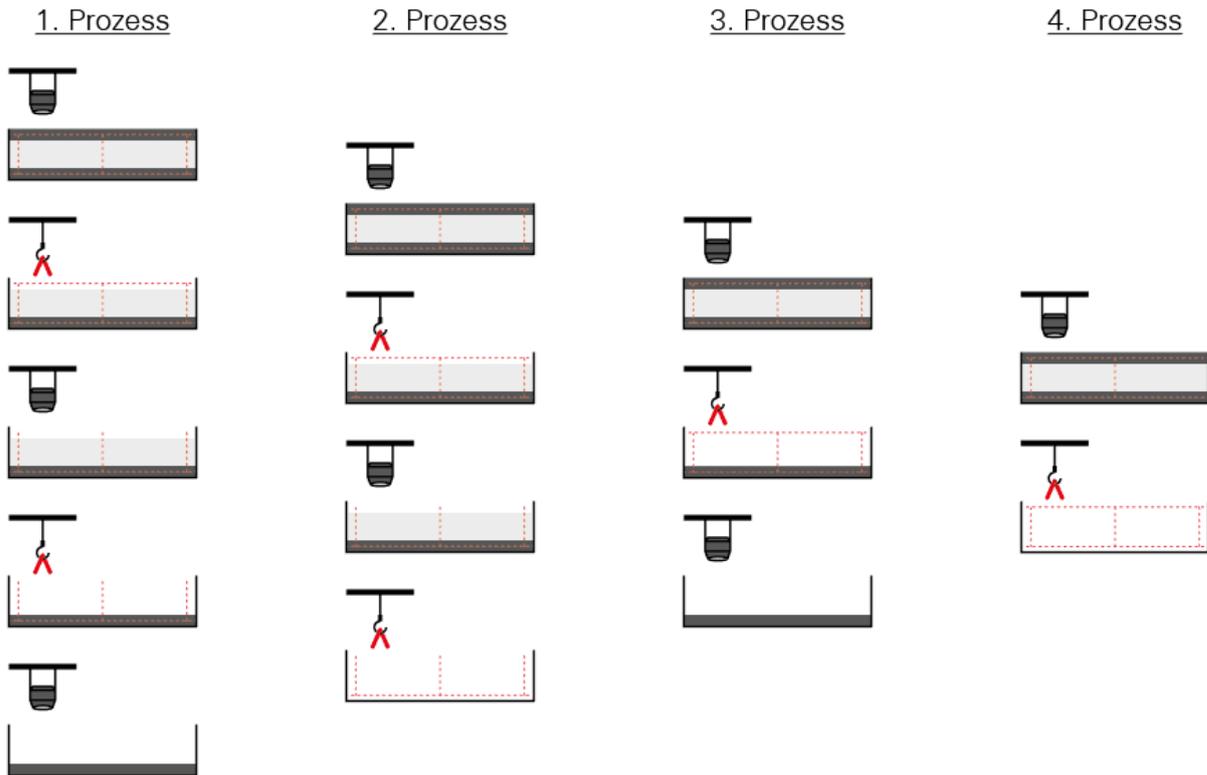
Zur Bewertung des Einflusses der Schalungsoberfläche auf das Verhalten des Materialauftrags wurden zwei unterschiedliche Schalungssysteme analysiert. Dabei handelte es sich zum einen um eine herkömmliche Betoplan-Schalung und zum anderen um die Schaltafeln *alkus* des Projektpartners MEVA-Schalungssysteme. Auf beide Schalungssysteme wurden mit dem Applikationssystem der Herstellungsplattform jeweils zwei Spritzbahnen der Basismischung MI im Abstand von 0,20 m aufgetragen. Die Einstellungen für die Betonverfahrenstechnik (bspw. Förderleistung, Luftzufuhr, Betonzusammensetzung) waren in beiden Versuche identisch. Anschließend wurden die Auftragsprofile mittels Lasertrigonometrie an jeweils zwei exemplarischen Stellen entlang der Spritzbahn vermessen und das applizierte Material sowie der entstandene Rückprall abgewogen (Tabelle 6-4). Hierbei wurde deutlich, dass sich bei beiden Schalungssystemen ein vergleichbarer charakteristischer Materialauftrag einstellt und auch die prozentualen Rückprallmengen für beide Systeme nahezu identisch ausfallen.

Tabelle 6-4: Rückprallmenge für die untersuchten Schalungsböden

	MEVA-Schalung	Betoplan-Schalung
Muster		
Rückprallmenge	14,30 %	14,29 %
Schichtstruktur		

6.5 Bewehrungstechnologie (ISYS/ILEK)

Der Einbau der Bewehrung stellt für den additiven Fertigungsprozess eine große Herausforderung dar. So muss der Bewehrungseinbau stets an den schichtweisen Materialauftrag angepasst werden (Abbildung 4-3). Bei einer Vorfertigung der Wandbauteile im Werk ist es zielführend, Arbeitsschritte zu reduzieren, um die Produktionszeit zu verkürzen. Dies geht beim Einbau der Bewehrung einher mit einer Steigerung des Vorfertigungs- und Automatisierungsgrads. Der zeitintensivste Prozess wäre folgender Ablauf: Auftrag einer Betonschicht, Einbau der Bewehrung bestehend aus Deckschichtbewehrung und Schubgitter, Betonieren des Kerns, Befestigung der zweiten Deckschichtbewehrung und letztlich Betonieren der Deckschicht. Im Gegensatz dazu besteht der kürzest mögliche Prozess aus dem Einbau des gesamten Bewehrungssystems mit Abstandshaltern und der anschließenden Betonage.



Vorfertigungs- und Automatisierungsgrad

Prozessschritte und Produktionszeit

Abbildung 43: Prozesse des Vorfertigungs- und Automatisierungsgrads bei der Bauteilherstellung. Erster Herstellungsschritt unten, letzter Herstellungsschritt oben

Es wurden exemplarisch Versuche für den zweiten und vierten Prozess (Abbildung 43) durchgeführt, um zu überprüfen, inwieweit sich die unterschiedlichen Stufen des Vorfertigungs- und Automatisierungsgrades bei der Bauteilherstellung umsetzen lassen. Im 2. Prozess wurde zuerst das Bewehrungssystem der Variante 1 in eine entsprechende Bauteilschalung mit den Innenmaßen 100 x 33 x 10 cm eingebracht (Tabelle 6-5, Zeile 1) und mit Abstandshaltern zum Schalungsboden ausgestattet. Anschließend wurde mit dem automatisiertem Trockensprühverfahren die untere Deckschicht zur Einbettung der unteren Bewehrungszone appliziert. Detailliert sollte untersucht werden, wie gut die Bewehrung eingebettet wird und ob sich Fehlstellen unterhalb der Bewehrung ausbilden. An der Oberfläche war eine relativ gleichmäßige und ebene Schichtstruktur zu sehen und es zeigten sich keine Fehlstellen (Tabelle 6-5, Zeile 2-4). Jedoch wird an der Unterseite zum Schalungsboden die Problematik beim Schichtauftrag mittels Trockensprühen sichtbar. Besonders im Schnittbereich zwischen ebener Bewehrung und Schubbewehrung zeigen sich leichte Fehlstellen bzw. keine vollständige Bedeckung der Bewehrungsstruktur. Die Trajektorie des Sprühvorgangs ist dabei von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung von Fehlstellen. Der Sprühprozess begann in der linken unteren Ecke und führte über die rechte untere Ecke in einer mittleren Bahn zurück zum linken Rand (Bilder in Tabelle 6-5 in Zeile



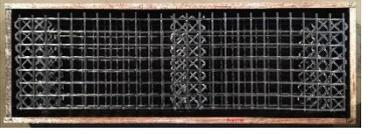
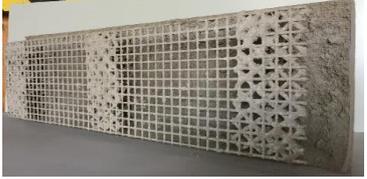
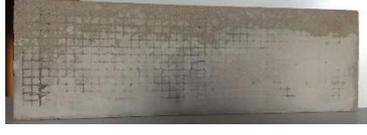
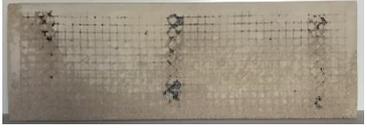
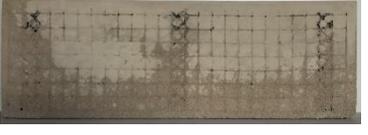
5). Von dort wurde die abschließende dritte Bahn für das obere Drittel von links nach rechts abgefahren. Die deutlichsten Fehlstellen (Tabelle 6-5: Variante 1, Zeile 5) am linken Bauteilrand erklären sich zum einen durch die verstärkte Abschirmung aufgrund der sich überschneidenden Bewehrungsmaschen und zum anderen durch den Sprüschatten, der von der seitlichen Schalungswand induziert wird. Im Vergleich dazu weist die Zone in der rechten Bauteilrand deutlich weniger Anzeichen von Fehlstellen auf. Des Weiteren zeigt sich am oberen Bauteilrand, dass beim weiteren Applizieren der Schicht nicht vollständig benetztes Material in Form von Rückprall mit eingebaut wurde und zu einer unzulänglichen Bedeckung der Bewehrung beiträgt. Im Detail sind die beschriebenen Phänomene nochmals in Tabelle 6-5 in Zeile 6 zu erkennen.

Für den in Abbildung 43 dargestellten 4. Prozess wurden identische Versuche mit zwei unterschiedlichen Varianten durchgeführt, die um eine zusätzliche obere Bewehrungslage erweitert wurden. Die Bewehrungssysteme unterscheiden sich in der Größe ihrer Maschen und werden im Folgenden als Variante 2a und Variante 2b bezeichnet (Tabelle 6-5). Für beide Varianten zeigt sich wie erwartet, eine stärkere Ausprägung von Fehlstellen an der Unterseite im Vergleich zu Variante 1, bedingt durch die erhöhte Abschirmung aufgrund der zusätzlichen oberen Bewehrungslage. Die kleinere Maschenweite von Variante 2a führt zwar zu einer verbesserten Homogenisierung des Materialauftrags und damit zu einer verbesserten Oberflächenstruktur. Jedoch sind die Anzeichen von unzureichender Bedeckung der Bewehrung an der Unterseite stärker ausgeprägt. Dies zeigt sich besonders im Bereich der Überschneidung von den Maschen der ebenen Bewehrungsschicht und den dazu um 45° verdrehten Maschen der Schubgitter für Variante 2a (Tabelle 6-5: Zeile 5-6). Der ungewünschte Einbau von unvollständig benetztem Rückprall tritt ebenfalls bei diesen beiden Varianten auf. Die zueinander verdrehten Bewehrungsmaschen bringen auch die Problematik mit sich, dass sich mit jeder aufgetragenen Sprüschicht mehr Material in Höhe der oberen horizontalen Bewehrungszone ablagert und nicht mehr bis zur eigentlich gewünschten Auftragsfläche gelangt. So hatten sich nach dem versuchsweisen Applizieren einer zweiten Schicht bei Variante 2b die Maschen fast vollständig mit Beton zugesetzt (Tabelle 6-5: Zeile 7).

Für eine bessere Umsetzung der untersuchten Prozesse wäre daher der Einsatz einer Nasssprühtechnik zu empfehlen, da damit der Einbau von unerwünschtem Rückprall vermieden werden kann. Zusätzlich sollte der prozessbedingt fließfähigere Beton die sich durch das Bewehrungssystem im Sprüschatten befindlichen Zonen besser ausfüllen können. Des Weiteren ist für Sprühprozesse ein Bewehrungssystem mit nicht zueinander verdrehten Maschen zwischen horizontalen und vertikalen Bewehrungszonen zu wählen.



Tabelle 6-5: Untersuchung für unterschiedliche Bewehrungssysteme

	Variante 1	Variante 2a	Variante 2b
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

7 Entwurf multifunktional gradierter Wandbauteile (AP 3, ILEK)

7.1 Entwurfsansatz

Das Projektziel der Entwicklung einer rein mineralischen und multifunktionalen Wand mit minimalem Materialeinsatz erfordert die Formulierung entsprechender Entwurfsansätze unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Technologien zur Gradientenbildung. Für die Mikrogradierung, bei der in erster Linie die Dichte des Betons manipuliert wird, soll im Folgenden das Vorgehen des Entwerfens und der Bemessung verdeutlicht werden.

Der Bauteilentwurf und damit verbunden die Materialverteilung kann als mathematisches Optimierungsproblem formuliert werden. Die Zielfunktion der Massenreduktion kann als die zu minimierende Wandstärke bzw. das zu minimierende Bauteilgewicht definiert werden. Dieses Optimierungsproblem ist unter Einhaltung der Nebenbedingungen in Form der Gewährleistung von Tragfähigkeit, Wärmeschutz sowie Feuchteschutz etc. zu lösen. Die Lösung dieses mehrkriteriellen Problems kann mit Hilfe der Pareto-Optimierung erfolgen. Hierzu sind allerdings den einzelnen Zielen bzw. Anforderungen Gewichtsfaktoren zuzuordnen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen, das nicht zwingendermaßen dem Optimum für einzelne Aspekte entspricht. Zur Reduktion der Komplexität erfolgt der Entwurf nur für die beiden Hauptzielgrößen Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Vereinfachend kann dadurch der Entwurf einer multifunktional gradierten Wand in zwei separate Optimierungsprobleme aufgeteilt werden: die Ermittlung der minimalen Wanddicken zum einen zur Einhaltung der Tragfähigkeit und zum anderen zur Wärmedämmung (Abbildung 44). In einem nachgelagerten Entwurfsschritt werden die sekundären Ziele wie Feuchteschutz, Schallschutz und Brandschutz überprüft und die Materialverteilung gegebenenfalls angepasst.

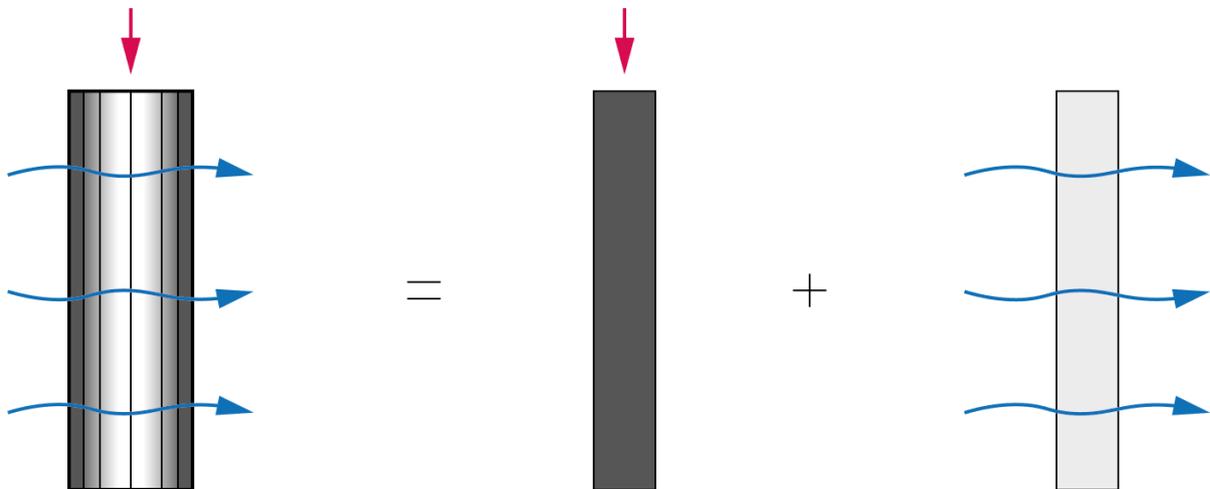


Abbildung 44: Vereinfachung des mehrkriteriellen Optimierungsproblems

Die Lösung der Optimierung und damit die Bestimmung der erforderlichen Schichtstärken der unterschiedlichen Materialien erfolgt letztlich unter den Zielformulierungen, dass für die Tragfähigkeit die Grenzschlankheit von 86 nicht überschritten wird. Die Anforderung des Wärmeschutzes soll rein über den Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils eingehalten werden (7.2).

$$\lambda_{lim} \leq 86 \quad (7.1)$$

$$\frac{1}{R_n} \leq 0,21 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (7.2)$$



7.2 Numerische Berechnungsmethoden für die Nachweisführung

7.2.1 Tragfähigkeit

Die derzeitigen normativen Berechnungsansätze zum Nachweis der Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen beruhen zumeist auf empirischen Formeln, die aus Versuchen und Untersuchungen an dem Werkstoff Beton abgeleitet wurden. Da gradierte Betonbauteile derzeit in der Norm nicht berücksichtigt werden, sollen numerischen Simulationen zur Tragfähigkeit mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode [50]–[53] durchgeführt werden, um das Tragverhalten hinreichend genau abbilden zu können. Hierzu wird das Finite-Element-Programm *Abaqus* eingesetzt, mit dem in vorherigen Untersuchungen das Biegetragverhalten sehr gut abgebildet werden konnte [24].

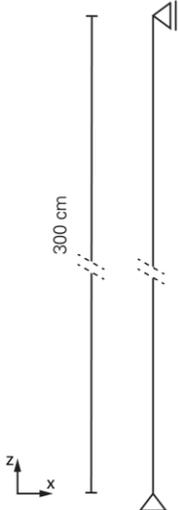
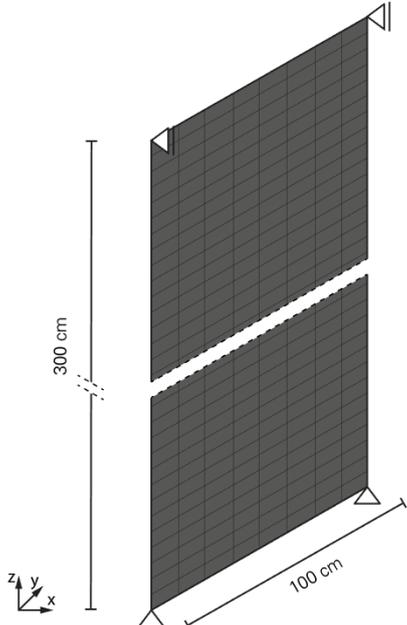
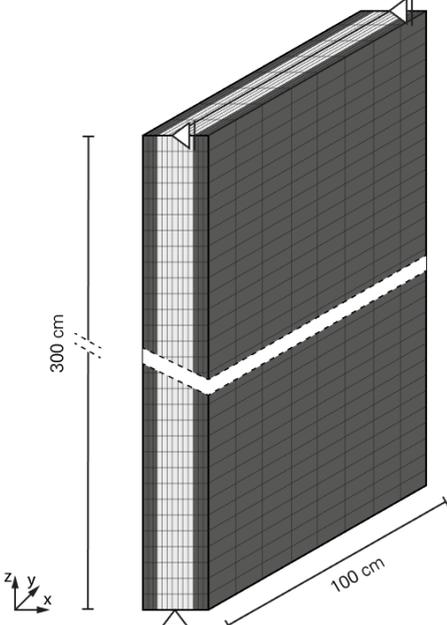
Bei Wandbauteilen können prinzipiell zwei Versagensmechanismen auftreten: ein Spannungsversagen oder ein Stabilitätsversagen. Beide Versagensarten sind durch das FE-Programm bestimmbar. Die Modellierung und Berechnung kann dabei auf unterschiedlichen Dimensionsebenen erfolgen, die in den Simulationen an den Entwurfsvarianten vergleichend gegenübergestellt werden, sodass durch die experimentellen Untersuchungen die Modelle validiert werden können. Die Modellierung und die anschließende Berechnung werden an eindimensionalen Stabwerken, flächigen Schalen und Volumenbauteilen durchgeführt (Tabelle 7-1). Somit können unterschiedliche Komplexitätsgrade der Modellierung und der Berechnung verglichen und auf deren Ergebnisqualität bewertet werden.

Bei der Stabwerkssimulation wird die Wand auf einen einzelnen Stab mit einem idealisierten Querschnitt reduziert. Die einzelnen Steifigkeiten der unterschiedlichen Materialien innerhalb der Wand können durch einen äquivalenten Querschnitt approximiert werden, wie bereits in [54] beschrieben. Mit der Reduktionszahl n wird der E-Modul des Betons mit geringer Rohdichte E_i ins Verhältnis zum E-Modul des Betons mit höchster Dichte E_{MI} gesetzt. Mit diesem Faktor kann eine äquivalente Breite oder Dicke des höherfesten Materials bestimmt werden, welches eine äquivalente Gesamtsteifigkeit zum Querschnitt mit niedriger Rohdichte besitzt. Dadurch wird die numerische Simulation des Wandaufbaus mit nur einem Material möglich.

$$n = E_i / E_{MI} \quad (7.3)$$

In der Simulation unter Verwendung von Schalenelementen wird die Wand als ebenes Element angenähert, wobei die Wandstärke durch die Schalendicke abgebildet wird. Dabei kann die Schale aus einzelnen Lagen unterschiedlicher Materialien in Form eines Verbundwerkstoffes aufgebaut werden. Dies ermöglicht die Modellierung mehrlagiger Sandwichbauteile. Für eine exakte Abbildung der Materialverteilung im Bauteilinneren kann die Gesamtwand als ein Volumenmodell aufgebaut werden. Dabei wird die Wand aus einzelnen Volumenelementen modelliert, denen die jeweiligen Materialeigenschaften entsprechend einem individuell konfigurierbaren Materialmodell zugewiesen werden können. Der Werkstoff Beton wird in den Simulationen vereinfachend über ein linear elastisches Materialmodell abgebildet.

Tabelle 7-1: Unterschiedliche Modellierungsansätze zum Nachweis der Tragfähigkeit

Eindimensional: Stabwerk	Flächig: Schale	Als Volumenkörper
		
<p>Zweiknotiges Balkenelement: B21 (Abaqus-Bezeichnung)</p>	<p>Vierknotiges Schalenelement: S4R (Abaqus-Bezeichnung)</p>	<p>Achtknotiges Volumenelement: C3D8 (Abaqus-Bezeichnung)</p>

Die Untersuchungen zur Tragfähigkeit umfassen die Bestimmung der kritischen Knicklast des Gesamtquerschnitts und den Spannungsnachweis. Die Ermittlung der Knicklast erfolgt in der Finite-Elemente-Analyse durch Lösung des 1. Eigenwertproblems im Rahmen einer numerischen Stabilitätsanalyse. Der Knickeigenwert beschreibt den Lastfaktor, der mit der gegebenen Last multipliziert, die Knicklast ergibt [55]. Aus diesem Grund wird in der Stabilitätsanalyse eine Einzellast auf das System aufgebracht. Diese ist im Stabmodell eine Punktlast, im Flächenmodell eine Linienlast und im Volumenmodell ein Flächenlast. Die Berechnung der Knicklast in der FE-Methode basiert auf der Euler'schen-Formel nach Gl. 4.6.

$$[\lambda G(u) - K]\Phi = 0 \tag{7.4}$$

Zudem wird überprüft, ob ein Spannungsversagen des Bauteils eintritt. Hierzu wird der Materialausnutzungsgrad aus dem Quotienten der Normalspannung in z-Richtung σ_{zz} und der Druckfestigkeit des Materials f_{cd} gebildet. Ist der Wert größer als 1, so tritt ein Spannungsversagen auf.

$$util = \frac{\sigma_{zz}}{f_{cd}} \leq 1 \tag{7.5}$$

7.2.2 Wärmefluss

Die Finite-Element Methode bietet sich ebenfalls an, um den Wärmefluss innerhalb eines Bauteils zu bestimmen [56], [57]. Hierzu wird auch das Programm *Abaqus* eingesetzt. Dabei wird lediglich der Wandquerschnitt unter Vernachlässigung der Bauteilhöhe modelliert. Die Vernetzung des 2D-Bauteils erfolgt durch 4-knotige Elemente mit linearer Ansatzfunktion vom Typ DC2D4. Als Beanspruchung wird eine Einheitstemperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenseite von $\Delta T = 1\text{ }^\circ\text{C}$ aufgebracht. Der Wärmedurchlasswiderstand der Wand lässt sich in der numerischen Simulation aus der aufgebrachten Temperaturdifferenz und dem durchschnittlichen Wärmefluss P_{th} bestimmen. Der durchschnittliche Wärmefluss ist die Summe aller diskreten Wärmeflüsse der einzelnen Finite-Elemente, dividiert durch die Anzahl aller Elemente.

$$\frac{1}{R_n} = \frac{P_{th}}{\Delta T} \tag{7.6}$$

$$\text{mit: } P_{th} = \frac{\sum_n HFL}{n} \tag{7.7}$$

7.3 Mikrogradierte Sandwichwand

7.3.1 Allgemeine Lösung der Optimierungsaufgabe

Die Lösung der Optimierungsaufgabe zur Bestimmung der idealen Materialverteilung im Wandbauteil erfordert zunächst die Festlegung der Entwurfsrandbedingungen für Geometrie und Material. Die Geometrierandbedingungen sind durch die Wahl des Referenzsystems (Bauteilhöhe: $h = 3,0\text{ m}$ und Bauteilbreite: $b = 1,0\text{ m}$) festgelegt. Bei den Materialien stehen die unterschiedlichsten Mischungen mit unterschiedlichsten Eigenschaften zur Verfügung. Da diese das allgemeine Vorgehen nicht beeinflussen, sondern lediglich das Ergebnis, wird der Entwurf beispielhaft mit den Mischungen des schichtweisen Gießens durchgeführt. Die dadurch zur Verfügung stehenden Betoneigenschaften (Wärmedurchlasswiderstand und E-Modul) sind in Abhängigkeit der Rohdichte in Abbildung 45 dargestellt.

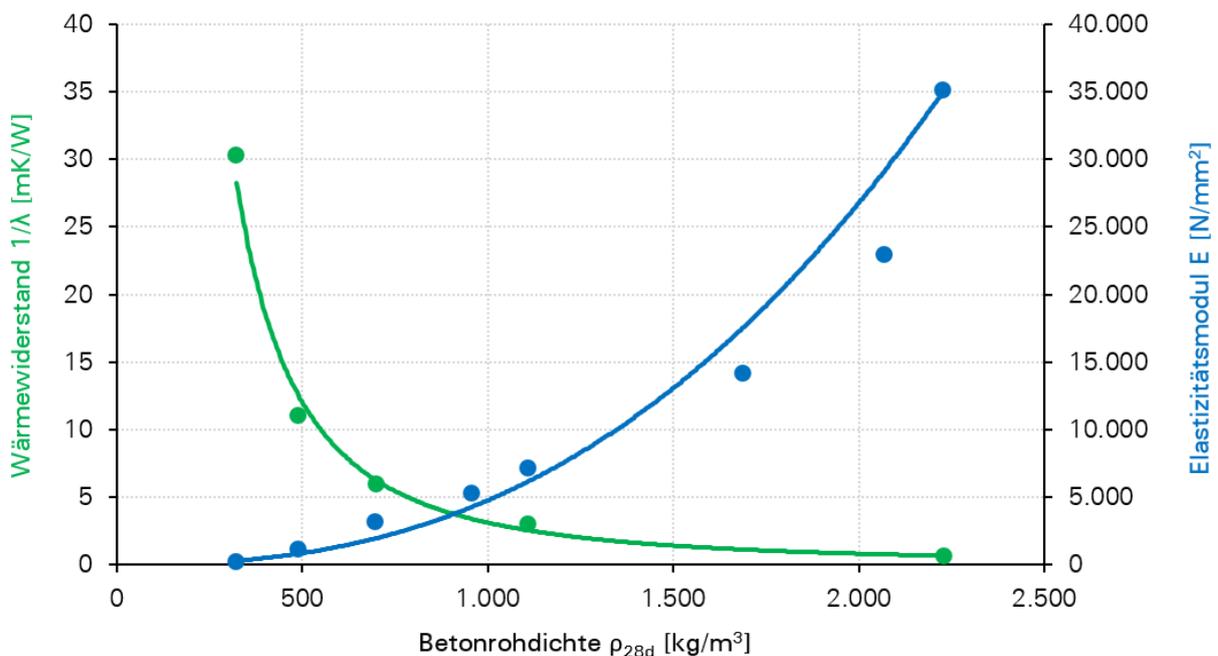


Abbildung 45: Wärmewiderstand und E-Modul in Abhängigkeit der Rohdichte für die Betonmischungen des schichtweisen Gießens

Es ist zu erkennen, dass der Wärmewiderstand mit niedriger Rohdichte exponentiell zunimmt, wohingegen der E-Modul und die Druckfestigkeit stark abnehmen. Der Bauteilentwurf mit dem Ziel der Gewichtsmminimalität unter Einhaltung von Tragfähigkeit und Wärmedämmung wird lediglich von den in Abbildung 45 dargestellten Materialkennwerten beeinflusst. Die Konsequenz ist, dass für eine Wand mit einem Minimum an Gewicht lediglich die beiden Referenzmischungen MI_{SG} und $MII_{SG}(AM)$ eingesetzt werden, da sie für die jeweilige Anforderung die besten Eigenschaften besitzen. Um die erforderlichen Schichtdicken der Materialien und folglich die Wandstärke zu bestimmen, kann zunächst eine Sensitivitätsanalyse für den Nachweis der Tragfähigkeit und des Wärmeschutzes durchgeführt werden. Dadurch wird bereits im Vorfeld ersichtlich, welche Volumenanteile der beiden Mischungen am Gesamtquerschnitt notwendig sind. Zugleich kann die Einhaltung der zulässigen Gesamtwandstärke geprüft werden.

Ausgangspunkt der Untersuchung bildet die Referenzgeometrie der Wand mit einer zulässigen Dicke von 36,5 cm. Abbildung 46 stellt die Sensitivität des Wärmedurchlasswiderstands der reinen Wand bei gegebener Dicke in Abhängigkeit des Volumenanteils der wärmedämmenden Basismischung $MII_{SG}(AM)$ dar. Die rote Kurve beschreibt den Grenzwert $1/R_n \leq 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$. Wird die Wandstärke beispielsweise zu 36,5 cm gewählt, so bildet der Kurvenschnittpunkt von Wandstärke und Grenzwert das jeweilige Optimum ab. In diesem Beispiel sind rund 40 % der Wanddicke mit dem wärmedämmenden Beton $MII_{SG}(AM)$ auszubilden, damit die Anforderungen an den Wärmeschutz eingehalten werden.

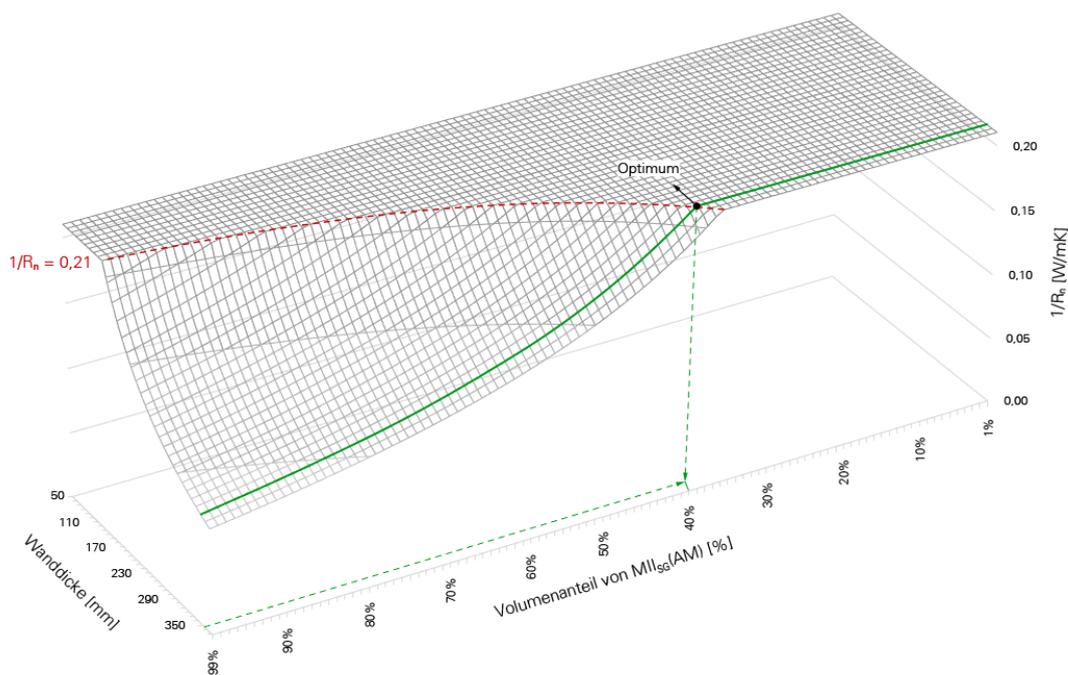


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Wandstärke, Wärmedurchlasswiderstand und Volumenanteil der Betonmischung $MII_{SG}(AM)$

Für die zulässige Grenzsclankheit kann ein vergleichbares Diagramm in Abhängigkeit von Wandstärke und Volumenanteil an $MII_{SG}(AM)$ aufgestellt werden (Abbildung 47). Aus dem Schnittpunkt von Wandstärke und Schlankheit kann der Volumenanteil der Basismischung $MII_{SG}(AM)$ an der Wandstärke bestimmt und folglich der prozentuale Anteil der tragfähigen Mischung MI_{SG} ableiten. Für das Beispiel der 36,5 cm dicken Wand liegt der maximal zulässige Anteil von $MII_{SG}(AM)$ bei ca. 67 % und führt zu einem Volumenanteil von 33 % für die hochfeste Basismischung MI .

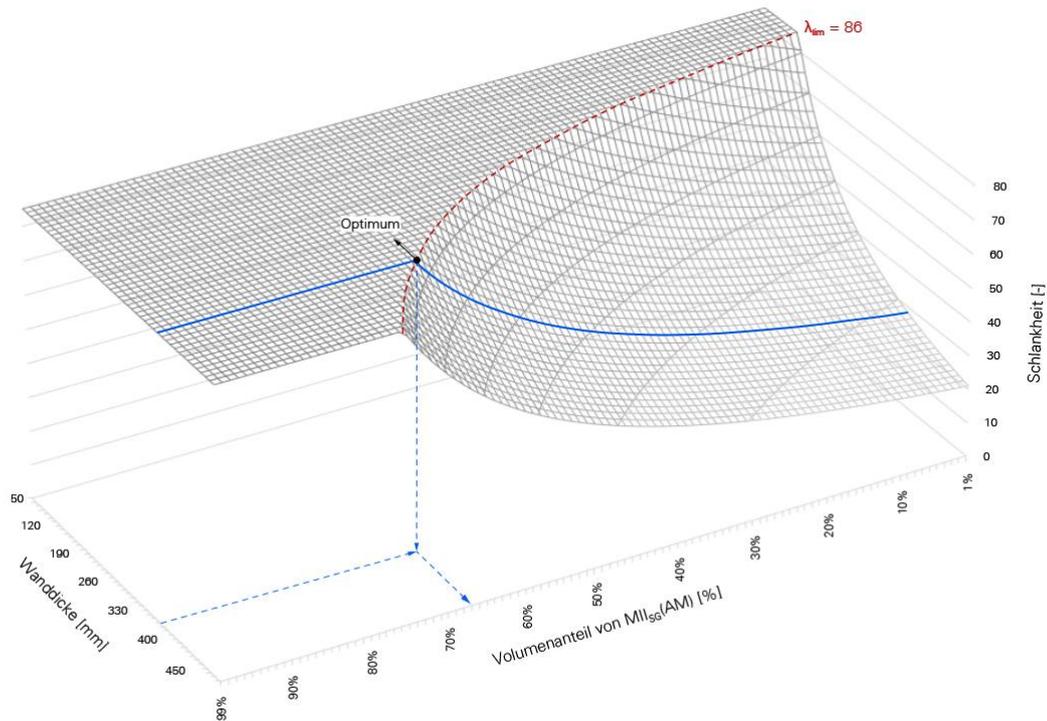


Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Wandstärke, Schlankheit und Volumenanteil der Betonmischung MIIsg(AM)

Werden die beiden Optimierungskurven für die gleiche Wandstärke überlagert, so kann überprüft werden, ob der Aufbau alle Anforderungen einhält und ob ein weiteres Potential zur Gewichtsreduktion besteht. Abbildung 48 stellt detailliert die Überlagerung für die 36,5 cm dicke Wand dar. In Abhängigkeit des Volumenanteils von MIIsg(AM) ergeben sich die Funktionskurven für die Schlankheit λ (blau) und den Wärmedurchlasswiderstand $1/R_n$ (grün). Durch Hinzufügen der Grenzwerte für Schlankheit $\lambda_{lim} = 86$ und Wärmedämmung $1/R_n \leq 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ kann der mögliche Optimierungsbereich definiert werden. Dieser ergibt sich zwischen den beiden lokalen Optima für Wärmewiderstand und Schlankheit im Wertebereich zwischen rund 40 Vol. % und 65 Vol. % der Mischung MIIsg(AM) an der Gesamtwandstärke. Das globale Optimum der minimalen Bauteildicke wird erreicht, wenn sich die beiden lokalen Optima für Festigkeit und Wärmewiderstand bei gleichem Volumenanteil der Basismischung MIIsg(AM) treffen.

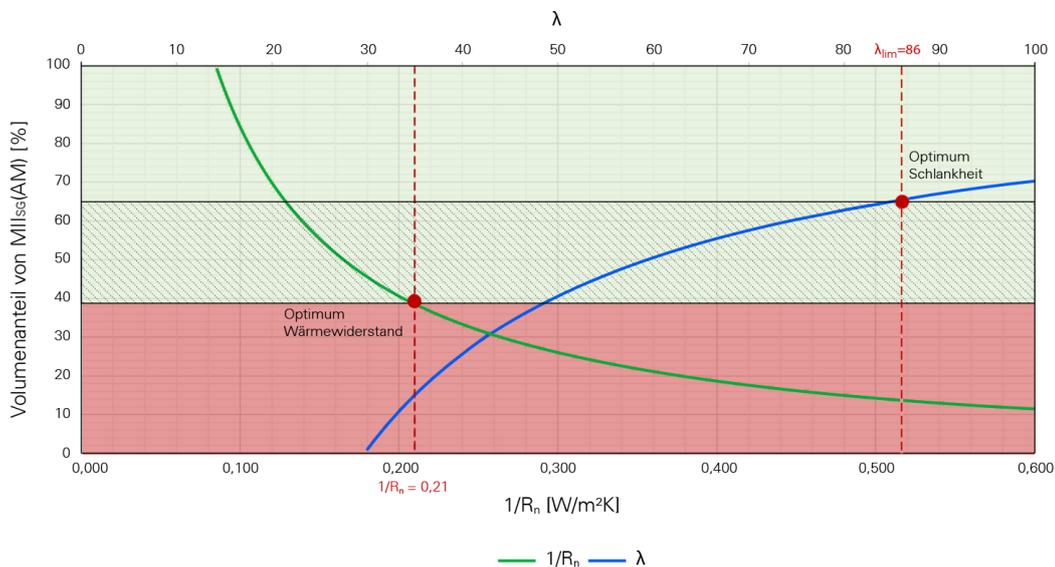


Abbildung 48: Optimierungsbereich zur Bestimmung der minimalen Wandstärke

Die optimale Wanddicke lässt sich ermitteln, indem die Differenz zwischen maximalem und minimalem Volumenanteil von $MII_{SG}(AM)$ der Gesamtwand bei veränderlicher Wandstärke bestimmt wird. Wenn diese Differenz den Wert 0 annimmt, ist das globale Optimum erreicht. Unter oben genannten Entwurfsrandbedingungen beträgt die minimale Wanddicke 26 cm (Abbildung 49, links), die sowohl den Anforderungen der Tragfähigkeit als auch des Wärmeschutzes gerecht wird. Für diese Wandstärke liegt der Volumenanteil der leichten Mischung $MII_{SG}(AM)$ bei 57 % und für die schwere Mischung MI_{SG} bei 43 % (Abbildung 49, rechts). Der optimale Entwurf besteht somit aus einer ca. 12 cm starken Schicht der Basismischung MI_{SG} und einer rund 14 cm dicken Schicht der Basismischung $MII_{SG}(AM)$.

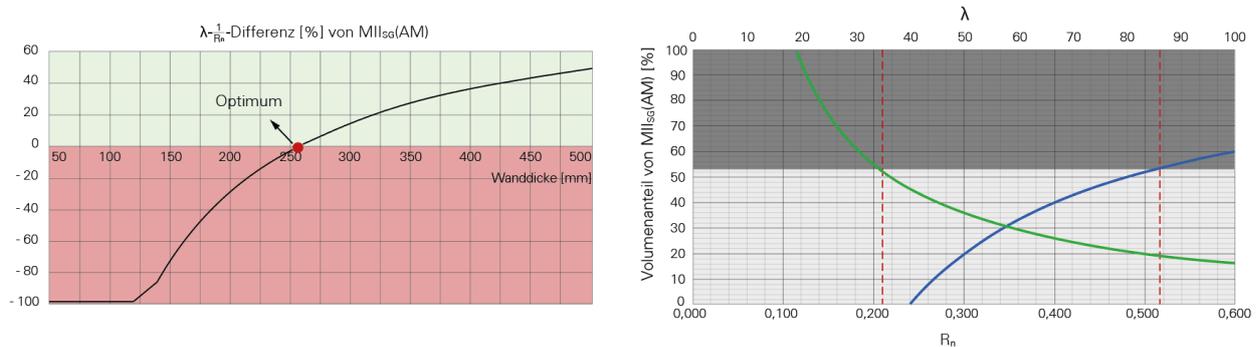


Abbildung 49: Optimierungsergebnis der minimalen Wandstärke (links) mit zugehöriger Materialverteilung (rechts)

Durch die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems wird ein rein von den Randbedingungen abhängiger Entwurfsansatz aufgestellt. Dieser ermöglicht es, bei einer Veränderung der Eingangsgrößen immer die minimale Wandstärke zu bestimmen, die den Anforderungen der Tragfähigkeit und der Wärmedämmung gerecht wird. Unter Einsatz der vom IWB entwickelten Betonmischungen für das Nassspitzen wäre die allen Anforderungen gerecht werdende Wandstärke 120 cm. Sie könnte lediglich aus der Basismischung MII ausgebildet werden.

7.3.2 Materialverteilung

Das Ergebnis der Optimierung stellt zunächst eine Materialstärke für zwei unterschiedliche Mischungen ohne Gradierung. Daher kann lediglich eine Aussage getroffen werden, wie groß die Schichtstärken der einzelnen Materialien sein müssen aber nicht wie diese idealerweise im Bauteil angeordnet sind. Eine naheliegende Verteilung des Materials, um allen Anforderungen gerecht zu werden, ist ein Sandwichaufbau. Dabei besteht die Wand aus zwei Deckschichten zu je 6 cm aus der Mischung MI und einem 12 cm dämmenden Kern der Mischung MII (Abbildung 50). Unter Vernachlässigung von Schwind- und Temperaturdehnungen stellt diese Verteilung für die Wand ein erstes Gewichtsminimum mit einer flächenbezogenen Masse von 280 kg/m^2 dar.

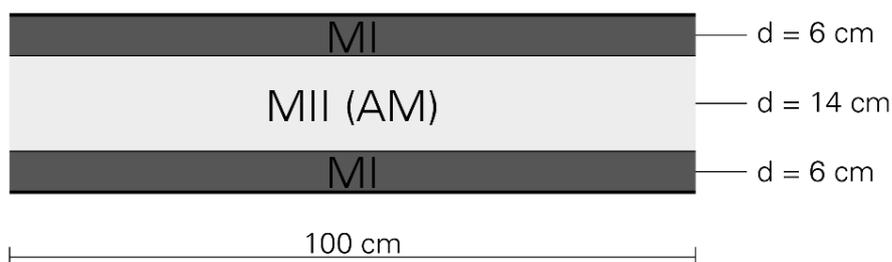


Abbildung 50: Sandwichaufbau



Der Nachweis der Tragfähigkeit unter Normalkraftbeanspruchung ist für den gradierten Sandwichtaufbau nicht normativ geregelt. Die folgenden Ausführungen sollen daher einen Überblick möglicher Berechnungsansätze aufzeigen, die unterschiedliche Annahmen des Tragverhaltens berücksichtigen. Durch eine experimentelle Validierung wird letztlich ein geeigneter Ansatz für den Nachweis identifiziert. Der vereinfachte Berechnungsansatz nach DIN EN 1992-1-1 für monolithische Betonwände (4.10) lässt zwei mögliche Annahmen zur Berechnung der Tragfähigkeit unter Annahme eines vollständigen Verbunds des Gesamtquerschnitts zu. Einerseits kann die Tragfähigkeit lediglich anhand des Querschnitts der beiden Deckschichten (DS-120) berechnet werden, andererseits mit einem idealisierten Querschnitt unter Berücksichtigung des Kerns (IQideal). Aufgrund des sehr niedrigen E-Moduls der Kernschicht aus Aerogelbeton ist der Steifigkeitszuwachs nur gering. Somit ergibt sich eine charakteristische Tragfähigkeit des Wandaufbaus von $N_{Rk,\lambda,DS-120} = 3.448 \text{ kN}$ ($\Phi = 0,5$) für die beiden Deckschichten bzw. $N_{Rk,\lambda,IQideal} = 3.483 \text{ kN}$ ($\Phi = 0,5$) für den idealisierten Querschnitt. Damit weist der Wandaufbau eine wesentlich höhere Tragfähigkeit gegenüber der angenommenen Einwirkung von $N_{ed} = 155 \text{ kN}$ auf, sodass weiteres Optimierungspotential des Querschnitts vorhanden ist.

Die numerische Simulation erfolgt in einem ersten Schritt ohne Berücksichtigung von Imperfektionen und Einflüssen aus Theorie II. Ordnung, um die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellierungsansätze mit den charakteristischen Tragfähigkeiten nach DIN EN 1992-1-1 zu vergleichen. Bei den Stabwerksmodellen werden vier unterschiedliche Querschnittskonfigurationen untersucht: 1D_DS60 (Summation der Einzeltragfähigkeit der Deckschichten), 1D-DS120 (Gesamttragfähigkeit beider Deckschichten), 1D-RQideal (Idealisierung des Kerns über Schichtdicke) und 1D-IQideal (Idealisierung des Kerns über Schichtbreite). In der Simulation mit Schalenelementen sowie Volumenelementen wurden jeweils drei Konfigurationen untersucht: je zwei Varianten für die beiden Deckschichten (2D-DS60 und 3D-DS60 sowie 2D-DS120 und 3D-DS120) und der reale Schichtaufbau (2D-real und 3D-real). Die Ergebnisse der numerischen Berechnung zur Knicklast sind für die unterschiedlichen Varianten in Tabelle 7-2 zusammengefasst.

Tabelle 7-2: Zusammenfassung der linear-elastischen Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit

Stab 1D	1D-DS60 $P_{kr} = 1.384 \text{ kN}$	1D-DS120 $P_{kr} = 5.521 \text{ kN}$	1D-RQideal $P_{kr} = 5.688 \text{ kN}$	1D-IQideal $P_{kr} = 43.547 \text{ kN}$
Schale 2D	2D-DS60 $P_{kr} = 1.390 \text{ kN}$	2D-DS120 $P_{kr} = 5.539 \text{ kN}$	2D-real $P_{kr} = 13.503 \text{ kN}$	
Volumen 3D	3D-DS60 $P_{kr} = 1.006 \text{ kN}$	3D-DS120 $P_{kr} = 5.002 \text{ kN}$	3D-real $P_{kr} = 17.624 \text{ kN}$	

Die linear-elastischen Berechnungen mit der Finite-Element-Methode weisen gegenüber dem Ansatz nach Norm grundsätzlich eine höhere Tragfähigkeit auf. Bei identischen Randbedingungen liegt die Knicklast in den Simulationen von DS120 um ca. 50 % über der Tragfähigkeit nach Norm. Gründe hierfür sind die Vernachlässigung der Außermittigkeit beim Lastansatz, Auswirkungen aus Theorie II. Ordnung und Kriechen. Unter der Bedingung, dass die einzelnen Schichten einen vollständigen Verbund besitzen und die Wand als ein monolithisches Bauteil die Last abträgt, kann eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit auf bis zu 17.624 kN verzeichnet werden. Bei solch hohen Tragfähigkeiten ist ein Stabilitätsversagen nicht mehr maßgebend, weshalb das Bauteil auf die maximal zulässigen Spannungen ausgelegt werden muss.

In einem zweiten Schritt werden in der Simulation zusätzlich Imperfektionen berücksichtigt und das System nach Theorie II. Ordnung berechnet. Imperfektionen können nach Norm durch eine horizontale Ersatzlast berücksichtigt werden, die an der Position angreift, die das maximale Moment erzeugt. Für ausgesteifte Systeme beträgt diese:



$$H_i = 2 \cdot \theta_i \cdot N \tag{7.8}$$

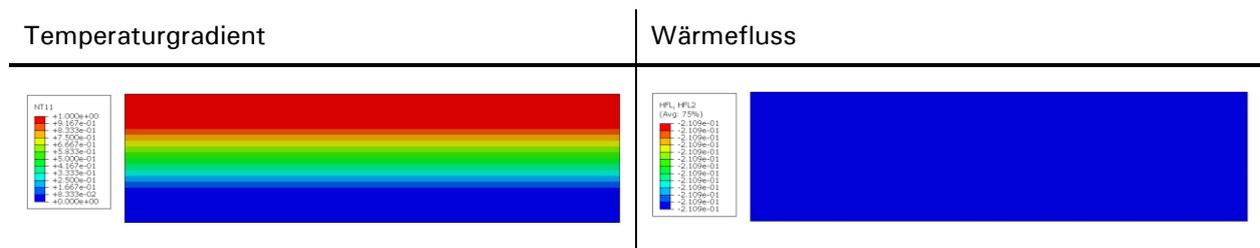
Dabei ist N die einwirkende Normalkraft und $\theta_i = 1/200$ die Imperfektion aus Schiefstellung. Für die Berechnung der abgeminderten Tragfähigkeit aufgrund von Imperfektion und Einflüssen aus der Theorie II. Ordnung steht in der FEM-Software keine direkte Lösungsmethode zur Verfügung. Die Reduktion der Traglast kann über eine statische und geometrisch nichtlineare Berechnung unter Einwirkung der maximalen Knicklast und der horizontalen Ersatzlast erfolgen. Die Lastaufbringung erfolgt dabei stufenweise bis die maximal zulässige Druckspannung des Betons erreicht wird. Anhand des sich ergebenden Skalierungsfaktors der Lastaufbringung kann die verminderte Tragfähigkeit bestimmt werden. Um die Vergleichbarkeit zur Norm sicherzustellen, wurden die Simulationen für die Modelle mit 12 cm Deckschicht unter Berücksichtigung der Imperfektionen durchgeführt. Die Berechnung erfolgt sowohl nach Theorie I. Ordnung als auch nach Theorie II. Ordnung. Die Ergebnisse der Simulation (Tabelle 7-3) zeigen, dass die Berücksichtigung der Imperfektionen die Tragfähigkeit um bis zu 10 % reduziert. Wird die Berechnung nach Theorie II. Ordnung durchgeführt, so ist die Tragfähigkeit bei der 2D- und 3D-Modellierung vergleichbar mit den zuvor berechneten Tragfähigkeiten nach Norm und stellt an dieser Stelle einen hinreichend genauen Berechnungsansatz dar. In den weiteren experimentellen Untersuchungen gilt es diesen noch zu bestätigen.

Tabelle 7-3: Zusammenfassung der erweiterten Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit

	Imperfektion Theorie I. Ordnung	Imperfektion Theorie II. Ordnung
Stab 1D	1D-DS120 $P_{kr} = 5.521 \text{ kN}$	1D-DS120 $P_{kr} = 4.803 \text{ kN}$
Schale 2D	2D-DS120 $P_{kr} = 4.985 \text{ kN}$	2D-DS120 $P_{kr} = 3.545 \text{ kN}$
Volumen 3D	3D-DS120 -	3D-DS120 $P_{kr} = 3.551 \text{ kN}$

Die thermischen Simulationsergebnisse des Sandwichtaufbaus (Tabelle 7-4) decken sich mit den analytisch berechneten Ergebnissen zum Wärmewiderstand. Das Temperaturgefälle im Bauteil nimmt linear ab und zeigt die größte Abnahme im inneren Kern. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus kommt es zu keinen Wärmebrücken innerhalb der Wand. Gemäß Gleichung 7.6 ergibt sich ein Wärmedurchgangswiderstand für das Sandwichbauteil von $1/R_n \leq 0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung der thermischen Simulationsergebnisse



7.3.3 Querschnittsoptimierung zur Gewichtsreduktion

Die analytischen Berechnungsergebnisse sowie die Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit des Sandwichaufbaus weisen ein weiteres Optimierungspotential des Querschnitts. Dies betrifft Anpassung der Deckschichten zur Reduktion des Bauteilgewichts. Die Simulationen zur Tragfähigkeit zeigen ein dominierendes Stabilitätsversagen der Wandbauteile, weshalb eine Steifigkeitsoptimierung zur Gewichtsreduktion zielführend erscheint. Mit der Steifigkeitsoptimierung kann entweder die Knickstabilität bei gleichem Materialeinsatz erhöht oder bei gleicher Leistungsfähigkeit der Materialeinsatz reduziert werden. Anhand der folgenden Sensitivitätsstudie soll das allgemeine Vorgehen und das Potential der Steifigkeitsoptimierung verdeutlicht werden (Abbildung 51). Ausgangspunkt bildet ein Sandwichaufbau mit jeweils einer 12 cm starken Deckschicht.

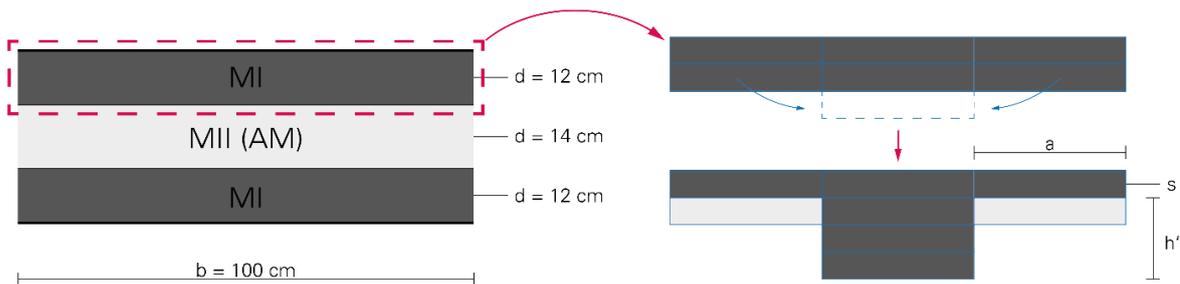


Abbildung 51: Materialumverteilungsstrategie zur Steifigkeitsoptimierung

In einem ersten Schritt wird, ausgehend vom Rechteckquerschnitt unter Verwendung des gleichen Betonvolumens, die Steifigkeit erhöht. Dies erfolgt durch eine Materialumverteilung hin zu einem T-Querschnitt. Als mögliche Optimierungsparameter stehen die Stegbreite $t = b - 2a$, die Steghöhe h' und die Flanschdicke s zur Verfügung. Zunächst soll der Querschnitt bei konstantem $t = b/3$ und $s = 6 \text{ cm}$ durch eine Variation der Steghöhe untersucht werden. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 52 dargestellt. Eine Erhöhung des Stegs bewirkt auf der einen Seite eine Vergrößerung des Flächenträgheitsmoments und folglich eine reduzierte Schlankheit und auf der anderen Seite nimmt das Bauteilgewicht linear zu, wodurch die Masseneinsparung gegenüber der Referenzauslegung abnimmt. Bei dem in Abbildung 51 dargestellten Fallbeispiel beträgt die Steghöhe 71 mm bei der das Gewichtsminimum mit einer Massenreduktion von 28 % vorliegt.

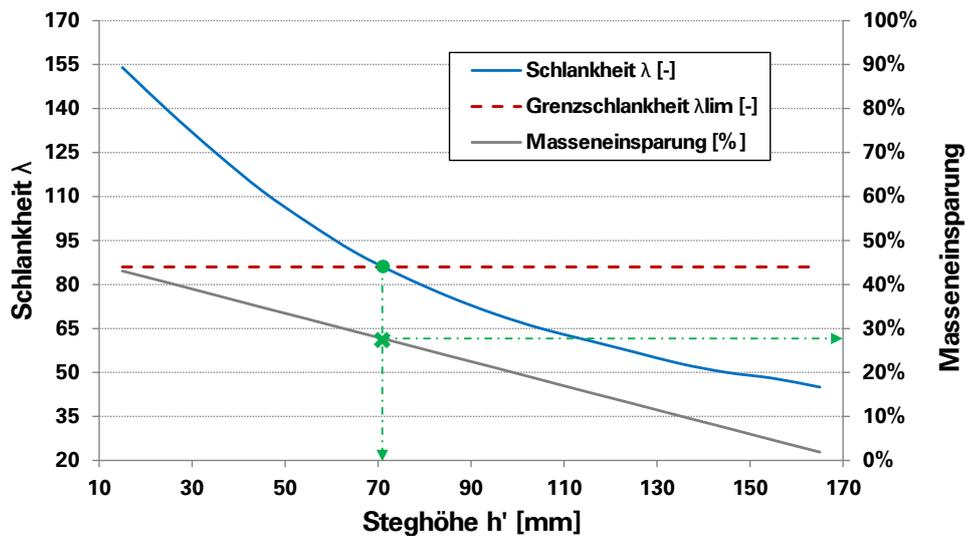


Abbildung 52: Masseneinsparpotential bei Steifigkeitsoptimierung der Deckschicht



Die Anordnung der Stege im Bauteil muss unter Berücksichtigung von Wärmebrücken erfolgen. Als Versatz der Stege wird ein Wert von $b/2$ gewählt. Im zweiten Schritt wird die Deckschicht für die kritische Knicklast optimiert, um die Wandstärke und folglich den Ressourceneinsatz des Gesamtbau­teils zu minimieren. Im Folgenden wird der steifigkeitssteigernde Steg für das Erreichen eines Ge­wichtsminimums optimiert.

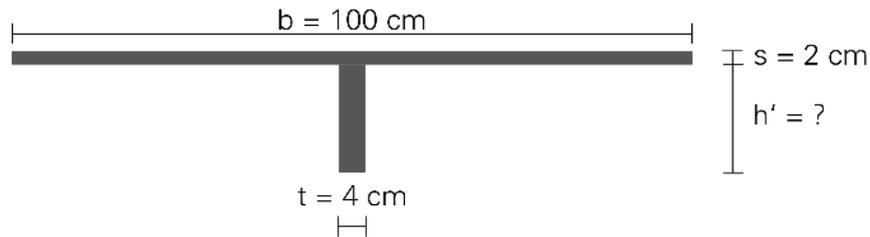


Abbildung 53: Geometrie des zu optimierenden T-Querschnitts

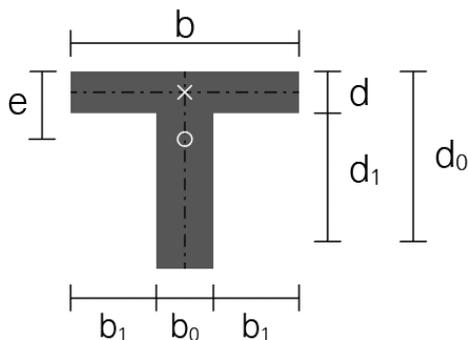
Die Querschnittsmodifikation kann vereinfachend unter der Hypothese gleicher Knicklasten P_{kr} erfolgen.

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2} \quad (7.9)$$

Da der E-Modul E und die Knicklänge l_0 für die weitere Optimierung als konstant angenommen werden können, erfolgt über die Gleichheit des Flächenträgheitsmoments I die Bestimmung der Querschnitts­geometrie. Die Berechnung des Flächenträgheitsmoments für einen T-Querschnitt ist in Tabelle 7-5 zusammengefasst. Das Ergebnis der Optimierung der Querschnittsgeometrie ist in Abbildung 54 dar­gestellt. Die Masse konnte beim T-Querschnitt gegenüber dem Sandwich der Variante 1 um knapp 50 % reduziert werden.

Tabelle 7-5: Flächenträgheitsmoment des untersuchten Querschnitts

T-Querschnitt



$$I_y = \frac{2b_1 d^3 + b_0 d_0^3}{3} - A e^2$$

$$\text{mit: } A = db + d_1 b_0$$

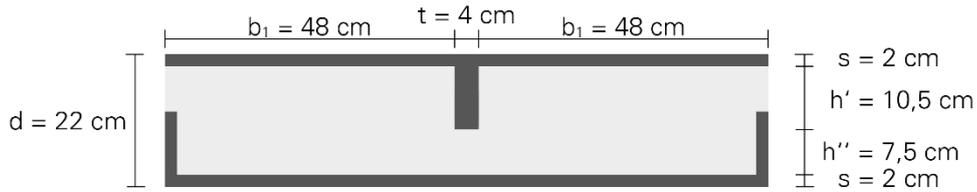


Abbildung 54: Querschnitte der steifigkeitsoptimierten Wand

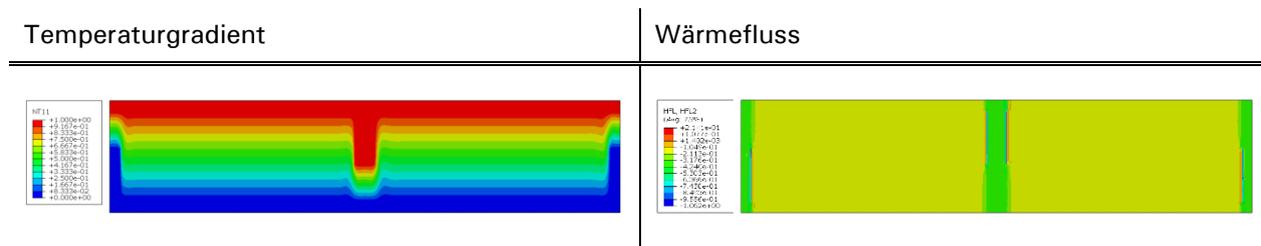
Durch die Querschnittsoptimierung auf Basis der Hypothese gleicher Knicklasten wird für die Deckschichten die gleiche Steifigkeit erreicht, allerdings kann sich beim Gesamtquerschnitt die Tragfähigkeit ändern. Um die Tragfähigkeit der beiden Aufbauten zu vergleichen, wurden ebenfalls numerische Simulationen mit der FE-Methode durchgeführt. Der Modellaufbau inklusive Lasteinleitung, Imperfektionen und Berücksichtigung Theorie II. Ordnung ist analog zum vorherigen Sandwichaufbau mit konstanten Deckschichten durchgeführt worden. Die vergleichenden Berechnungsergebnisse sind hierzu in Tabelle 7-6 zusammengefasst. Der T-Querschnitt weist letztlich eine geringere Tragfähigkeit als das Sandwich auf. Dennoch ist der Widerstand des T-Querschnitts ausreichend für die festgelegte Belastung.

Tabelle 7-6: Zusammenfassung der erweiterten Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit

	Sandwich	T-Querschnitt
Stab 1D	1D-DS120 $P_{kr} = 4.803 \text{ kN}$	1D-T
Schale 2D	2D-DS120 $P_{kr} = 3.545 \text{ kN}$	2D-T
Volumen 3D	3D-DS120 $P_{kr} = 3.551 \text{ kN}$	3D-T $P_{kr} = 1.159 \text{ kN}$

Bei der Variante mit T-Querschnitt können sich aufgrund der ins Bauteilinnere reichenden Stege Wärmebrücken ausbilden, die den Wärmewiderstand des Bauteils negativ beeinflussen. Um dies auszuschließen, müssen jeweils die kritischen Pfade in der Konstruktion nachgewiesen werden. Alternativ ist auch ein Nachweis durch eine thermische Simulation zulässig. Die Ergebnisse verdeutlichen die Annahme und bestätigen Singularitäten des Wärmeflusses an den Stegen. Bei der Simulation wird ein Wärmedurchgangswiderstand für den optimierten Sandwichaufbau von $1/R_n = 0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht. Dieser liegt unter den gestellten Anforderungen.

Tabelle 7-7: Zusammenfassung der thermischen Simulationsergebnisse der Variante 2 mit T-Querschnitt



7.3.4 Kompensation von Schwind- und Temperaturdehnungen

Die beiden zuvor präsentierten Querschnittsvarianten wurden unter der Annahme eines perfekten Verbundes der Schichten entworfen. Zeit- und temperaturabhängige Dehnungen und daraus resultierende Spannungen sollen im Folgenden für den Entwurf multifunktional gradierter Wandbauteile analysiert werden. Die lastunabhängigen Dehnungskomponenten können in den Anteil aus Schwinden ε_{cs} und den Anteil aus Temperatur ε_t aufgeteilt werden, die im Folgenden zuerst getrennt betrachtet werden. Das Ziel des mehrschichtigen gradierten Aufbaus muss es sein, die Dehnungen zwischen den Schichten auf ein Minimum zu begrenzen, sodass die entstehende Schubspannung τ_{Ed} unter der aufnehmbaren Schubfestigkeit τ_{Rd} des Materials liegt. Die Berechnung der Schwinddehnung ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig, aus denen sich mögliche Optimierungsparameter für den idealen Schichtübergang ableiten lassen. Die Schwinddehnungen für die Betonmischungen des schichtweisen Gießens wurden unter den folgenden Anfangsrandbedingungen ermittelt: Zementfestigkeitsklasse 52,5 N, relative Luftfeuchte von 80 %, Betonalter nach 50 Jahren, Trocknungsbeginn nach 2 Tagen und einer Bauteilhöhe von 3 m bei einer Schichtdicke von 2 cm. Abbildung 55 stellt die unterschiedlichen Schwindverformungen der Betonmischungen, die nach Norm berechnet wurden, einander gegenüber. Die Basismischung MI_{SG} weist die geringste Schwinddehnung von -434 $\mu\text{m}/\text{m}$ auf. Die größte Schwinddehnung liegt bei der Basismischung MII_{SG}(AM) mit -663 $\mu\text{m}/\text{m}$ vor. Diese Gegenüberstellung lässt erkennen, dass bei dem Sandwichaufbau eine große Dehnungsdifferenz durch ein unterschiedliches Schwindverhalten der beiden Schichten vorliegt. Diese überschreitet die zulässige Dehnung deutlich, sodass mit einer Delamination der einzelnen Schichten gerechnet werden muss.

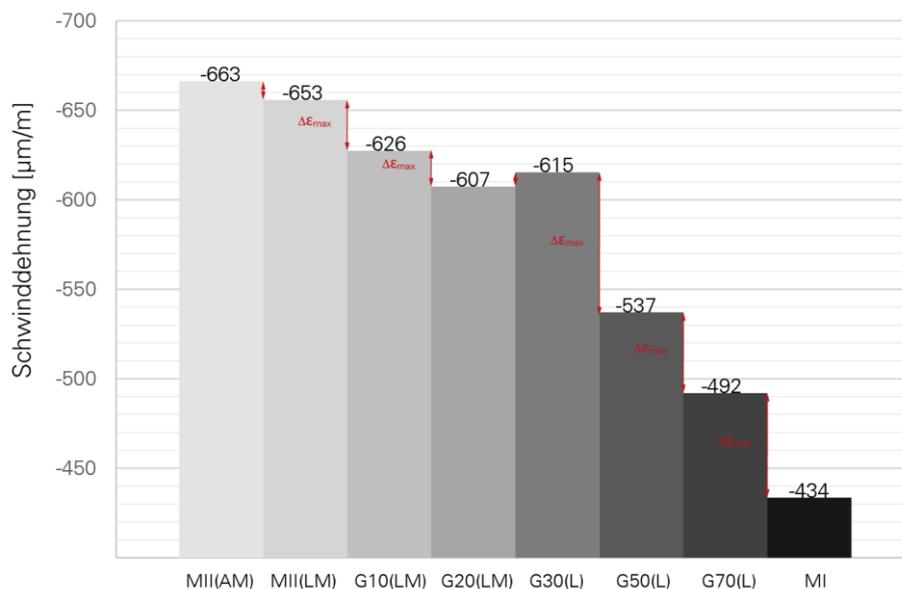


Abbildung 55: Schwinddehnung für die Betonmischungen der Gießtechnik nach 50 Jahren bei einer Schichtdicke von 20 cm

Um die Ursachen der Schwinddehnung besser zu verstehen und das Problem der Delamination auf Materialebene zu beheben, ist eine gesonderte Betrachtung der beiden Schwindanteile erforderlich. Abbildung 56 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse von Schrumpfen und Trocknungsschwinden für unterschiedliche Betonfestigkeiten und Schichtstärken. Beim Schrumpfen geht der Dehnungsanteil bei zunehmender Schichtdicke unabhängig von der Betonfestigkeit leicht zurück. Die Schwinddehnung von -500 $\mu\text{m}/\text{m}$ ist für den leichten Beton bei minimaler Schichtdicke ca. doppelt so hoch wie bei MI. Beim Trocknungsschwinden ist eine gegenläufige Tendenz zu erkennen. Höherfeste Betone weisen eine deutlich ausgeprägte Schwinddehnung gegenüber niedrigfesten Betonen auf. Diese ist in erster Linie auf den höheren Zementanteil in den Mischungen und die höhere Zementfestigkeitsklasse zu-

rückzuführen. Ist dies bekannt, so kann folglich die Schwinddehnung durch eine Änderung der Zementfestigkeitsklasse des Betons bewusst gesteuert werden. Neben der Zementfestigkeitsklasse kann das Schwinden durch die Umgebungsfeuchte beeinflusst werden. Da die Umgebungsfeuchte durch eine entsprechende Lagerung der fertigen Bauteile im Werk in den ersten Tagen der Betonhärtung (bspw. Feuchtkammer) manipulierbar ist, kann in diesem Stadium auch auf die Schwinddehnung reagiert werden.

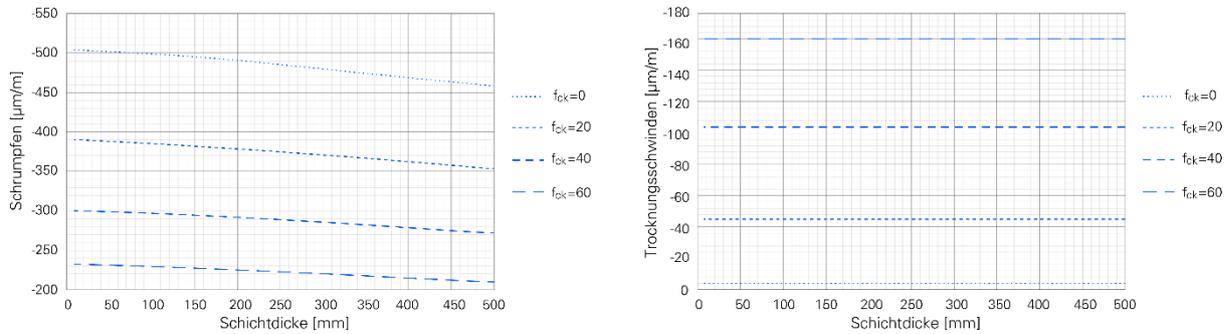


Abbildung 56: Schrumpfen (links) und Trocknungsschwinden (rechts) für unterschiedliche Betonfestigkeiten in Abhängigkeit der Schichtstärke

Aufbauend auf den zuvor dargestellten Ergebnissen soll die Dehnungsdifferenz durch eine theoretische Anpassung der Mischungszusammensetzung sowie die Definition von Lagerungszuständen auf ein zulässiges Maß begrenzt werden (Abbildung 57). Dieses Ergebnis wird durch eine Reduktion der Zementfestigkeitsklassen für die Mischungen MII_{SG}(AM) bis G30_{SG}(L) auf 32,5 N sowie für die Mischungen G50_{SG}(L) und G70_{SG}(L) auf 42,5 N erreicht. Zudem muss das Bauteile in den ersten beiden Tagen bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % lagern, bevor der Umgebungsfeuchte von 80 % ausgesetzt werden kann. Somit lassen sich auch gradierte Übergänge zwischen einzelnen Schichten erzielen, die letztlich eine größere Wandstärke im Vergleich zum Sandwichtaufbau besitzen werden.

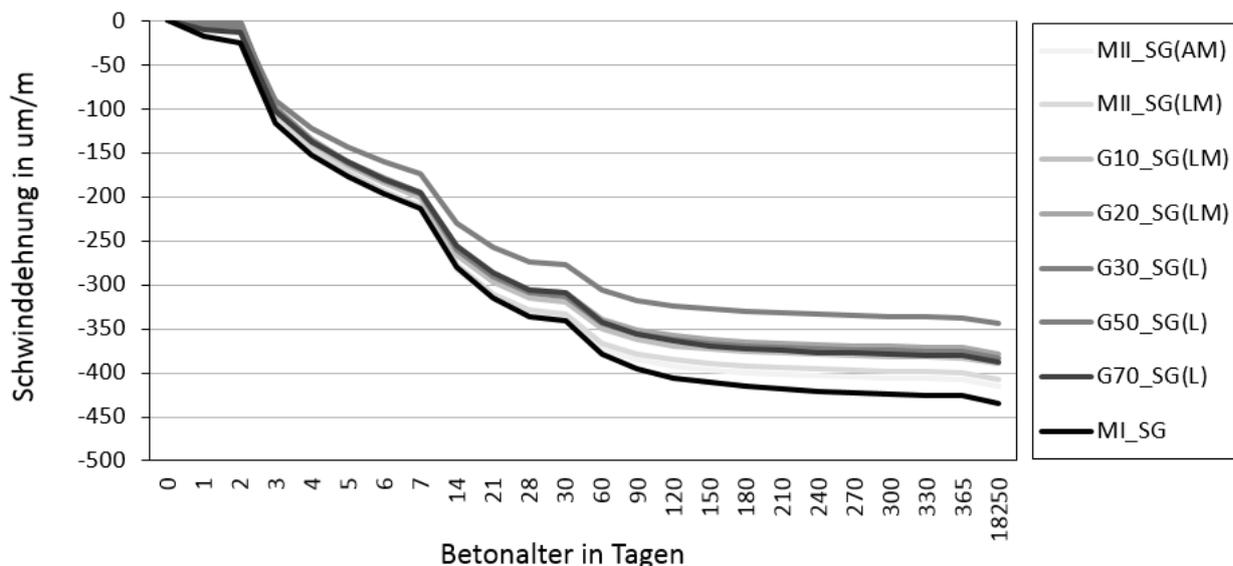


Abbildung 57: Schwinddehnungen in Abhängigkeit des Betonalters

Neben der Mischungsanpassung können die unterschiedlichen Schwinddehnungen durch eine konstruktive Bewehrung kompensiert werden, die letztlich die beiden Deckschichten schubsteif miteinander verbindet. Diese konstruktive Maßnahme bietet sich auch an, um temperaturbedingte Dehnungen aufzunehmen. Für die Bemessung müssen Schnittkräfte infolge Temperatur und Schwinden ermittelt

werden. Danach kann der Widerstand bestimmt werden, der die erforderliche Bewehrungsmenge sowie den Bewehrungsabstand definiert. Mit Hilfe eines statischen Ersatzsystems in Form eines Durchlaufträgers [58] (Abbildung 58) kann der erforderliche Bewehrungsgrad für die Kopplung der beiden Deckschichten berechnet werden. Die Stützweite a ergibt sich aus dem frei zu wählenden Bewehrungsabstand und b beschreibt die Breite des Plattenstreifens. Durch die Wahl des Achsabstands und des Plattenstreifens können die Momente m in der Deckschicht aus Temperatureinwirkung oder Schwinden auf ein Minimum reduziert werden. Aus den virtuellen Auflagerkräften A des Durchlaufträgers kann die erforderliche Bewehrungsmenge für die Deckschicht und der Anker berechnet werden.

$$m_T = \frac{E_{c,DS1} \cdot \alpha_T \cdot \Delta T}{12} \cdot d^2 \quad (7.10)$$

$$m_s = \frac{E_{c,DS1} \cdot \Delta \varepsilon_{s,1-i}}{12} \cdot d^2 \quad (7.11)$$

$$A = 1,5 \cdot m \cdot \frac{b}{a} \quad (7.12)$$

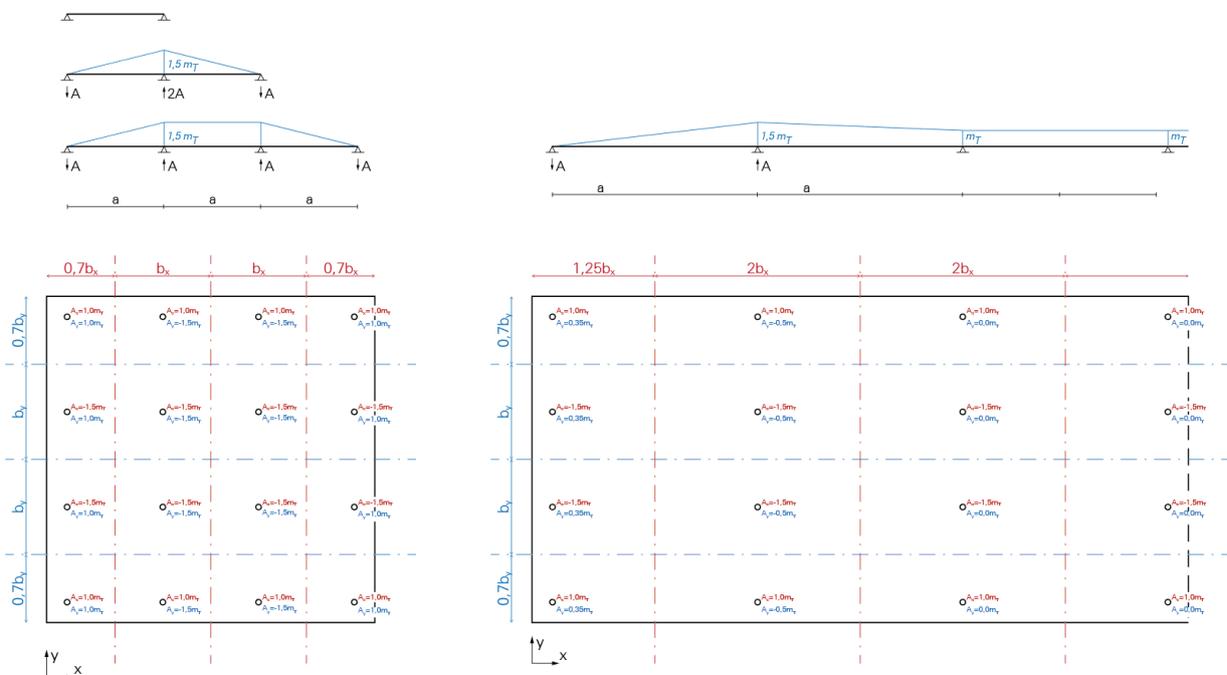


Abbildung 58: Näherung für die Ankerkräfte A und die Zwangsmomente m_T infolge von Temperaturunterschied ΔT nach [58]

7.3.5 Nachweis zum Schall-, Feuchte- und Brandschutz

Der entworfene Sandwichtaufbau erfüllt alle weiterführenden Nachweise zu Schall-, Feuchte- und Brandschutz. Das Flächengewicht der Wand beträgt rund 280 kg/m^2 , wodurch ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_{s,w} = 53,4 \text{ dB}$ vorhanden ist. Damit werden die Anforderungen des erforderlichen Bau-Schalldämm-Maßes von 50 dB eingehalten. Auch die Oberflächentemperatur liegt mit $19,3^\circ\text{C}$ oberhalb des Grenzwertes von $12,6^\circ\text{C}$, sodass der Feuchtschutz des Wandbauteils sichergestellt ist. Der Brandschutz der Wand kann durch die erforderliche Mindestdicke für tragende Betonwände nachgewiesen werden. Die Wandstärke von 26 cm erreicht demnach eine Feuerwiderstandsklasse von REI 180 während lediglich eine Feuerwiderstandsklasse REI 90 gefordert ist.



7.4 Mesogradierete Betonwand

7.4.1 Allgemeine Lösung der Optimierungsaufgabe

Dieser Entwurfsansatz unter Verwendung der Mesogradierung baut auf der Materialverteilung für die mikrogradierete Sandwichwand auf. Ausgangspunkt der Untersuchung bildet ein Sandwichaufbau mit zwei 6 cm starken äußeren Deckschichten für den Lastabtrag. Der innere Kern wird aus Hohlkugeln im Durchmesserbereich von 10 mm bis 250 mm gebildet, welche die Funktion der Wärmedämmung übernehmen sollen. Die Wärmedämmeigenschaften der Mesogradierung sind in erster Linie abhängig von dem verwendeten Kugeldurchmesser und der Kugelpackung. Die ersten Ansätze zur dichtesten Packung von Kugeln gehen zurück auf den Mathematiker Johannes Kepler [59]. Mögliche Ansätze zur Verteilung in Betonbauteilen sind in [23] ausführlicher beschrieben. Die weiteren Untersuchungen im Rahmen des Projekts beschränken sich auf zwei verschiedene Kugelpackungen mit unterschiedlichen Packungsdichten in der Ebene und im Raum. Dies sind die kubisch primitive und die kubisch dichte Kugelpackung (Tabelle 7-8). Die Packungsdichte ist definiert über das Verhältnis des Volumens der Kugeln V_A die sich in einem Raum mit dem Gesamtvolumen V_E befinden und repräsentiert damit die Masseneinsparung bzw. das Hohlraumvolumen des Bauteils.

$$P = V_A / V_E \quad (7.13)$$

Die kubisch primitive Packung basiert auf einem orthogonalen Grundraster, bei dem eine Kugel sich mit vier Nachbarkugeln an genau einem Punkt berührt. Folglich beträgt die sogenannten Kusszahl $n_K = 4$. Durch eine additive Stapelung des Grundrasters in Raum wird analog zur Ebene ein Hohlraumvolumen von 52 % erreicht und die Kusszahl erhöht sich auf $n_K = 6$. Bei dieser Kugelverteilung wird eine Erhöhung der Packungsdichte erst durch das Hinzufügen von Kugeln mit kleinerem Durchmesser erreicht, sodass sich diese wiederum punktuell berühren. Das Hohlraumvolumen kann unter Verwendung von zwei Kugeldurchmessern auf 73 % bzw. unter Verwendung von drei Kugeldurchmessern auf 76 % gesteigert werden.

Ausgangspunkt der kubisch dichte Kugelpackung ist ein hexagonales Grundraster. Die Kusszahl ist in der Ebene $n_K = 6$, eine Packungsdichte von 60 % wird erreicht unter Vernachlässigung von Randstörungen. Die Stapelung erfolgt durch die Platzierung der weiteren Kugellagen in die sogenannten trigonalen Lücken, die als Räume zwischen den Kugeln in der Ebene definiert sind. Bei der kubisch dichte Kugelpackung werden in der Stapelfolge nach der Ausgangslage die trigonalen Lücken (\blacktriangle -Lücke und \blacktriangledown -Lücke) von den nächsten beiden Kugellagen besetzt. Das Hohlraumvolumen steigt somit auf 74 % bei einer Kusszahl $n_K = 12$. Auch bei dieser Kugelanordnung kann die Packungsdichte durch Hinzufügen von weiteren Kugeln mit kleinerem Durchmesser auf 79 % (zwei Kugeldurchmesser) bzw. auf 81 % (drei Kugeldurchmesser) gesteigert werden.



Tabelle 7-8: Packungsdichten mit zugehöriger Kugelverteilung und Hohlraumvolumen

	Kubisch Primitive Packung	Kubisch Dichte Packung
Grundraster		
Ebene: 1 Kugeldurchmesser	 Hohlraumvolumen: 52 %	 Hohlraumvolumen: 60 %
Raum: 1 Kugeldurchmesser	 Hohlraumvolumen: 52 %	 Hohlraumvolumen: 74 %
Raum: 2 Kugeldurchmesser	 Hohlraumvolumen: 73 %	 Hohlraumvolumen: 79 %
Raum: 3 Kugeldurchmesser	 Hohlraumvolumen: 76 %	 Hohlraumvolumen: 81 %

Durch die Definition der Entwurfsrandbedingungen kann die Lösung des Optimierungsproblems erfolgen, die am Beispiel der zuvor vorgestellten Packungsdichten verdeutlicht werden soll. Die Anforderungen an die Tragfähigkeit werden, wie bereits bei der Mikrogradierung hergeleitet, durch zwei Deckschichten sichergestellt. Die Anforderungen an die Wärmedämmung sollen durch einen gradierten Kern aus Hohlkugeln und Leichtbeton gewährleistet werden, dessen Dicke unter Berücksichtigung der Betoneigenschaften zu bestimmen ist (Abbildung 59).

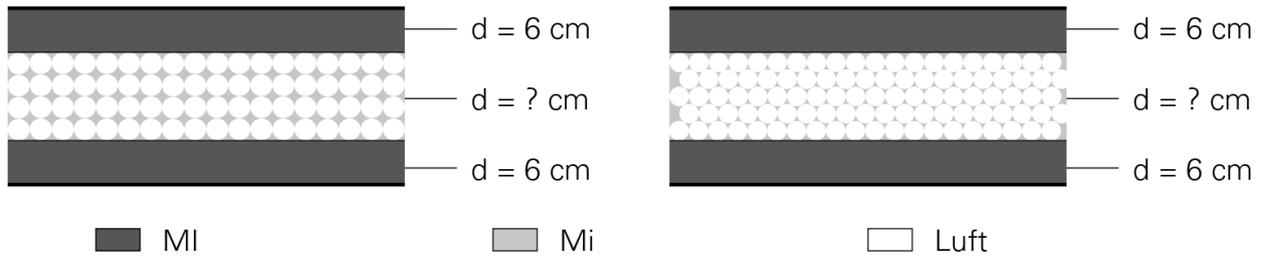


Abbildung 59: Definition der Entwurfsrandbedingungen für die Wandauslegung mit Mesogradierung

Die statische Berechnung des Wärmedurchlasswiderstands ist abhängig von den einzelnen Schichtdicken und deren jeweiliger Wärmeleitfähigkeit. Da im Kern eine diskrete Schichttrennung aufgrund der Hohlkugeln und des umgebenden Betons nicht möglich ist, wird hierfür eine mittlere Wärmeleitfähigkeit eingeführt. Diese ist abhängig vom Verhältnis aus Hohlraumvolumen zu Materialvolumen im Kern und den jeweiligen spezifischen Wärmeleitfähigkeiten. Für die in Abbildung 59 dargestellten Systeme lautet die Formulierung des Wärmewiderstands der Wand wie folgt:

$$R_T = \frac{d_1}{\lambda_{MI}} + \frac{d_2}{\lambda_{Mi}} \times (1 - P) + \frac{d_2}{\lambda_{Luft}} \times P + \frac{d_1}{\lambda_{MI}} \quad (7.14)$$

Da die Gleichung lediglich von Schichtdicke, Wärmeleitfähigkeit und Packungsdichte abhängig ist, hat sie Allgemeingültigkeit und kann auch auf andere, mehrlagige Schichtaufbauten angewandt werden. Als Entwurfsrandbedingungen sind die maximal zulässige Wanddicke (hier: 36,5 cm), die Deckschichtdicke (hier: 12 cm) sowie die Wärmeleitfähigkeiten der hochfesten Betonmischung MI ($\lambda_{MI} = 1,60 \text{ W/mK}$) und der Luft ($\lambda_{Luft} = 0,03 \text{ W/mK}$) vorzugeben. Anschließend kann die Dämmkernstärke in Abhängigkeit der Kugelpackung und die erforderliche Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons bestimmt werden. In Abbildung 60 ist das Ergebnis des Entwurfsansatzes für die beiden Kugelpackungen dargestellt. Mit beiden Anordnungen wird die geforderte Wanddicke selbst unter Verwendung eines Normalbetons erreicht. Eine deutliche Reduktion der Wandstärke wird bei der kubisch primitiven Packung erst bei einer Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,30 W/mK und bei der kubisch dichte Packung bei 0,10 W/mK erreicht.

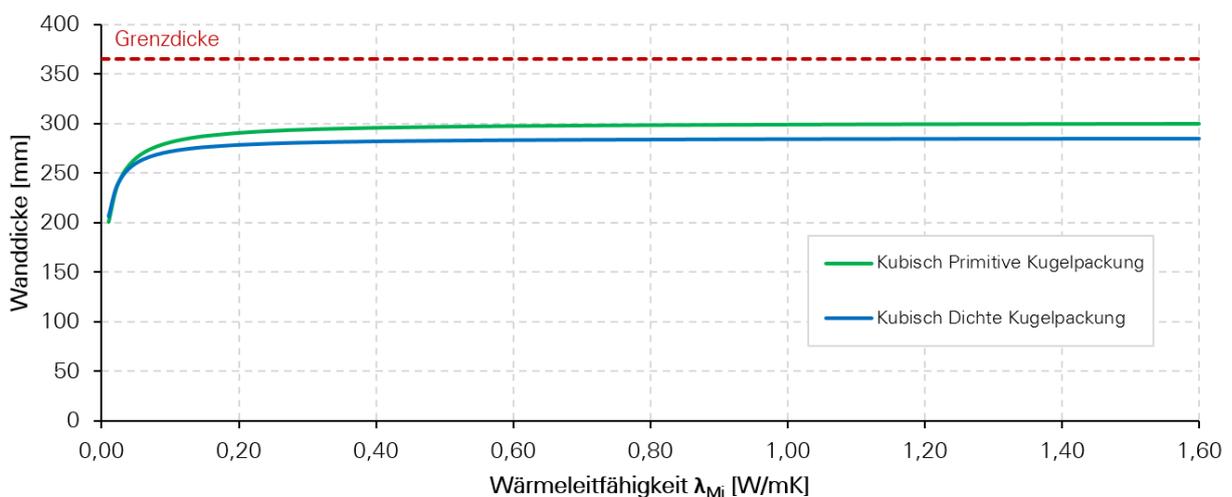


Abbildung 60: Optimierungsergebnis zur Bestimmung der minimalen Wanddicke in Abhängigkeit von Kugelpackung und Wärmeleitfähigkeit des umschließenden Betons



7.4.2 Hohlkugelverteilung

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der theoretischen Packungsdichte der Kugelanordnungen im unendlichen Raum. Durch die Bauteilgeometrie wird der Raum jedoch endlich begrenzt. Somit wird eine Hohlkugelverteilung benötigt, mit der die theoretische Packungsdichte im endlichen Raum erreicht wird. Da die Stapelung der Kugeln nach einer gewissen Regelmäßigkeit erfolgt und die Kugelabstände exakt beschreibbar sind, stellt sich bei der Hohlkugelverteilung die Frage, wie groß der Kugeldurchmesser sein muss, damit in der Kernschicht d_c nur ganzzahlige Kugellagen n platziert werden, um die maximale Packungsdichte zu erreichen. Diese Frage lässt sich durch die folgenden Beziehungen in Abhängigkeit von der Anzahl an Lagen und dem Kugeldurchmesser d_k für die kubisch primitive Packung nach 7.15 und für die kubisch dichte Packung nach 7.16 beantworten.

$$d_{c,KPP} = d_k \cdot n \tag{7.15}$$

$$d_{c,KDP} = d_k \cdot \left(1 + (n - 1) \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \right) \tag{7.16}$$

Für die beiden untersuchten Packungsdichten ergeben sich somit die in Abbildung 61 dargestellten Kugeldurchmesser in Abhängigkeit von der Anzahl an Kugellagen. Grundlage ist eine Dämmkernstärke von 23 cm für die kubisch primitive Packung bzw. von 16,5 cm für die kubisch dichte Packung, die aus der maximalen Wandstärke für den ungünstigen Einsatz von MI_{SG} im Kern resultiert. Unabhängig von der Kugelpackung ist ein potentieller Verlauf zwischen Anzahl an Kugellagen und Kugeldurchmesser zu verzeichnen. Dies hat zur Folge, dass sich bei mehreren Lagen der Kugeldurchmesser nur noch geringfügig gegenüber der vorherigen Lage verändert bei gleichzeitig drastischer Erhöhung der Kugelanzahl im Bauteil.

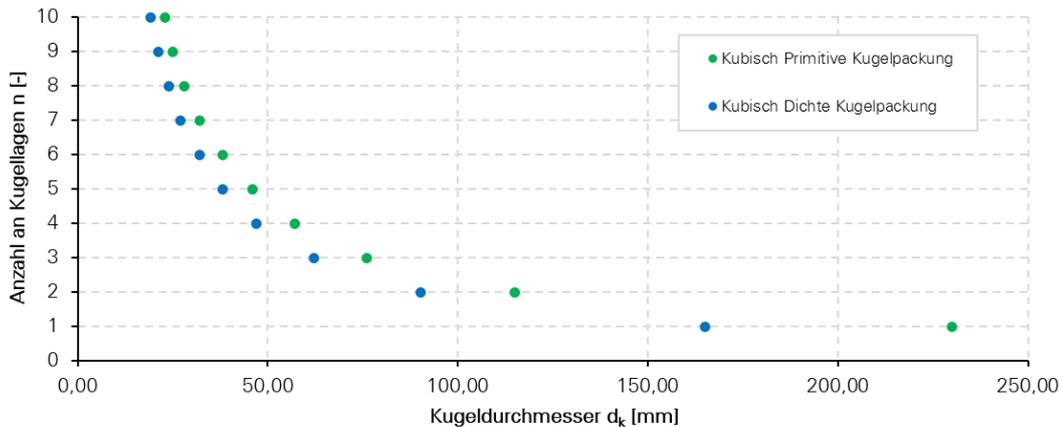


Abbildung 61: Optimaler Kugeldurchmesser in Abhängigkeit von der Anzahl an Kugellagen für die minimale Wandstärke je Packungsdichte

Durch die Platzierung der Kugeln werden quasi „ruhende Luftschichten“ im Inneren des Bauteils angeordnet. Der Temperaturgradient, der über die Schichtdicke verläuft, bewirkt in Abhängigkeit von der Schichtstärke und dem Luftvolumen einen Wärmeübertrag durch Konvektion, sodass der Wärmedurchlasswiderstand erhöht werden muss. In der Norm und in der Literatur finden sich eine Vielzahl von Tabellenwerten zum Wärmedurchlasswiderstand, die für vertikale Luftschichten unterschiedlicher Schichtdicke angenommen werden können, es fehlen jedoch Werte für luftgefüllte Hohlkugeln. Bei der Recherche wurde ein Ansatz ausfindig gemacht [60], mit dem die Steigerung der relativen Wärmeleitfähigkeit durch Konvektion für kugelförmige Gefäße berechnet werden kann. Bzw. kann mit diesem Ansatz ermittelt werden, ab welcher Größe keine Konvektion auftritt. Reine Wärmeleitung tritt auf, wenn die Rayleigh-Zahl Ra kleiner ist als 1.700 [60].

$$Ra = l^3 \cdot g \cdot \theta \cdot \frac{\beta}{\nu a} \leq 1.700 \tag{7.17}$$

mit: $l = V_k/A_k = d/6$ charakteristische Länge [m]

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ Fallbeschleunigung

$\theta = 5^\circ$ Temperaturunterschied [°C]

$\beta = 3,00 \cdot E^{-3}$ thermischer Ausdehnungskoeffizient von Luft [1/°C]

$\nu = 1,51 \cdot E^{-5}$ kinematische Viskosität von Luft [m²/s]

$a = 2,00 \cdot E^{-5}$ Temperaturleitfähigkeit von Luft [m²/s]

Für die Kugelverteilung kann über diese Beziehung ein maximaler Durchmesser von 91 mm bestimmt werden, bei dem keine Steigerung der relativen Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden muss. Bei größeren Kugeldurchmessern kann die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit ab einer Rayleigh-Zahl größer als 1.700 anhand des folgenden Diagramms bestimmt werden.

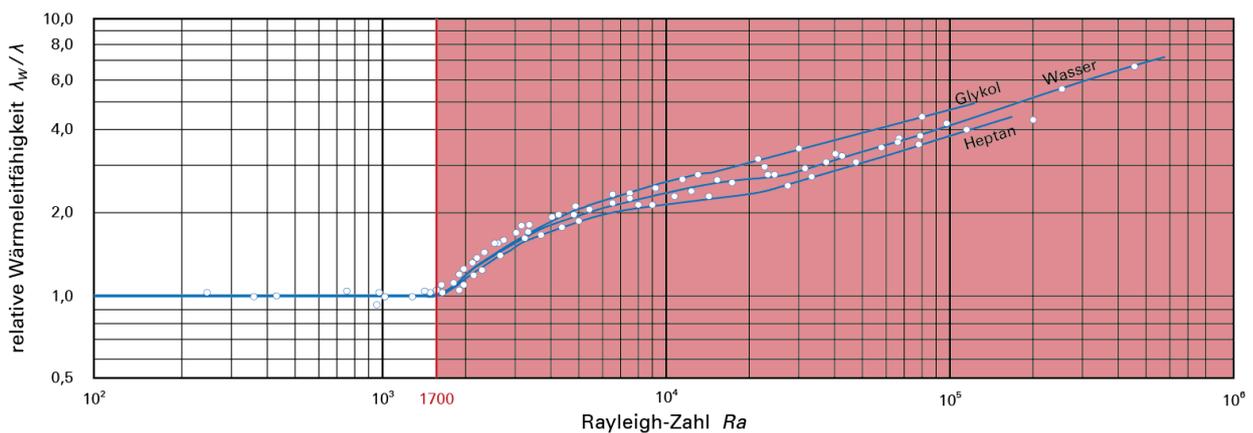


Abbildung 62: Durch Konvektion gesteigerte relative Wärmeleitfähigkeit bezogen auf die reine Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rayleigh-Zahl nach [60]

Die Wahl des Kugeldurchmessers und der Lagenanzahl für den Bauteilentwurf ist letztlich von übergeordneten Randbedingungen abhängig. Bei den folgenden Varianten ist das Ziel, die Kugelanzahl auf ein Minimum zu reduzieren und mögliche Wärmebrücken durch direkte Materialpfade, die von Deckschicht zu Deckschicht verlaufen, zu minimieren. Bei der kubisch dichten Kugelpackung werden direkte Wärmebrücken durch die Stapelfolge bei drei Kugellagen vermieden. Somit ergibt sich die geringste Kugelanzahl beim Durchmesser von 62 mm. Bei der kubisch primitiven Packung können die zusätzlichen Randbedingungen durch die Charakteristik der Stapelung nicht eingehalten werden. Es bildet sich stets ein durchgehender Materialpfad in der sogenannten Würfellücke aus, der die Deckschichten ohne Umlenkung verbindet. Aus diesem Grund wird bei der kubisch primitiven Kugelpackung die Einführung eines zweiten Kugeldurchmessers notwendig. Dadurch wird das Hohlraumvolumen erhöht und die Stärke der Kerndämmung sowie der Kugeldurchmesser für das Gewichtsmilimum müssen angepasst werden. Aus der Modifikation ergibt sich ein Kugeldurchmesser bei zweilagiger, kubisch primitiver Anordnung der Kugeln von 97 mm. Dies führt dazu, dass sich im Kugelinneren Konvektion einstellt, sodass die relative Wärmeleitfähigkeit der Luft bei der Auslegung erhöht werden muss. Durch die Verwendung eines Leichtbetons mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{Mi} = 0,4 \text{ W/mK}$ in den Kugelzwischenräumen kann dies kompensiert werden. Die Herstellung dieser Wandaufbauten wäre folglich



auch mit der Nassspritztechnologie möglich. Es ergeben sich die in Abbildung 63 dargestellten Entwurfsvarianten des mesogradieren Wandaufbaus. Bei der kubisch primitiven Packung beträgt die Wandstärke 32,5 cm, bei Einsatz der kubisch dichten Kugelpackung lediglich 28,5 cm.

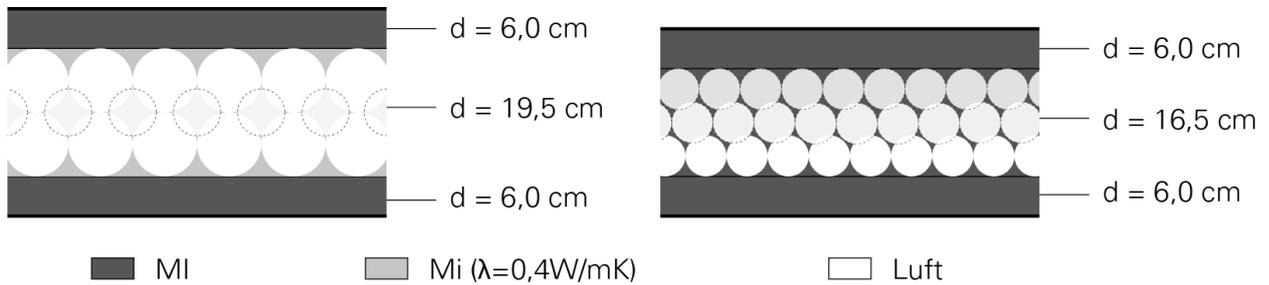


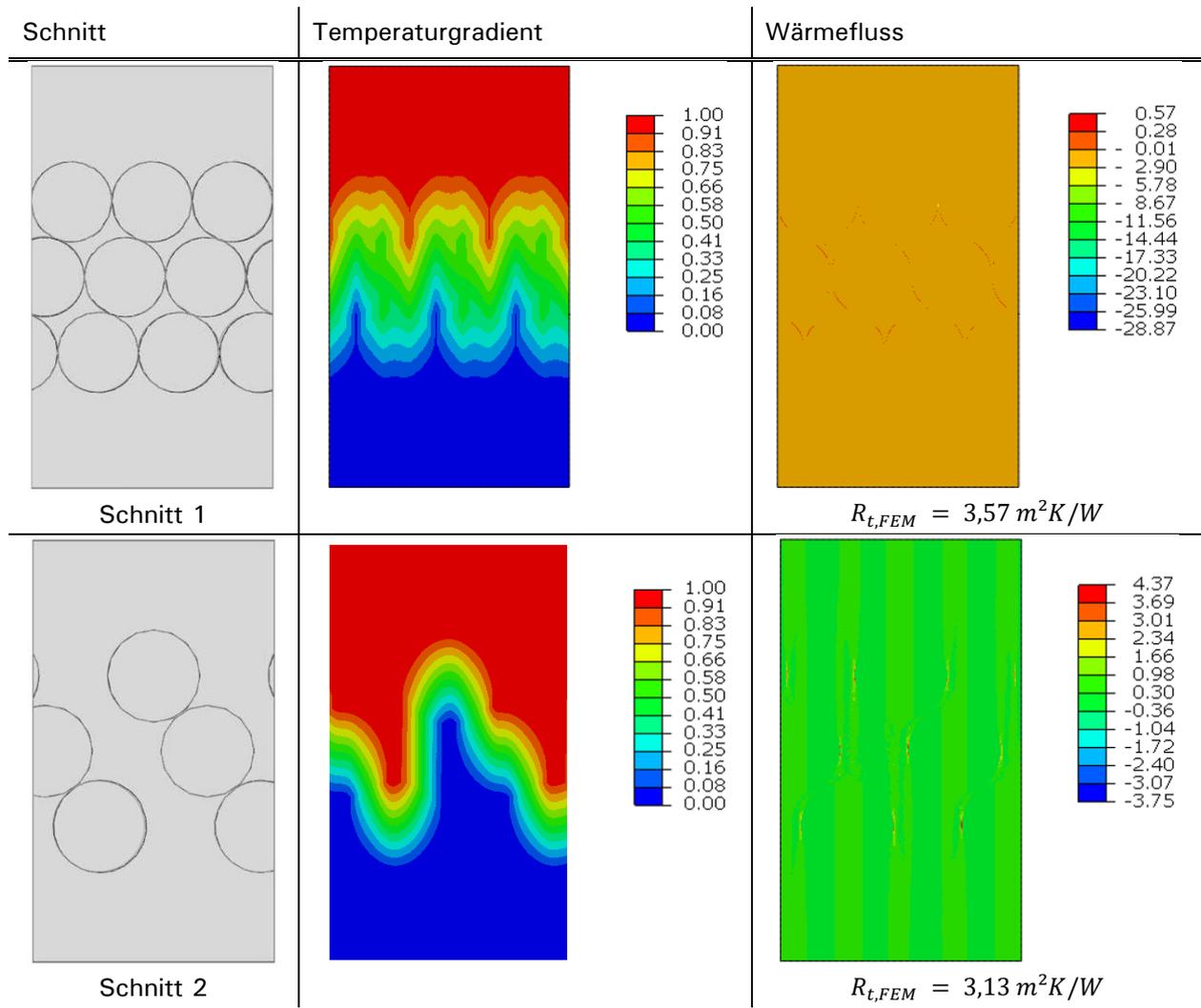
Abbildung 63: Entwurfsvarianten für die Wandauslegung mit Mesogradierung mit kubisch primitiver Packung (links) und kubisch dichtester Packung (rechts)

Durch die Wahl gleicher Deckschichtstärken von mikro- und mesogradierem Aufbau und der Annahme, dass lediglich die Deckschichten durch ihre erhöhte Steifigkeit den Lastabtrag übernehmen, werden erwartungsgemäß die gleichen Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit erzielt. So kann bei der mesogradieren Wand eine Tragfähigkeit von rund 3.500 kN/lfdm erwartet werden.

Die FEM-Simulation zum Wärmewiderstand der Wandaufbauten erfolgt nicht am Gesamtsystem, sondern an zwei kritischen Schnitten auf unterschiedlichen Höhen der Wand. Schnitt 1 entspricht der Stelle maximalen Hohlraumvolumens, Schnitt 2 der Stelle minimalen Hohlraumvolumens. Die Ergebnisse der numerischen Simulation zur Wärmeleitfähigkeit können den analytischen Ansatz bestätigen. Bei Schnitt 1 kann analytisch ein Wärmedurchgangswiderstand von $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ bestimmt werden und numerisch ein Widerstand von $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für Schnitt 2 liegen die Wärmedurchgangswiderstände durch die numerische Berechnung bei $1/R_{t,FEM} = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ und analytisch bestimmt bei $1/R_{t,analy} = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für beide Schnitte liegt der numerisch bestimmte Wärmedurchgangswiderstand 5 % unter dem analytisch berechneten Wert. Der analytische Ansatz ist damit etwas konservativer und für einen ersten Entwurf hinreichend genau. Beide Berechnungsansätze gilt es durch experimentelle Untersuchungen in weiteren Arbeiten zu validieren.



Tabelle 7-9: Zusammenfassung der thermischen Simulationsergebnisse des mesogradierten Wandaufbaus mit kubisch primitiver Packung



7.4.3 Nachweis zum Schall-, Feuchte- und Brandschutz

Auch der mesogradierte Entwurf der Wand erfüllt die weiteren Nachweise zu Schall-, Feuchte- und Brandschutz. Das Flächengewicht der Wand bei kubisch dichter Packung beträgt ca. 350 kg/m². Dadurch wird ein bewertetes Schalldämmmaß von $R_{s,w} = 56,4 \text{ dB}$ erreicht, welches über dem erforderlichen Bau-Schalldämm-Maß liegt. Auf Grund des vergleichbaren U-Werts der beiden Wandaufbauten ist beim mesogradierten Entwurf eine vergleichbare Oberflächentemperatur von 19,3°C zu verzeichnen. Daher kann auch hier der Feuchteschutz des Wandbauteils sichergestellt werden. Die Wanddicke von 28,5 cm erreicht ebenfalls eine Feuerwiderstandsklasse von REI 180 und erfüllt die an das Bauteil gestellten Anforderungen.

8 Experimentelle Untersuchungen an gradierten Wandbauteilen (AP 4)

8.1 Untersuchungen zur Tragfähigkeit (ILEK)

8.1.1 Skalierung und Probekörpergeometrie

Aufgrund der Handhabbarkeit der Bauteile und der Materialvolumina werden für die Untersuchungen zur Tragfähigkeit skalierte Probekörper gefertigt und geprüft. Die Skalierung erfolgt unter Verwendung des Ähnlichkeitsprinzips der Physik [61] und schließt die Herstellbarkeit in Abhängigkeit der minimalen Schichtdicken und die maximale Prüflast der verfügbaren Prüfmaschine mit ein. Die relevanten Ähnlichkeitsverhältnisse (Index V) sind die Höhe h_V , Breite b_V und Dicke d_V der Wand und bilden sich aus dem Quotienten von skaliertem Probekörper (Index S) zum Probekörper im realen Maßstab (Index R):

$$h_V = \frac{h_S}{h_R}; b_V = \frac{b_S}{b_R}; d_V = \frac{d_S}{d_R} \quad (8.1)$$

Die Skalierung der Bauteilgeometrie und damit verbunden eine Änderung des Widerstands bewirkt auch eine Skalierung der einwirkenden Kraft. Die skalierte Prüfkraft F_S lässt sich wie folgt bestimmen:

$$F_S = F_R \frac{h_V \cdot d_V^2}{b_V} \quad (8.2)$$

Konkret muss bei der Skalierung des Bauteils darauf geachtet werden, dass bei beiden Modellen das selbe Material eingesetzt wird und die gleiche Steifigkeit vorliegt. Daraus folgt, dass das Kräfteverhältnis lediglich von der Geometrie abhängig ist und dass Spannungs- und Dehnungsgleichheit zwischen den Modellen vorliegt.

$$\sigma_V = \varepsilon_V = 1 \quad (8.3)$$

Im Rahmen des Projekts wurde eine einheitliche Skalierung von einem Drittel gewählt. Es ergibt sich für alle Probekörper eine Höhe von 100 cm und eine Breite von 33 cm. Die Dicke der unterschiedlichen Varianten variiert in Abhängigkeit des gewählten Layouts.

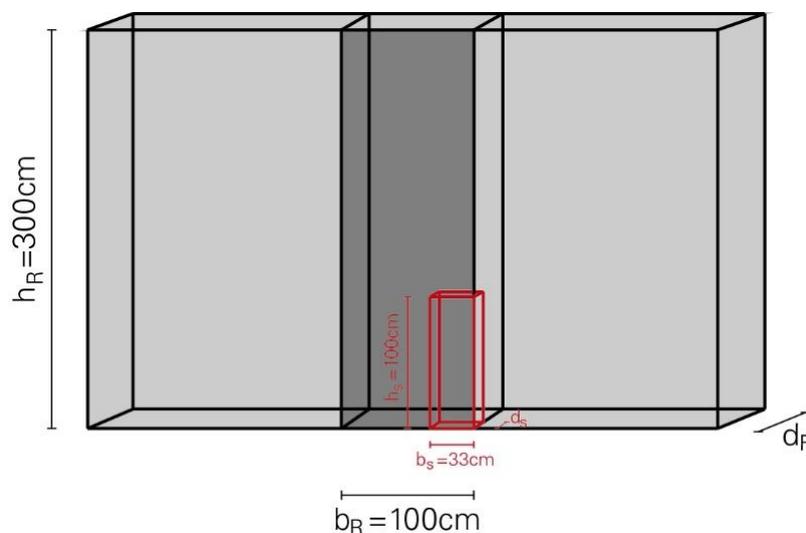


Abbildung 64: Skalierung der Bauteilgeometrie

Für die Bauteilgeometrie lautet das Ähnlichkeitsverhältnis wie folgt:

$$h_V = b_V = d_V = \frac{1}{3} \quad (8.4)$$

Aufgrund der Skalierung der Geometrie resultiert die zu erwartende Prüfkraft im Modell zu:

$$F_S = \frac{1}{9} F_R \quad (8.5)$$

8.1.2 Probekörperherstellung des mikrogradienten Sandwichaufbaus

Die Betonage der Bauteile erfolgte in der Abteilung für mineralische Baustoffe der Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart. Zunächst wurden Schalungsformen in der gewünschten Größe hergestellt. Für die Herstellung der ersten Versuchsserie kamen konventionelle Siebdruckplatten mit Betoplan zum Einsatz. Bei der zweiten Versuchsserie wurden die vom Projektpartner Meva-Schalungssysteme bereitgestellten Vollkunststoff-Schalplatten mit dem Produktnamen *alkus* eingesetzt. Die Probekörper wurden liegend Nass-in-Nass im schichtweisen Gießen hergestellt, um einen optimalen Verbund zwischen den Lagen zu erreichen. Durch mehrere Messpunkte wurde die exakte Schichtstärke während der Betonage kontrolliert. Je Variante wurden drei Probekörper angefertigt, damit ein statistischer Mittelwert für die Tragfähigkeit bestimmt werden konnte.

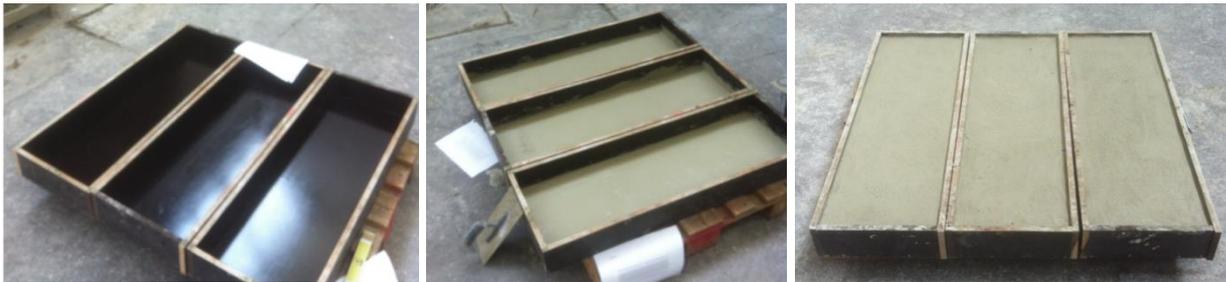


Abbildung 65: Ausschnitt aus der Probekörperherstellung

Das Ausschalen der Probekörper erfolgte zwei Tage nach Fertigung. Anschließend lagerten die Bauteile in einer Feuchtekammer bei einer Luftfeuchtigkeit von 100 % für mindestens 28 Tage, um vollständig zu erhärten. Vor der Prüfung der skalierten Wandbauteile wurden diese für den Versuch vorbereitet. Hierzu wurden an den lastangreifenden Seiten planparallele Ausgleichsschichten mit einem Zementmörtel aufgetragen, damit eine gleichmäßige und zentrische Krafteinleitung erfolgen konnte.

8.1.3 Bauteilprüfung

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit wurden einaxiale Druckprüfungen bei der MPA durchgeführt (Abbildung 66, links). Die Versuche erfolgten an einer 4-Säulen-Universalprüfmaschine der Firma *Form + Test* mit einer zulässigen Höchstlast von 3 MN (Genauigkeitsklasse 1 nach [62]). Während der Prüfung wurden die Maschinenkraft (Druck) und die Relativverschiebung durch integrierte Sensoren der Prüfmaschine gemessen. Die Prüfkraft wurde gleichmäßig und stoßfrei [34] durch eine weggesteuerte Verschiebung von 1 mm/min aufgebracht. Die Belastung der Probekörper erfolgte bis zum Versagen des Bauteils (Abbildung 66, rechts).



Abbildung 66: Bauteilprüfung zu Beginn (links) und am Ende (rechts)

8.1.4 Versuchsergebnisse und Validierung der Berechnungsansätze

Die Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchung zum Tragverhalten des Sandwichaufbaus sind in Tabelle 8-1 zusammengefasst. Die statischen Bauteilversuche der Probekörper erreichen eine Prüfkraft von 269 kN bis 514 kN. Bei den Probekörpern Sandwich 1 und Sandwich 3 ist ein vollständiger Bruch der beiden äußeren hochfesten Tragschalen zu erkennen, sodass von einer vollständigen Aktivierung der beiden Deckschichten zum Lastabtrag ausgegangen werden kann. Der Probekörper Sandwich 2 erreicht die niedrigste Prüfkraft von $F_{k,s} = 269 \text{ kN}$. Während des Versuchs konnte eine frühzeitige Delamination des Betonkerns beobachtet werden und damit einhergehend ein stärkeres Ausknicken von nur einer Tragschale. Aufgrund des Versagens von lediglich einer Deckschicht ist der Widerstand des Gesamtsystems reduziert.

Eine abschließende Validierung der Berechnungsansätze ist aufgrund der Streuung der Versuchsergebnisse nur bedingt möglich. Werden zur Validierung die Versuche herangezogen, bei denen ein vollständiges Versagen beider Schalen auftritt, so zeigen sowohl die errechneten Knicklasten nach Eurocode ($P_{kr,EC} = 383 \text{ kN}$) als auch die FEM-Berechnung unter Berücksichtigung von Imperfektionen und Theorie II. Ordnung ($P_{kr,FEM} = 394 \text{ kN}$) eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen.

Tabelle 8-1: Versuchsergebnisse der Probekörpervariante 1

	Sandwich 1	Sandwich 2	Sandwich 3
Prüfkraft $F_{k,s}$ [kN]	391	269	514
Bruchbild			
Knicklast $P_{kr,EC}$ [kN]	383	383	383
Knicklast $P_{kr,FEM}$ [kN]	394	394	394

Allgemein lässt sich die Streuung der Versuchsergebnisse auf die händische Herstellung der Bauteile zurückführen. Beim Betonieren der schweren Mischung auf die leichte Kernmischung kam es teilweise zum Einsinken des schweren Materials in Probekörpermitte. Das Resultat ist eine abweichende Querschnittssteifigkeit. Im Fall von Sandwich 3 führte die gestiegene Steifigkeit zu einer höheren Traglast. Eine höhere Genauigkeit ist mit der händischen Gießtechnik nur schwer zu erreichen, weshalb bei diesen Versuchsergebnissen stets größere Schwankungen zu erwarten sind.



Abbildung 67: Struktur eines mehrschichtigen Gradientenaufbaus



Die Versuchsergebnisse zu den Probekörpern mit optimierter Deckschicht sind in Tabelle 8-2 aufgelistet. Die erreichte Prüfkraft liegt zwischen 107 kN und 165 kN. T-Sandwich 1 unterschreitet im Vergleich zu den anderen beiden Probekörpern die Prüflast um rund 50 kN deutlich. Wie im Bruchbild zu erkennen, versagt T-Sandwich 1 durch lokales Beulen der Deckschicht am unteren Ende des Probekörpers. Auch hier konnte herstellungsbedingt die erforderliche Deckschichtstärke nicht über den gesamten Querschnitt garantiert werden. Bei den beiden anderen Probekörpern (T-Sandwich 2 und T-Sandwich 3) trat ein erwartungsgemäßes Versagen bei einer durchschnittlichen Prüfkraft von 163 kN ein. Mit den Berechnungsansätzen nach Eurocode und der FEM-Simulation wurde ebenfalls eine hinreichende Genauigkeit zwischen Berechnung und Versuch erzielt.

Tabelle 8-2: Versuchsergebnisse der Probekörpervariante 2 mit T-Querschnitt

	T-Sandwich 1	T-Sandwich 2	T-Sandwich 3
Prüfkraft $F_{k,s}$ [kN]	107	160	165
Bruchbild			
Knicklast $P_{kr,EC}$ [kN]	155	155	155
Knicklast $P_{kr,FEM}$ [kN]	128	128	128

8.2 Untersuchungen der Eigenschaften von Betonmischungen und geschichteten Wandbauteilen (IWB)

8.2.1 Untersuchung des Trocknungsverhaltens

Als Projektziel wurde das Erreichen einer Wärmeleitfähigkeit von $0,075 \text{ W/mK}$ und einer Rohdichte von unter 500 kg/m^3 für die leichte Mischung festgelegt. Wie in [40] aufgeführt, haben Rohdichte, Feuchtegehalt und die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffs. Abbildung 68 stellt die Korrelation der Wärmeleitfähigkeit mit der Rohdichte dar. Betrachtet man nun die Masse einzelner Proben an verschiedenen Stadien der Untersuchungen, können Aussagen über den Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte gemacht werden (vgl. Tabelle 6-4).

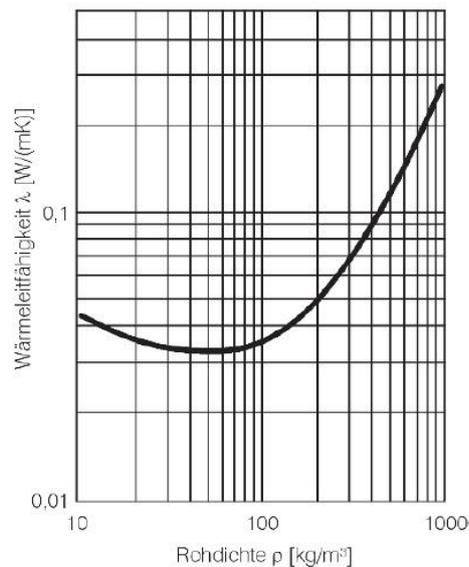


Abbildung 68: Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte [39]

Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit der ausgleichsfeuchten Dämmschicht im Vergleich zu ofentrockenen Proben bis zu etwa 10 % höher sein wird. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass der Zeitraum, den eine innenliegende Betondämmschicht zum Erreichen des ausgleichsfeuchten Zustands benötigt, deutlich länger sein wird, als bei einem Betonwürfel mit der Kantenlänge 10 cm. Während bei einem Betonwürfel die Feuchtigkeit abhängig von der Lagerung in bis zu sechs Seiten entweichen kann, stehen bei einer innenliegenden Betonschicht nur die beiden an die innere und äußere Luftschicht grenzenden Oberflächen zur Trocknung zur Verfügung. Da die für das Projekt entwickelten Mischungen über einen hohen Wassergehalt verfügen, wird von einem langen Trocknungszeitraum ausgegangen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Außenschalen aus einer deutlich dichteren und porenarmen Mischung erstellt werden sollen. Dies verzögert das Entweichen der Feuchte weiter wegen des diffusionsbehindernden dichten Gefüges der Randschichten und der zusätzlichen Bauteildicke.

Tabelle 8-3: Rohdichten und daraus resultierende rechnerische Wärmeleitfähigkeiten an verschiedenen Zeitpunkten der Untersuchungen

Wiegezeitpunkt	Probewürfel A (vor dem Pumpen)		Probewürfel B (nach dem Pumpen)	
	Rohdichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit ^(*) [W/mK]	Rohdichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit ^(*) [W/mK]
Nach Ausschalen	900	0,27	1.151	0,357
Nach 7 Tage Wasserbad	935 (+ 3,7%)	0,28	1.187 (+ 3,0%)	0,371
Ofentrocken	774 (-14,0%)	0,215	1019 (-11,5%)	0,305

^(*) Ermittelt nach Nanogramm [40]

Um das Trocknungsverhalten zu simulieren, wurden mehrere Langzeitversuche vorgenommen. Zum einen wird regelmäßig ein Würfel mit der Kantenlänge 10 cm sowie ein Probekörper mit den Abmessungen 15 x 50 x 50 cm gewogen, um die Rohdichte zu bestimmen. Als Material wurde die Mischung MILL_{IWB(L)}-2 verwendet. Außerdem wurde ein gradiertes Probekörper mit einer Grundfläche 20 x 20 cm hergestellt und an vier Seiten mit Epoxydharz versiegelt, um einen Wandausschnitt zu simulieren. Zusätzlich wurde ein Probekörper nur mit der tragenden Mischung MI gleicher Abmessungen mit den Außenschalen erstellt und entsprechend versiegelt. Durch den Vergleich der beiden Probekörper kann die zeitliche Änderung der Rohdichte des innenliegenden Leichtbetons des Wandausschnittes rechnerisch abgeschätzt werden (Abbildung 69). Ziel des Versuchs war es die Feuchteentwicklung und das Trocknungsverhalten eines gradierten Wandbauteils bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte zu untersuchen. Über die Dauer des Versuches konnte beobachtet werden, dass das gradierte Bauteil über eine längere Dauer Feuchtigkeit abgeben muss, um sich den Umgebungsbedingungen anzupassen. Nach etwa einem halben Jahr nähert sich das Probebauteil immer mehr dem Zustand der Massenkonzanz an und erst nach etwa einem Jahr kann das Einstellen des Gleichgewichts mit der Umgebungsfeuchtigkeit beobachtet werden.

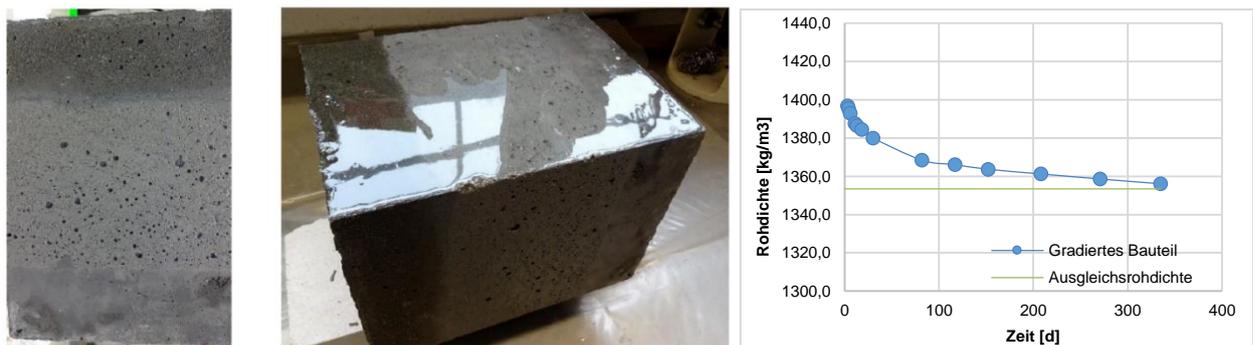


Abbildung 69: Mit Epoxydharz abgedichtetes, gradiertes Wandbauteil (links und mittig) und Trocknungsverhalten nach 335 Tagen (rechts)

8.2.2 Untersuchung des Wasseraufnahmeverhaltens

Des Weiteren wurden beide Betone auf ihre Wasseraufnahme untersucht, da bei Schlagregen auf Wandbauteile sowie bei deren Lagerung im Fertigteilwerk Wasser aus der Umgebung von den Materialien aufgenommen werden kann. Bestimmt wurde der Wasseraufnahmekoeffizient mittels der Methode des teilweisen Eintauchens. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 8-4 zusammengefasst und in Abbildung 70 für beide Betone dargestellt. Für äußere Oberflächen, was auf ein Wandelement zutrifft, wird laut DIN 4108-3 für den Regenschutz mindestens das Kriterium wasserabweisend gefordert, das von beiden entwickelten Betonen erreicht wird (vgl. Tabelle 8-4).

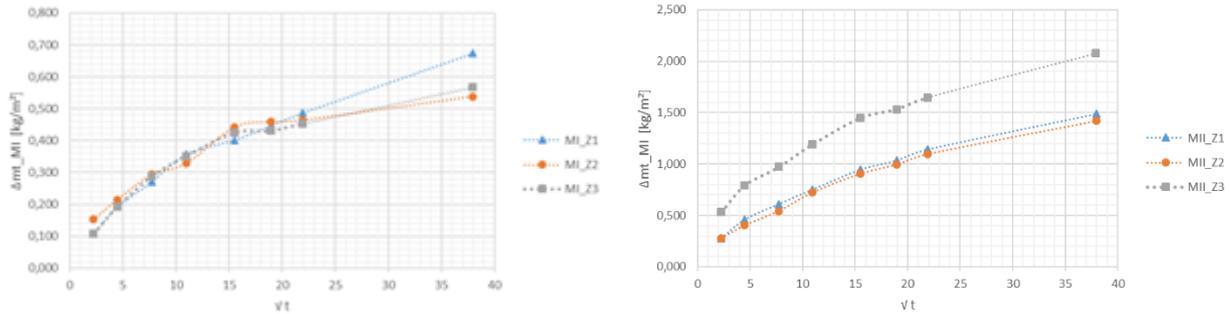


Abbildung 70: Ergebnisse des Wasseraufnahmeversuchs – Massendifferenz bezogen auf die wasser-aufnehmende Fläche über der Zeit für jeweils drei Zylinder (Z1-Z3) aus Normalbeton MI (links) und aus Leichtbeton MII_{NS}(B) (rechts).

Tabelle 8-4: Wasseraufnahmekoeffizient für die untersuchten Probekörper aus Normal- und Leichtbeton

Probekörper		Wasseraufnahme- koeffizient W_w [kg/m ² ·h ^{0,5}]	Mittlerer Wasseraufnahme- koeffizient W_w [kg/m ² ·h ^{0,5}]	Einteilung
Normalbeton MI	Z1	0,137	0,121	wasserabweisend ($W_w < 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$)
	Z2	0,110		
	Z3	0,116		
Leichtbeton MII _{NS} (IWB)- 4.2	Z1	0,304	0,339	wasserabweisend ($W_w < 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$)
	Z2	0,290		
	Z3	0,424		

8.2.3 Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit

Neben den Versuchen zum Trocknungs- und Wasseraufnahmeverhalten, wurden auch Probekörper für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten hergestellt. Für die Prüfung mit einem sogenannten Transient Hot Bridge Gerät (nachfolgend THB Gerät), das mit Hilfe des Heizbrückenverfahrens das thermische Wärmeleitverhalten eines Werkstoffes bestimmen kann, wurden würfelförmige Probekörper mit einer Kantenlänge von 10 cm aus MII_{NS}(IWB)-4.2 hergestellt. Diese wurden mit einer Säge in zwei Hälften geteilt, um zwei Oberflächen zu erzeugen, zwischen die der Sensor des THB Geräts zur Messung eingespannt werden kann. In Tabelle 8-5 sind beispielhaft für eine Betonmischung die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten für den Zustand nach dem Mischen und vor der Pumpförderung (W1) und für den Zustand nach dem Pumpen (W2) jeweils im Prüfalter von 7 Tagen aufgezeigt. Infolge der beim Pumpvorgang zunehmenden Rohdichte nimmt wie erwartet die Wärmeleitfähigkeit zu (vgl. Abbildung 68).



Abbildung 71: THB-Gerät und Leichtbetonprüfkörper während des Messvorganges (links) und Schwundrinne mit Leichtbetonprobekörper (rechts)

Tabelle 8-5: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Probealter

Probe und Alter [-]	Masse [kg]	Rohdichte, ofentrocken [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit, rechnerisch [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit, gemessen [W/mK]
W1, v. Pump., 7 Tage	0,709	730	0,249	0,207
W2, n. Pump., 7 Tage	0,909	919	0,312	0,256

Zusätzlich wurden skalierte Wandelemente mit den Abmessungen 9 mm – 21 mm – 9 mm in einem Verhältnis 1:6,6 zum vom ILEK entworfenen Bauteilaufbau (vgl. Kapitel 7.3.2) am IWB hergestellt (Abbildung 72, Abbildung 73 links), deren Wärmeleitverhalten an der MPA Universität Stuttgart ermittelt wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-6 dargestellt. Dabei wurden sowohl mehrschichtige (Sandwich aus MI–MII_{ns}(IWB)-4.2–MI) als auch einschichtige Prüfkörper (MI bzw. MII_{ns}(IWB)-4.2) hergestellt (vgl. Tabelle 6-2). Gleichzeitig wurde ein Modellkörper im Modellmaßstab 1:2 gefertigt, dessen Schichtdicken 3 cm – 7 cm – 3 cm betragen. Die Außenabmessungen wurden zu 50 x 50 cm gewählt (Abbildung 73, rechts).

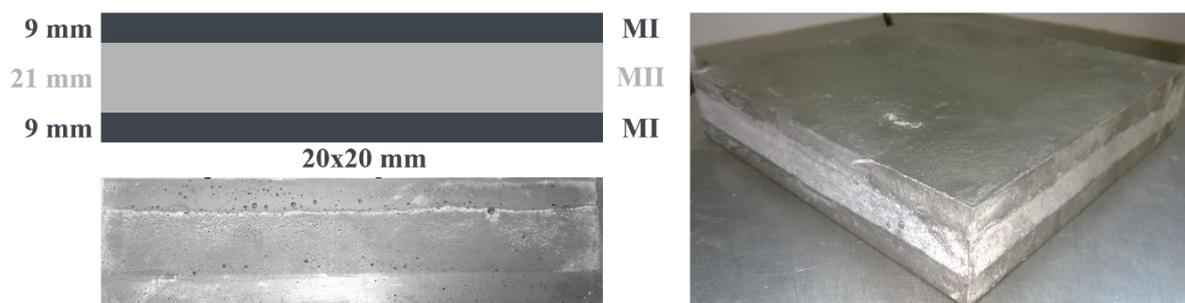


Abbildung 72: Schichtenaufbau der 1: 6,6 skalierten Wandelemente



Abbildung 73: Skalierte Wandelemente (links: 1:6,6 skaliertes Element beim Wiegen, rechts 1:2 skaliertes Element in der Herstellung)

Tabelle 8-6: Aufbau und Wärmeleitkoeffizient von skalierten Wandelementen

Element [-]	Aufbau [-]	Rohdichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit, gemessen [W/mK]
W1	MI-MII _{NS} (IWB)-4.2-MI	1.488	0,351
W2	MI	2.030	1,045
W3	MII _{NS} (IWB)-4.2, nach Pumpen	1.021	0,247
W4	MII _{NS} (IWB)-4.2, vor Pumpen	758	0,177

Mit dem gemessenen Wärmeleitkoeffizienten von 0,351 W/m²·K entspricht das gradierte Bauteil mit den Abmessungen 6 cm – 14 cm – 6 cm nicht der aktuellen EnEV für Neubauten. Aus den Messwerten lässt sich der vom System erreichte U-Wert für das Wandelement wie folgend berechnen:

$$U_{GrB} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{se}} = \frac{1}{0,13 + \frac{0,14}{0,247} + 2 \cdot \frac{0,06}{1,045} + 0,04} = 1,17 \frac{W}{m^2 \cdot K} \gg 0,21 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (8.6)$$

Um den nach EnEV geforderten U-Wert von 0,21 W/m²·K zu erreichen, müsste der Wärmeleitfähigkeit für den Leichtbeton bei Verwendung der gleichen Normalmischung höchstens 0,031 W/m²·K betragen, wie sich der folgenden Berechnung entnehmen lässt:

$$U_{GrB} = \frac{1}{R_T} \rightarrow R_T = \frac{1}{U_{GrB}} = \frac{1}{0,21} = 4,76 \quad (8.7)$$

$$R_T = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{se} \quad (8.8)$$

$$\rightarrow \lambda_1 = \frac{d_1}{R_T - R_{si} - R_{se} - \frac{d_2}{\lambda_2} - \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{0,14}{4,76 - 0,13 - 0,04 - 2 \cdot \frac{0,06}{1,045}} = 0,031 \frac{W}{m \cdot K} \quad (8.9)$$



Ein solch geringer Wärmeleitfähigkeit konnte für die wärmedämmende Leichtbetonschicht nach dem Pumpen im Rahmen des Projekts seitens des IWBs weder im Labor (vgl. Tabelle 5-4) noch am Versuchsstand (vgl. Tabelle 5-8) erreicht. Weitere Ansätze die geforderten Grenzwerte zu erreichen, wären neben der Rohdichtereduzierung des Leichtbetons beispielsweise die Reduktion des Wärmeleitkoeffizienten des Normalbetons und die Erhöhung der Bauteilabmessungen. Auch die Verwendung einer wärmedämmenden Betonrezeptur in den tragenden Randzonen des Sandwiches mittels eines gefügedichten Konstruktionsleichtbetons möglich.

8.2.4 Untersuchung des Schwindverhaltens

Einen weiteren, zwingend zu berücksichtigenden Punkt stellt das Schwindverhalten der beiden Betone dar. Bei Verwendung gradiertter Betonrezepturen sind unterschiedliche Schwindformänderungsraten und Schwindmaße zu berücksichtigen, die zu einem inneren Eigenspannungszustand im Querschnittsinnern führen. Um das Verhalten der einzelnen Betone experimentell zu erforschen, wurden sogenannte Schwindrinnen verwendet (Abbildung 71, rechts). Diese wurden mit Frischbeton gefüllt und mit einem empfindlichen Wegaufnehmer die schwindbedingten Formänderungen gemessen und dokumentiert. Die Messung erfolgte über einen Zeitraum von 91 Tagen. Den zeitlichen Verlauf des Schwindverhaltens für die untersuchten Betone MII_{NS} und MII_{NS}(B) zeigt

Abbildung 74. Die Betone weisen erwartungsgemäß ein verschieden schnelles Voranschreiten des Schwindens auf, was zu inneren Spannungen führen kann. An den hergestellten geschichteten Probekörpern konnten jedoch weder eine Delamination noch irgendwelche Verbundschäden infolge des unterschiedlich ausgeprägten Schwindverhaltens der eingesetzten Betone beobachtet werden.

8.2.5 Bewertung der Untersuchungen

Zusammenfassend ist anzumerken, dass mit den durchgeführten Versuchen und der hierbei eingesetzten Technologie eine Rohdichte von unter 500 kg/m³ im Nassspritzverfahren nicht erreicht werden konnte. Mit dem Leichtbeton, der speziell für das Nassspritzverfahren entwickelt wurde, sind minimale Rohdichten von etwa 900 kg/m³ im ofentrockenen festen Zustand und etwa 1.200 kg/m³ im frischen Zustand zu erzielen. Vergleicht man die Ergebnisse mit den Arbeitsergebnissen gegenwärtiger Publikationen [63], [64] so zeigt sich, dass die darin beschriebenen Leichtbetone zumeist eine Rohdichte von über 1.500 kg/m³ aufweisen. Somit konnten im Projekt deutliche Verbesserungen im Vergleich zu bisher untersuchten pumpfähigen Leichtbetonen erzielt werden. Mögliche Alternativen können beispielsweise Aerogelbetone sein, mit den Rohdichten von unter 500 kg/m³ erreicht werden können. Doch erlauben diese nur eine Verarbeitung im Gießverfahren und erfordern einen größeren Aufwand beim Mischen und Verarbeiten der Betone.

Im Bereich der Wärmedämmung konnte durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Betone leider kein zufriedenstellender U-Wert für das Nassspritzverfahren erreicht werden. Ein gradiertes Bauteil mit einem nass gespritzten Leichtbetonkern würde somit nicht den gültigen energetischen Anforderungen entsprechen. Auch bei anderen untersuchten leichten Betonen (vgl. Tabelle 5-4), die durch das Gießen einbaubar sind, wäre eine Ausführung mit den Abmessungen 6 cm – 14 cm – 6 cm kritisch zu hinterfragen. Die Mischung MII_{L,IWB}(AP) hat zwar eine Wärmeleitfähigkeit von 0,090 W/m * K (vgl. Tabelle 5-4), in Kombination mit dem entwickelten Normalbeton MI wäre bei gleichbleibender Stärke der MIschichten von 6 cm eine Kernschicht von 40 cm notwendig.

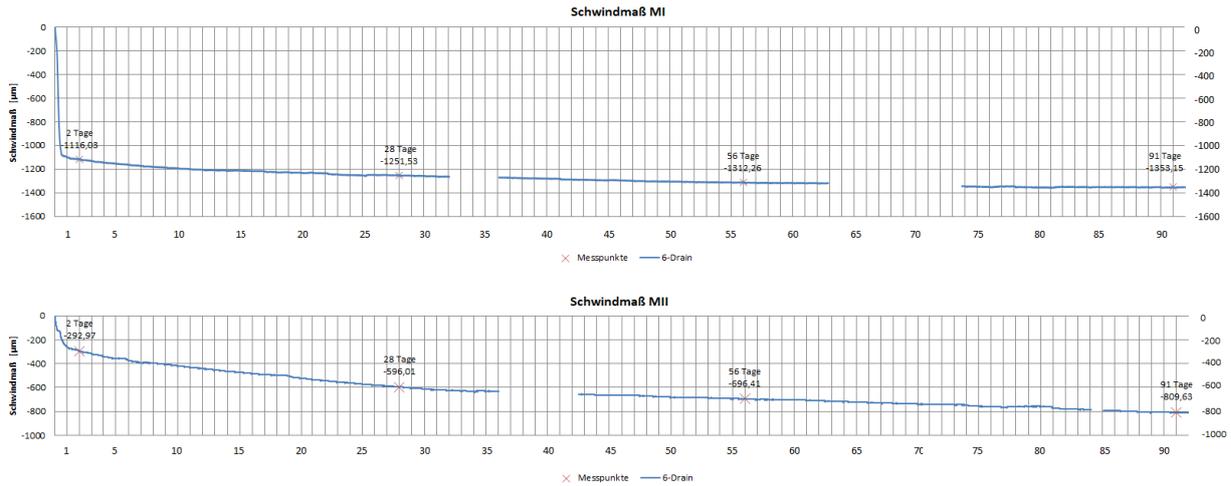


Abbildung 74: Schwindmaß von MI (oben) und MII_{ns}(B) (unten)

9 Konstruktive Detailsausbildung (AP 5, ILEK)

9.1 Grundlagen

Aufgrund der Vorfertigung der Wandbauteile müssen konstruktive Fragestellungen zur Verbindung und zum Transport der Fertigteile beantwortet werden. Die Verbindung ist ein wichtiger Punkt im Fertigteilbau; sie hängt von den zu verbindenden Bauteilen und der konstruktiven Ausbildung der Verbindung ab. Verbindungen im Betonfertigteilbau lassen sich nach geometrischer und konstruktiver Ausbildung kategorisieren (Abbildung 75). Dadurch wird eine Aussage zum Lastabtrag sowie zum Montage- und Demontageverhalten der Verbindungen gemäß dem Bauweisenbegriff [25] möglich.

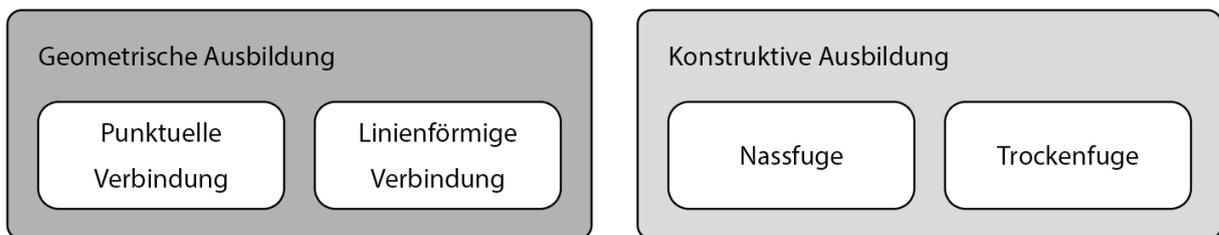


Abbildung 75: Kategorisierung der Verbindung nach geometrischer oder konstruktiver Ausbildung

Geometrisch wird unterschieden zwischen punktuellen Verbindungen (z.B. Träger-zu-Stütze oder Stütze-zu-Stütze) und linienförmigen Verbindungen (z.B. Decke-zu-Wand, Wand-zu-Wand oder Wand-zu-Fundament). Die punktuelle Fügung führt aufgrund der konzentrierten Einleitung von Lasten meist zu Spannungskonzentration im Bauteil, ermöglicht jedoch den Einsatz einfach zu montierender, lösbarer Verbindungsmittel. Linienförmige Verbindungen übertragen Lasten, vornehmlich Normal- und Schubkräfte, kontinuierlich über die gesamte Fuge. Die gewährleistet einen homogenen Spannungstransfer, ergibt jedoch kleinere Toleranzen. Die zu übertragenden Kräfte (Abbildung 76) zwischen zwei Bauteilen resultieren aus der äußeren Einwirkung sowie der Ausrichtung der Fuge in horizontaler oder vertikaler Richtung. In vertikalen Fugen treten vornehmlich Schubkräfte infolge horizontaler Wind- oder Aussteifungslasten auf. In horizontalen Fugen überwiegen Zug- und Druckkräfte aus den Aussteifungslasten oder vertikale Belastungen durch Decken oder Wände. Exzentrisch an eine Wand angeschlossene Bauteile induzieren zusätzlich Biegemomente in die Wand. Für resultierende Zugkräfte im Beton

muss eine zusätzliche Bewehrung vorgesehen werden. Daher liegt das Ziel im Entwurf von Anschlüssen an Wände darin, Lasten möglichst gleichmäßig in Bauteile einzuleiten, so dass diese eine reine Druckbeanspruchungen erfahren. Eine werkstoffgerechte und ressourceneffiziente Ausnutzung des Betons wird so möglich.

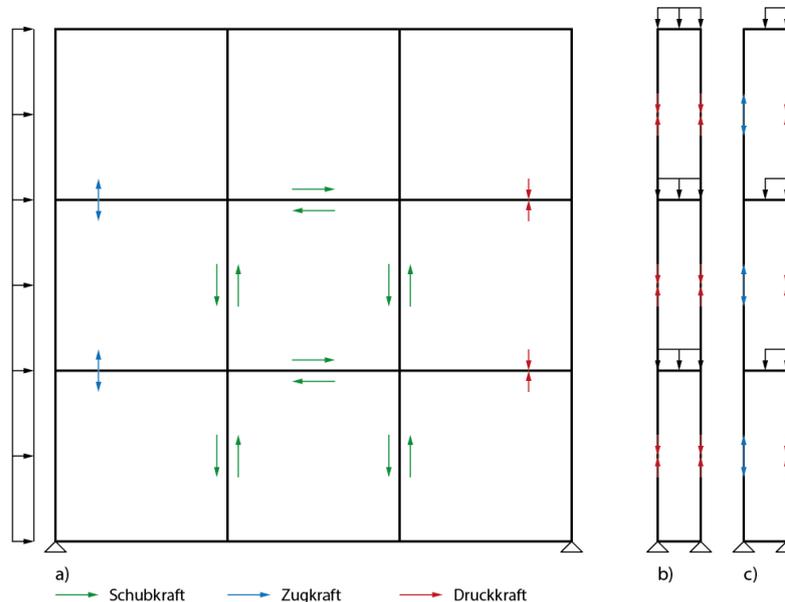


Abbildung 76: a) Exemplarische Verteilung von Kräften zwischen den Wandelementen bei einer Wandebene b) reine Druckbeanspruchung des Wandquerschnitts bei zentrischer Lasteinleitung c) Biegebeanspruchung des Wandquerschnitts bei exzentrischer Lasteinleitung

Bei der konstruktiven Ausbildung der Fugen kann grundsätzlich zwischen einer Nassfuge und einer Trockenfuge unterschieden werden. Unabhängig von deren Ausbildung muss die Verbindung gewisse Kriterien erfüllen [31], wie bspw. Langlebigkeit, Feuer- und Korrosionsbeständigkeit. Bei Nassfugen können diese Kriterien einfacher erfüllt werden, da durch die Verbindung mit einem Gussmörtel ein quasi homogenes Bauteil erreicht wird und somit die Dichtigkeit und Beständigkeit sichergestellt ist. Verbindungen mit Nassfugen können Kräfte optimal weiterleiten und sind für den Lastabtrag positiv zu bewerten. Allerdings ist der Montageaufwand erhöht, da meist zusätzliche Schalungen für den Verguss vonnöten sind und Lasten erst nach Erhärtung des Mörtels abgetragen werden können. Eine Demontage so verbundener Bauteile ist nur zerstörend möglich, eine Wiederverwendung der Bauteile praktisch ausgeschlossen. Trocken gefügte Bauteile lassen sich im Gegensatz zur Nassfuge schnell montieren und demontieren. Druckkräfte werden in der Verbindung über Kontakt abgetragen. Schubkräfte können bei ausreichender Druckbeanspruchung über Reibung aufgenommen werden oder durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen wie Verzahnungen oder Dübel. Der Transfer von Zugkräften über trockene Fugen erfolgt häufig durch metallische Einbauteile mit stahlbaumäßigen Verbindungen.

9.2 Konzeptionelle Ausarbeitung von Anschlussdetails

9.2.1 Horizontaler Decken-Wand-Anschluss

Decken-Wand-Anschlüsse werden derzeit nur als Nassfuge, also mit einem Mörtelverguss auf der Baustelle, ausgeführt und stellen einen monolithischen Verbund dar. Eine Alternative bietet die Verbindung mittels Implantat. Diese auf eine Erfindung von Werner Sobek zurückgehende Technologie ermöglicht das Ausleiten von konzentrierten Kräften aus hochbeanspruchten Bauteilen ohne Span-



nungsspitzen. Implantate werden in Betonbauteile eingegossen und sind in Geometrie und Materialbelegung so entworfen, dass Kräfte ohne auftretende Spannungskonzentration aus dem Beton ausgeleitet werden können. Die Implantate, die üblicherweise in einem hochfesten Material ausgeführt sind, ermöglichen das punktuelle Fügen von Bauteilen. Mit jüngeren Forschungsergebnissen [65] konnte nachgewiesen werden, dass die Technologie an dünnwandigen UHPC-Balken einsetzbar ist (Abbildung 77). Eine Übertragung auf flächige Bauteile erscheint daher als möglicher Ansatz für den Decken-Wand-Anschluss (Abbildung 78). Grundsätzlich könnte durch diese punktförmigen Verbindungen mit homogener Lasteinleitung ein einfacherer Montageprozess erreicht werden.

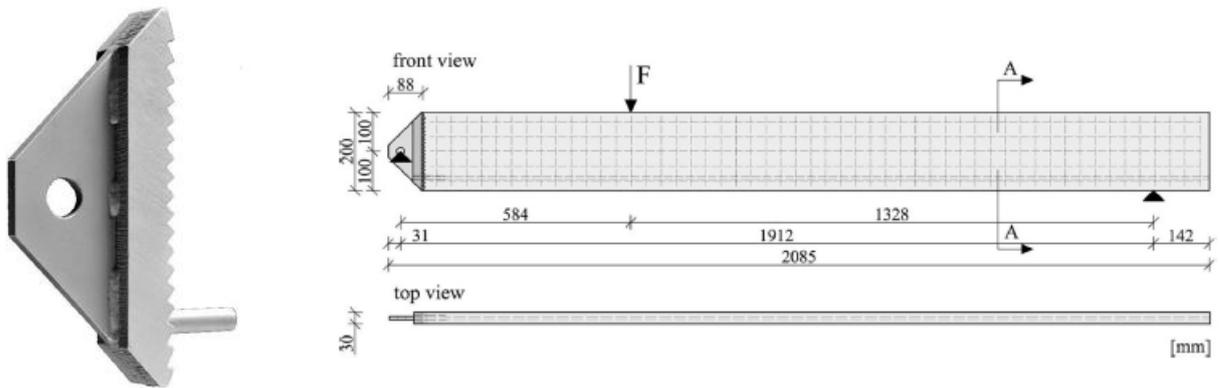


Abbildung 77 Implantat (links) zur Fügung eines UHPC-Balkens an ein gelenkiges Auflager. Im gezeigten Versuchsaufbau konnte eine Prüfkraft von 41 kN erreicht werden [65].

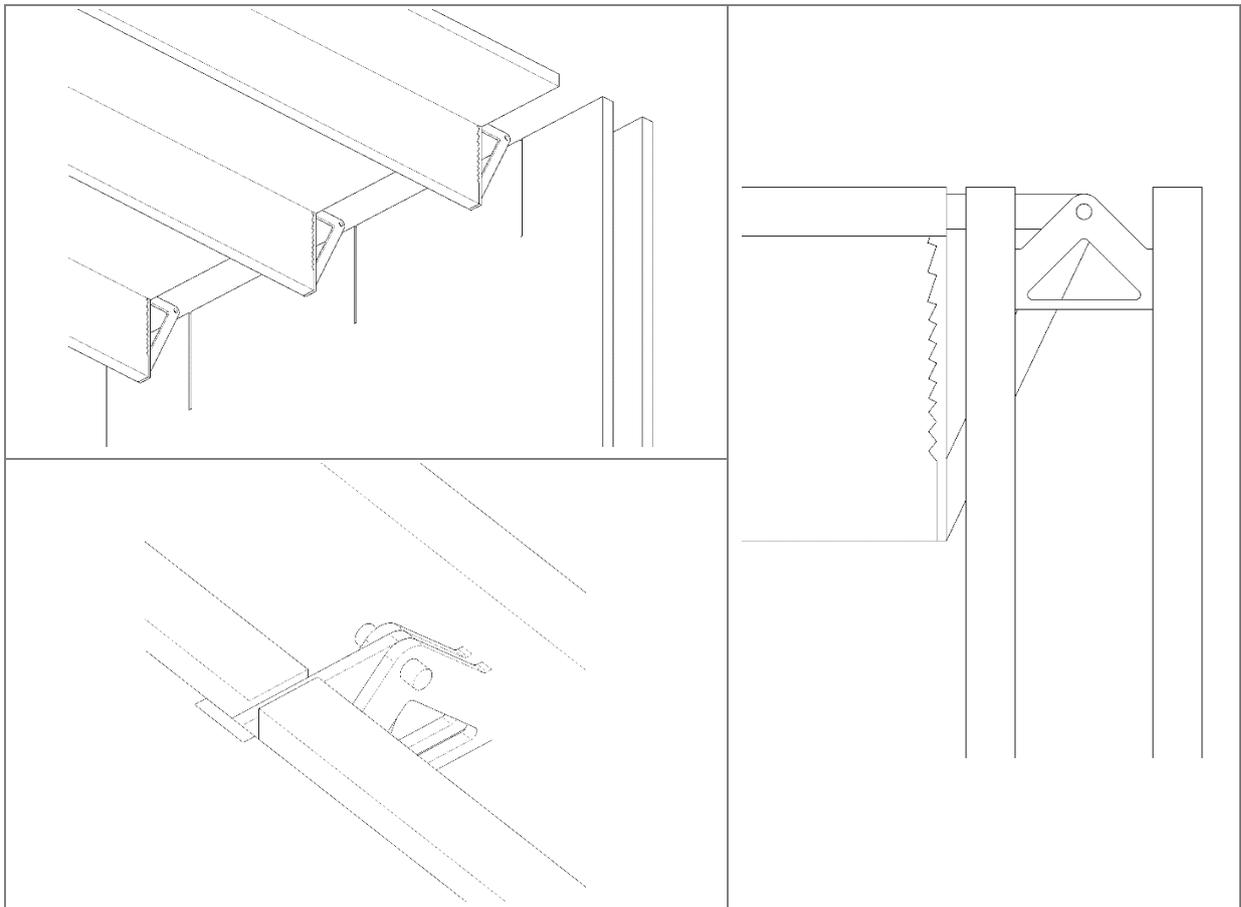


Abbildung 78: Exemplarische Ausbildung eines Anschlussdetails: Rippendecke-Wand mit Implantat

9.2.2 Horizontaler Wand-Wand-/Wand-Fundament-Anschluss

Die Ausführungen des Wand-Wand-Anschlusses und des Wand-Fundament-Anschlusses können mit einem Detail ausgeführt werden, da sowohl die Geometrie als auch die zu übertragenden Kräfte ähnlich sind. Klassisch können sogenannte Wandschuh-Verbindungen auch bei gradierten Wandquerschnitten eingesetzt werden. Dieses System besteht aus dem Wandschuh selbst und einem Befestigungsanker (Abbildung 79). Wandschuh und Anker werden bereits bei der Herstellung in das Fertigteil eingebaut. Die Lage des Wandschuhs befindet sich in der Regel am Fuß des Bauteils und der Anker an der Kopfseite. Beim Einsatz in Sandwichwänden ist darauf zu achten, dass die beiden Einbauteile jeweils in den tragenden Deckschichten eingebettet sind. Damit ist der Anschluss auch in der Lage, Zugkräfte in der Fuge aufzunehmen. Toleranzen zwischen den zu verbindenden Bauteilen werden durch entsprechende Langlöcher im Wandschuh ausgeglichen. Abbildung 79 c) zeigt einen möglichen Einbau des Anschlusssystems in die gradierte Sandwichwand. Dabei müssen entsprechende Mindestabstände laut Hersteller eingehalten werden. Eine erste überschlägige Berechnung des Wandschuhs ergab eine erforderliche Ankerlänge von 30 cm bei einem Stabdurchmesser des Ankers von 8 mm. Unter Berücksichtigung erforderlicher Betondeckungen ist dies ohne weitere Maßnahmen in die Deckschichten integrierbar.

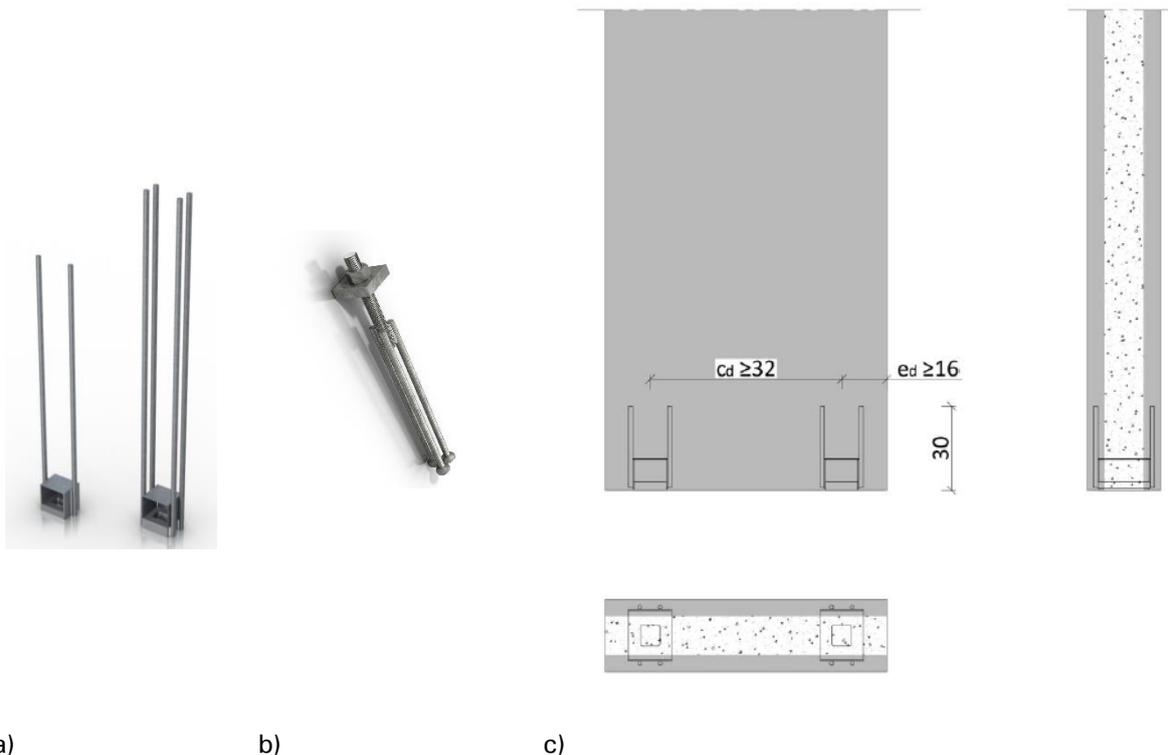
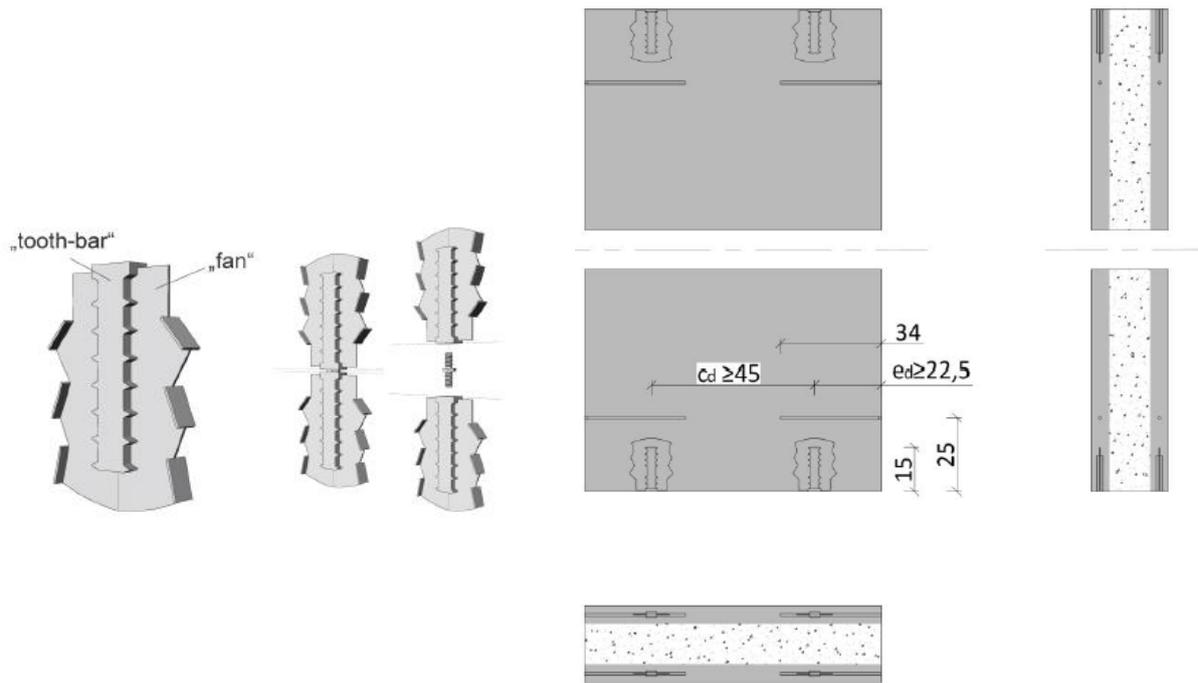


Abbildung 79: a) Wandschuh (Quelle: Peikko Deutschland), b) Anker (Quelle: Peikko Deutschland), c) Wandschuh in Sandwichtaufbau

Auch bei dieser Verbindung wäre eine Ausbildung mittels Implantat möglich. Das in Abbildung 80 gezeigte Implantat wurde explizit für das Einleiten großer Druckbeanspruchungen in dünnwandige Scheiben entwickelt, kann dabei zugleich geringe Zugkräfte aufnehmen [66]. Für die zu erwartenden Lasten an einer Wand-Fundament Verbindung wäre es daher grundsätzlich geeignet. Durch die Ausführung als punktuelle Verbindung könnten Maßnahmen zum Toleranzausgleich auf wenige Punkte am Bauteil reduziert werden. Dies würde den Montageprozess auf der Baustelle vereinfachen. Eine mögliche Anpassung des Implantats an den Anwendungsfall wäre die Anbindung an die Bauteilbewehrung zur optimalen Ausleitung von Zugkräften. Eine Anbindung durch Verkleben [65] und über Umlenkung der Bewehrung [67] wurde bereits als grundsätzlich machbar nachgewiesen.



a)

b)

Abbildung 80: a) Detail des Implantats [66], b) Implantat in Sandwichtaufbau

9.2.3 Vertikaler Wand-Wand-Anschluss

Schwalbenschwanzverbindungen (bspw. POWERCON der Firma H-Bau Technik) und TENLOC® Elementverbinder der Firma Peikko stellen zwei mögliche Varianten für den vertikalen Wand-Wand-Anschluss dar. Schwalbenschwanzverbindungen sind insbesondere aus der Holz-Elementbauweise bekannt. Sie sind gekennzeichnet durch einen Nut- und Federanschluss, der eine passgenaue Verbindung der beiden Enden ermöglicht. Bei dem Anschluss POWERCON der Firma H-Bau Technik kommt beispielsweise ein galvanisch verzinktes Stahldetail zum Einsatz (Abbildung 81 a). Dieses wird in der Regel mit einer Schraubenverbindung in der Mitte des Querschnitts befestigt. Für den Einsatz in der gradierten Sandwichwand ist dies aufgrund des niedrigsten Betons in der Kernschicht nicht möglich. Aus diesem Grund wurde eine alternative Befestigung entwickelt. Das Einbauteil kann mit einer entsprechenden Hülse oder Bohrung versehen werden, durch die eine Bewehrung geführt wird, welche das Element in den Deckschichten verankert (Abbildung 81 b). Somit wird ein sich selbst justierender Anschluss in der vertikalen Fuge von Elementwänden geschaffen.

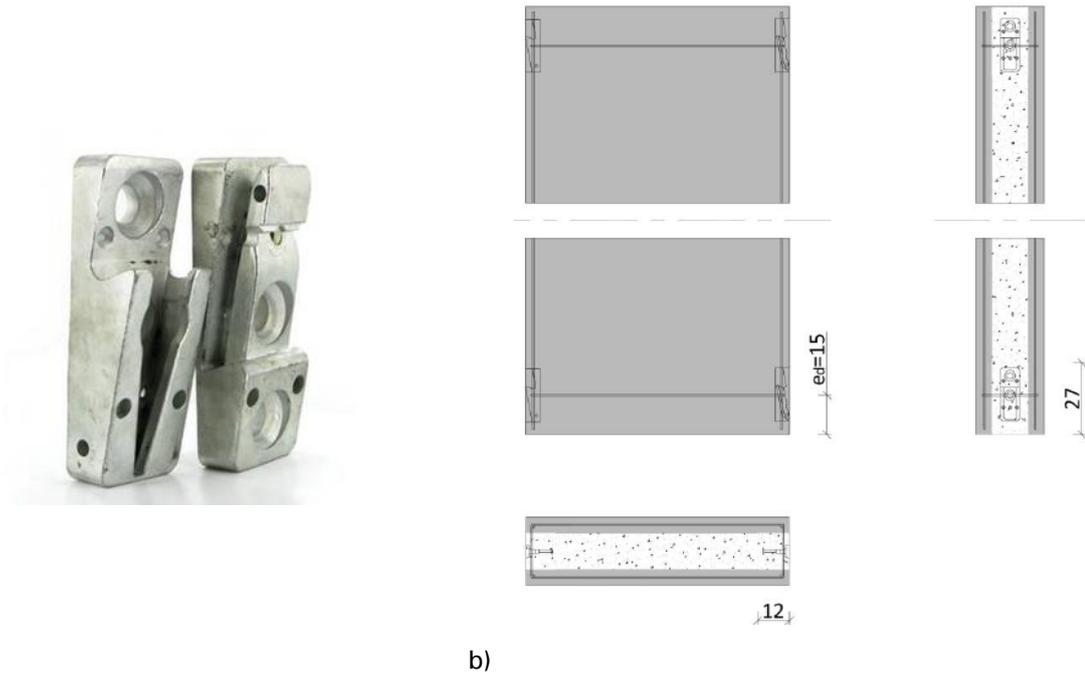


Abbildung 81: a) POWERCON (Quelle: H-Bau Technik GmbH), b) Schwalbenschwanzverbindung in Sandwichaufbau

Das Verriegelungssystem TENLOC® besteht aus zwei in Fertigteile eingebetteten Anchlusselementen (Abbildung 82 a). In einem Element befindet sich der Verriegelungsmechanismus, der über einen Bewehrungsstab in den beiden Deckschichten verankert werden kann. Das zweite Element enthält einen U-förmigen Anschluss, in den der Verriegelungsmechanismus einrasten kann. Dieses Anschlusskonzept bietet die gleichen Vorteile wie der Schwalbenschwanzanschluss, was insbesondere die Einfachheit und Rezyklierfähigkeit betrifft.

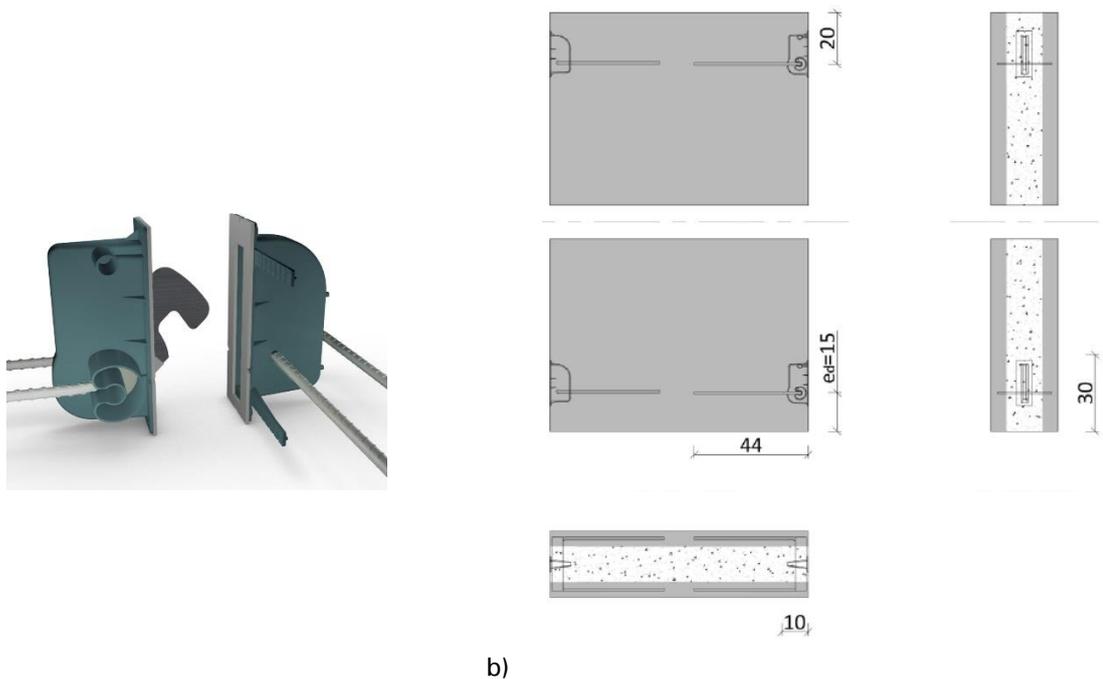


Abbildung 82: a) TENLOC (Quelle: Peikko Deutschland GmbH), b) Schwalbenschwanzverbindung in Sandwichaufbau



Da vertikale Wand-Wand-Anschlüsse im Wesentlichen Druck- und Schubkräfte übertragen müssen, könnten diese auch als Verzahnung ausgeführt werden. Sie lassen sich durch eingelegte Formteile in der Schalung herstellen und ermöglichen den Transfer von Lasten ohne weitere konstruktive Mittel rein über Kontakt. Aus dem Einsatz einer Verzahnung resultiert jedoch ein gehobener Anspruch an die Maßhaltigkeit der Bauteile. Bei unpräziser Ausführung der Fuge könnten Spannungsspitzen entstehen, die unter Umständen zu frühzeitigem Versagen im Bereich der Fügung führen. Durch Einsatz einer Elastomer-Zwischenschicht kann dem entgegengewirkt werden.

Grundsätzlich ist fallspezifisch abzuwägen, ob Beanspruchungen zwischen zwei komplanaren Wänden übertragen werden müssen. Die Aufgabe des Übertragens von horizontal wirkenden Beanspruchungen zwischen zwei Geschossdecken lässt sich durch ein einzelnes, monolithisches Element möglicherweise leichter lösen als durch mehrere zu fügende Elemente. Im Übrigen ist eine luft- und schalldichte, wärmedämmende

9.2.4 Transportanker

Unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Fertigteilbaus sind die Planung und Konstruktion von Hubankern und Hebezeugen zum Heben, Drehen und Transportieren der Betonelemente grundlegende Aufgaben, die bereits in einer frühen Projektphase zu erfüllen sind. Genau wie die Wandkonstruktion sind die Transportanker unterschiedlichen Belastungen durch den Transport und die Montage ausgesetzt. Bei der Bemessung von Hubankern müssen weitere Aspekte wie die Auswirkungen der Schalungshaftung, dynamische Bedingungen und Schrägzug berücksichtigt werden. Die auf einen Transportanker wirkende Kraft F_T kann durch (9.1) bestimmt werden:

$$F_T = \frac{1}{n} \cdot (F_G + F_{adh}) \cdot z \quad (9.1)$$

mit: F_T Ankerkraft [kN]

n Ankeranzahl

F_G Eigengewicht des Fertigteils [kN]

$F_{adh} = q_{adh} \cdot A_f$ Adhäsionskraft [kN]

$z = 1/\cos(\beta)$ Schrägzugfaktor

Generell gilt, dass zum Zeitpunkt des Anhebens die Betondruckfestigkeit nicht unter 15 N/mm² liegen darf. Aufgrund des Sandwichaufbaus ist ein geeignetes Ankersystem (bspw. PNLF Sandwichwand-Anker der Firma Peikko) zu wählen. Dieses Hebe- und Transportankersystem besteht aus einem Ankerstabpaar, das jeweils in die Deckschichten eingegossen wird und mit einer Hebelasche verbunden ist (Abbildung 83). Über die Wandlänge werden mindestens zwei dieser Systeme eingesetzt und ermöglichen so den Transport. Die vertikale Kraft, der jeder Anker beim Heben und Transportieren standhalten muss, beträgt für den Sandwichaufbau $F_T = 8,4 \cdot \cos(\beta)$ [kN/m]. Bei einem Ankerabstand von einem Meter und einem maximalen Neigungswinkel von 60° ist ein Anker vom Durchmesser 10 mm und einer Ankerlänge von 34 cm ausreichend für den Transport.

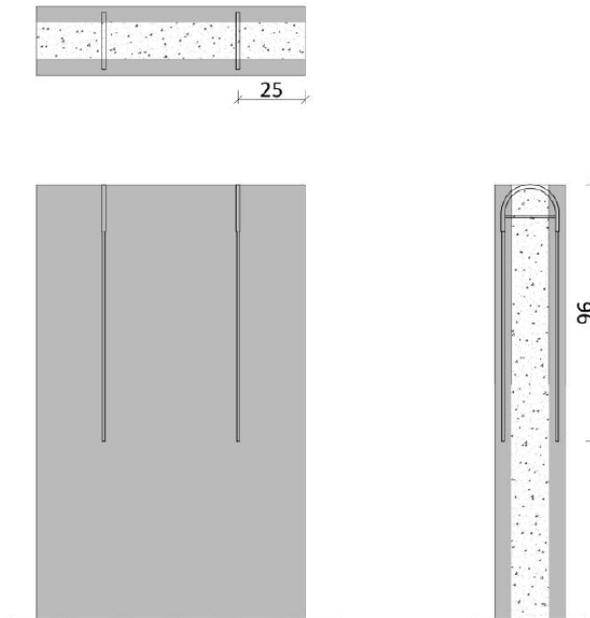


Abbildung 83: Transportanker in Sandwichaufbau

10 Preiskalkulation und Marktanalyse für die Gradientenwand (AP 6, ILEK)

10.1 Grundlagen und Eingrenzung der Preiskalkulation

Für die Ermittlung eines realistischen Baupreises der entwickelten Gradientenwand ist eine detaillierte Kenntnis des Herstellungsverfahrens und des gesamten Bauablaufs Grundvoraussetzung [68]. Die prototypisch entwickelten Herstellungsverfahren und die dabei eingesetzten Materialien und Betriebsstoffe sind hinreichend bekannt, sodass zuverlässige Kennwerte für die Bilanzierung vorliegen. Den weiterführenden Bauablauf gilt es zu präzisieren, sodass die Vergleichbarkeit zu herkömmlichen Wandsystemen gegeben ist. Des Weiteren ist der zu betrachtende Lebenszyklus festzulegen. DIN EN 15804 [69] gibt für Gebäude bzw. Bauteile ein Lebenswegmodell an, das sich in vier Phasen gliedert. Phase A beschreibt die Herstellung und Errichtung, Phase B die Nutzung, Phase C die Entsorgung. Vorteile bzw. Belastungen auf die Gesamtbilanz, die sich außerhalb der direkten Systemgrenzen (bspw. Recyclingpotential) befinden, sich in Phase D (Abbildung 84). Für den nachfolgenden wirtschaftlichen Vergleich der Gradientenwand mit anderen Wandaufbauten kann derzeit davon ausgegangen werden, dass sich unabhängig von der Bauweise keine signifikanten Unterschiede in der Nutzungsphase ergeben und diese für die weiteren Untersuchungen vernachlässigbar ist. Die Entsorgungsphase und die mögliche Wiederverwendung sind zum jetzigen Zeitpunkt nur mit starker Unsicherheit in der Preiskalkulation zu beziffern, sodass diese ebenfalls vernachlässigt werden. Es ist jedoch anzumerken, dass eine Gradientenwand aufgrund der Materialeffizienz geringere Mengen an Abbruch verursacht und durch den sortenreinen, mineralischen Aufbau auch potentiell wieder vollständig aufbereitet werden kann. Die Analyse des Marktpreises wird auf Basis der Herstellungs- und Errichtungsphase durchgeführt ohne die Vorteile am Lebensende zu berücksichtigen.

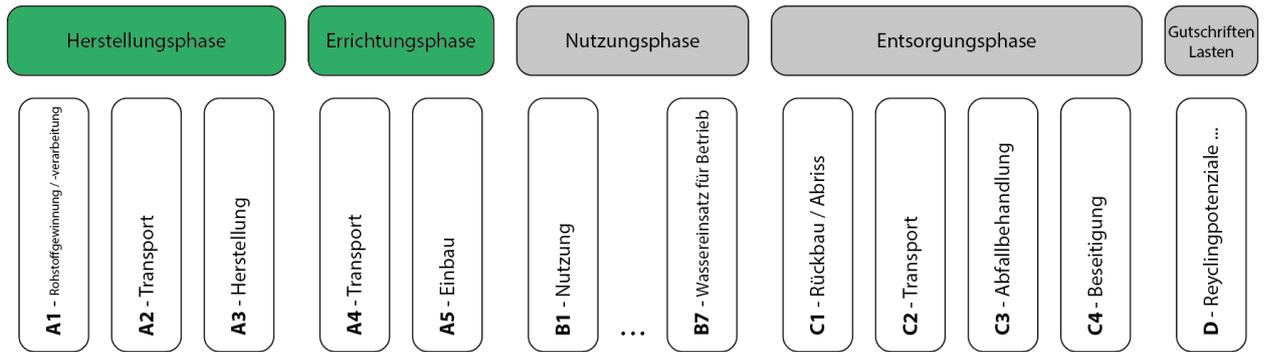


Abbildung 84: Lebenszyklusmodell nach DIN EN 15804 [69]

Auf Basis des Lebenszyklusmodells erfolgt für eine klare Zuordnung der verursachungsgerechten Kosten eine weitere Unterteilung der einzelnen Phasen gemäß Bauauftragsrechnung [70]. Diese Gliederung ergibt sich infolge des im Bauwesen gängigsten Verfahrens, der sogenannten *Kalkulation über die Angebotssumme* (Abbildung 85). Zunächst werden dabei die Herstellkosten eines gesamten Bauobjekts oder auch eines einzelnen Bauteils berechnet. Diese setzen sich zusammen aus den Einzelkosten der Teilleistung, aus den einer Leistung unmittelbar zurechenbaren Kosten (Lohnkosten, sonstige Kosten, Gerätekosten und Kosten der Fremdleistung), sowie den Gemeinkosten, die aus dem allgemeinen Betrieb entstehen, sich jedoch keiner Leistung direkt zurechnen lassen. Danach wird die Netto-Angebotssumme durch die Beträge für die allgemeinen Geschäftskosten (AGK) sowie Wagnis und Gewinn (W&G) gebildet. In den Unternehmen werden hierfür in der Regel 10 % AGK und 3 % W&G bezogen auf die Netto-Angebotssumme angesetzt [70]. Somit ergibt sich ein Zuschlag von 14,94 % für AGK + W&G auf die Herstellkosten. In der weiteren Untersuchung wird auf dieser Grundlage zunächst der Einheitspreis eines Quadratmeters gradiert Wand in der Herstellungsphase bestimmt und mit den weiteren Kosten der Errichtung beaufschlagt. Somit ergibt sich ein Baukostenwert der gradierten Wand, der den herkömmlichen Wandaufbauten wie Mauerwerk oder Wärmedämmverbundsystemen gegenübergestellt werden kann. Der Aufwandswert für die Vergleichssysteme wird aus der BKI-Baukosten [71] entnommen.

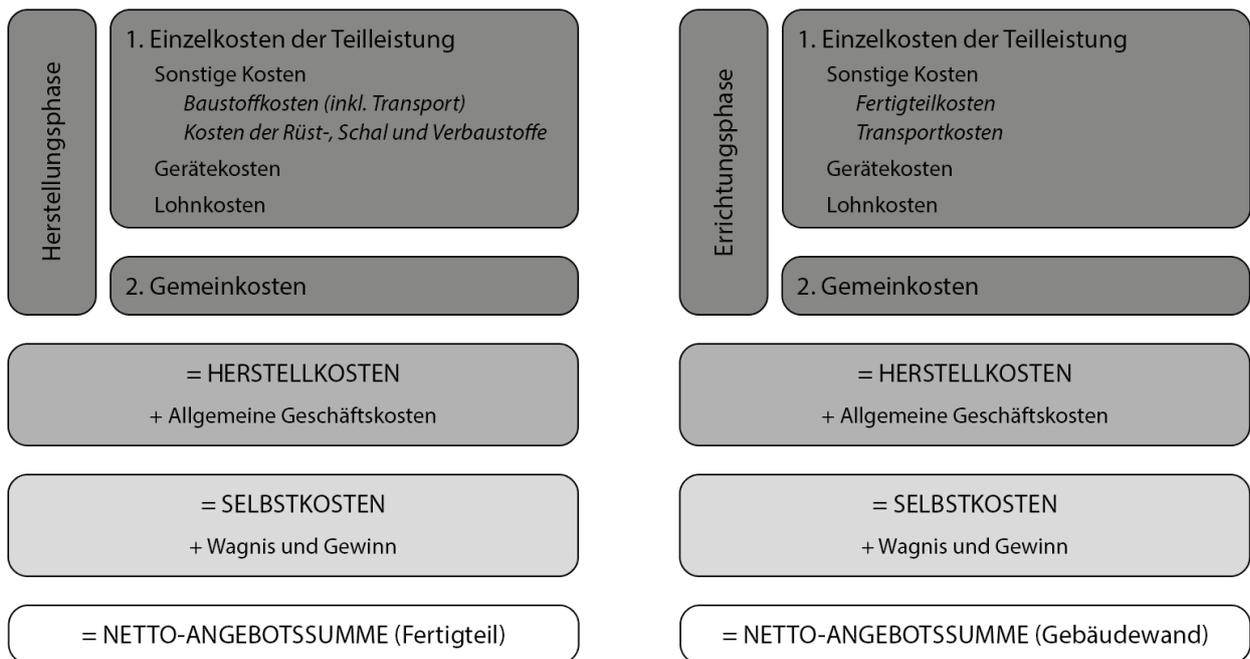


Abbildung 85: Kalkulation der Angebotssumme der Gradientenwand für die einzelnen Lebenszyklusphasen



10.2 Einzelkosten der Gradientenwand in der Herstellungsphase

10.2.1 Baustoffkosten

Eine Kostenkalkulation der Gradientenwand erfordert im Vorfeld eine Analyse der Rohstoffpreise der für die Betonherstellung notwendigen Materialien. Für die einzelnen Rohstoffe liegen jedoch keine nationalen Preisstatistiken vor. Aus diesem Grund erfolgt im Rahmen einer Recherche die Ermittlung von beispielhaften Produktpreisen für die verwendeten Rohstoffe. Dabei gilt anzumerken, dass Preise je nach Bezugsmenge, Region und Hersteller voneinander abweichen können. Für die erste Einschätzung eines Markteinführungspreises und den ökonomischen Vergleich der Entwurfsvarianten bieten die in Tabelle 10-1 aufgelisteten Rohstoffpreise eine hinreichende Genauigkeit. Die Transportkosten werden nach einer Stichprobenuntersuchung pauschal über eine 10 % Preiserhöhung mitberücksichtigt. Die Produktpreise wurden entsprechend dem 5-Stoff-System Beton gruppiert in Zuschlagstoffe, Zusatzmittel, Zusatzstoffe, Bindemittel sowie Wasser und durch die Preise für die Bewehrung ergänzt (Tabelle 10-1). Aus der Zusammenstellung wird bereits ersichtlich, dass die üblicherweise in hohen Mengen im Beton eingesetzten Rohstoffe Sand und Kies sehr niedrige Preise aufweisen. Die Zusatzmittel und Zusatzstoffe dagegen weisen deutlich höhere Preise auf, werden aber in der Regel eher in geringeren Mengen in den Betonrezepturen verwendet. Diese Aussagen sind allerdings noch sehr vage und erfordern in einem weiteren Schritt die Kalkulation der Preise für die einzelnen Betonmischungen.

Tabelle 10-1: Zusammenstellung der Rohstoffpreise

	Material	min. Preis	max. Preis	min. Preis (+ Transport)	Einheit
Zuschlagstoffe	Sand 0/2	23,50	27,00	25,9	€/t
	Kies 16/32	23,50	27,00	25,85	€/t
	Edelsplitt 2/5	27,50	30,00	30,36	€/t
	Muschelkalksplitt 2/5	16,00	19,00	17,72	€/t
	Blähton (4-8 mm)	167,00		183,27	€/m ³
	Blähglas (0,25-0,5 mm)	232,00		255,20	€/m ³
	Blähglas (0,5-1 mm)	187,00		205,98	€/m ³
	Blähglas (1-2 mm)	167,00		183,38	€/m ³
	Blähglas (2-4 mm)	149,00		164,08	€/m ³
	Perlit	142,00		156,20	€/m ³
Zusatzmittel	Fließmittel	1,00	2,40	2,15	€/kg
	Luftporenbildner	1,00		1,38	€/kg
	Beschleuniger	1,00	1,50	1,10	€/kg
	Stabilisator	3,00	4,00	3,30	€/kg
Zusatzstoffe	Kalksteinmehl	18,00		19,70	€/t
	Flugasche	66,00		72,60	€/t
	Silica	600,00		660,00	€/t
	Mikrohohlkugeln	10,00		12,16	€/kg
	Aerogel (Cabot)	15,00		16,50	€/kg
	Pyrogene Kieselsäure	31,00	60,00	34,10	€/kg
Bindemittel	Zement (CEM I 52,5 R)	127,00		190,30	€/t
Wasser	Wasser	4,00		4,00	€/m ³
Bewehrung	Stahl	1,50		1,65	€/kg
	Glasfaser	16,50		18,15	€/m ²
	Kohlefaser	50,00		55,00	€/m ²



Auf Basis der zusammengestellten Rohstoffpreise können die Baustoffkosten für die Betonmischungen kalkuliert werden. Diese Kalkulation basiert auf den verwendeten Mengen der jeweiligen Rohstoffe und vernachlässigt den Mischprozess. Die Kosten für die Herstellung der Betone fließen erst bei der Kalkulation der fertigen Wände über die Gerätekosten mit ein, da jedes Verfahren seine spezifischen Mischzeiten aufweist. Tabelle 10-2 stellt die Ergebnisse des Kostenvergleichs der Betonmischungen zusammen. Die Basismischung MI weist unabhängig vom Verfahren einen niedrigen Preis gegenüber der jeweiligen Basismischung MII auf. Generell sind die Basismischungen MI des Nassspritzverfahrens höherpreisig gegenüber den beiden anderen Verfahren, was unmittelbar auf den notwendigen Einsatz von Zusatzmitteln zurückzuführen ist. $M_{NS,IWB}$ ist derzeit mit 202 €/m^3 die teuerste der Basismischungen MI, deren Preisunterschied sich in erster Linie aus der Verwendung von Silica als Zusatzstoff ergibt. Die hervorragenden Wärmedämmeigenschaften und die minimale Rohdichte von $M_{IIsg}(AM)$ werden nur durch die teuren Zusatzstoffe Aerogel und Mikrohohlkugeln möglich. Folglich ist die Mischung mit knapp 2.000 €/m^3 die teuerste Mischung und damit fast 13-mal teurer als ein Standardbeton. Analog zur Basismischung MI ist auch bei der Basismischung MII eine ähnliche Preisstruktur zu erkennen. Die Trockenspritzmischung ist am preisgünstigsten, da auf Zusatzmittel verzichtet werden kann. Die beiden teureren Nassspritzmischungen unterscheiden sich preislich aufgrund der unterschiedlichen Zusatzstoffe und -mittel.



Tabelle 10-2: Kosten pro m³ Beton für die bislang im Projekt untersuchten bzw. eingesetzten Mischungen

	Basismischung I	Basismischung II
Gießen	<p>MI_{SG}: 136 €/m³</p> <p>Zuschlagstoffe Zusatzmittel Zusatzstoffe Bindemittel Wasser</p>	<p>MI_{SG(AM)}: 1.934 €/m³</p> <p>Zuschlagstoffe Zusatzmittel Zusatzstoffe Bindemittel Wasser</p>
	Nassspritzen	<p>MI_{NS,IWB}: 202 €/m³</p> <p>Zuschlagstoffe Zusatzmittel Zusatzstoffe Bindemittel Wasser</p>
Trockenspritzen		<p>MI_{TS,IWB}: 109 €/m³</p> <p>Zuschlagstoffe Zusatzmittel Zusatzstoffe Bindemittel Wasser</p>



10.2.2 Kosten der Rüst- und Schalstoffe

Bei dieser Kostengruppe gibt es grundlegende Unterschiede zwischen der Ortbetonherstellung und der Herstellung von Beton-Fertigteilen. Werden vor Ort Rahmen- oder Trägerschalungen eingesetzt, die geschossweise auf- und abgebaut werden müssen, so erfolgt die Produktion im Werk meist auf sogenannten Kipptischen oder auf Flachbahnen [72]. Wandelemente werden in der Regel auf Kipptischen in liegender Position hergestellt und anschließend aufgerichtet, sodass keine zusätzlichen Beanspruchungen durch den Hebevorgang auf die Wand wirken. Die Arbeitsplattform des Kipptisches besteht aus Stahl und stellt eine wiederverwendbare Schalhaut dar. Auf dieser werden die Randschalungen aus Holz, Stahl oder als Kombination von beidem fixiert, deren Höhe sich nach der Elementdicke richtet. Durch diese Systemschalungen werden die Herstellkosten gesenkt und die Produktivität gesteigert [31]. Die Kosten hierfür können pauschal wie folgt angesetzt werden:

- Verbrauchsstoffe und Gerätekosten: 2,50 €/m²

10.2.3 Gerätekosten

Die Gerätekosten umfassen alle mit der Vorhaltung, dem Betrieb und der Bereitstellung des Geräts verbundenen Kosten, wobei diese in der Kalkulation durch die Kosten für Abschreibung und Verzinsung (A + V) sowie den Reparaturkosten (R) erfasst werden [70]. Für die Abschätzung der Gerätekosten wird die Baugeräteliste (BGL) [73] herangezogen. Dieses Nachschlagewerk basiert auf betrieblichen Erfahrungswerten und umfasst neben dem Neuwert und der Nutzungsdauer eines Gerätes auch die zur Kalkulation erforderlichen Kosten für A + V + R. Für die Herstellungsprozesse des schichtweisen Gießens und des Nassspritzens wurden charakteristische Kostensätze aus der BGL entnommen und in den Prozessablauf integriert. Somit ist es möglich, die Gerätekosten verfahrensabhängig bei den Einzelkosten der Gradientenwand zu berücksichtigen und im Laufe der weiteren Entwicklung der Technologie zu modifizieren.

Der Entwurf der gradierten Wand sieht vor, das Bauteil durch drei Schichten mit zwei unterschiedlichen Betonmischungen aufzubauen. Hierzu ist es notwendig, die jeweiligen Betonrezepturen zu mischen, zu fördern und einzubauen. Aufgrund dieses Herstellungsablaufs ergeben sich die in Abbildung 86 dargestellten Prozessschritte. Die ökonomischen Kennwerte für Mischer und Betonpumpe sind der BGL entnommen. Für das prototypische Portalsystem ist ein überschlägiger Kostensatz angenommen, der sich aus vergleichbaren Preisen von Maschinenneuwerten ableitet. Entsprechend den einzelnen Prozessschritten können die leistungsbezogenen Kosten bestimmt werden. Die Rahmenbedingungen für diese Berechnung werden wie folgt festgelegt:

- tägliche Betriebszeit von 8 h/Tag
- 20 Arbeitstage pro Monat

Es ergibt sich ein mittlerer Kostensatz für das Mischen und Fördern eines Kubikmeters Beton unter voller Auslastung (7,5m³/h) von 1,21 €/m³. Die Kosten für die Nutzung des Portalsystems belaufen sich infolge gleicher Randbedingungen auf 18,75 €/h.

Schichtweises Gießen

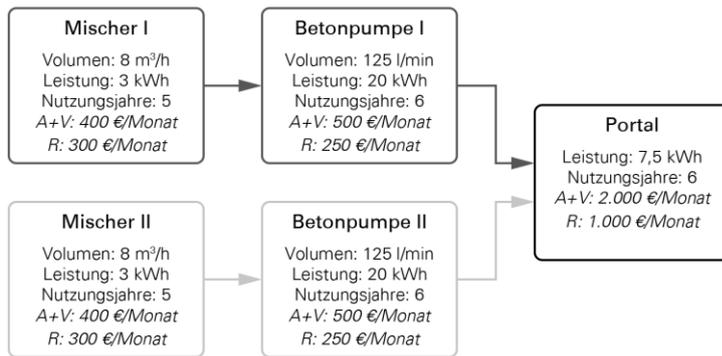


Abbildung 86: Ökonomische Prozessdaten für das schichtweise Gießen

Vergleichbar zum Gießen baut sich der Prozess des Nassspritzens auf (Abbildung 87). Hierbei werden allerdings noch ein Kompressor für den Sprühauftrag des Materials und eine Dosierpumpe für die Zugabe des Beschleunigers erforderlich. Die entsprechenden Kostensätze für A + V + R leiten sich aus den Anschaffungskosten und der Nutzungsdauer gemäß Gerätekostenermittlung ab [70]. Durch die zusätzlichen Komponenten erhöhen sich die Nutzungskosten für die Materialapplikation von 18,75 €/h auf 25,94 €/h, wobei der Kostensatz für das Mischen und Fördern unverändert bleibt.

Nassspritzen

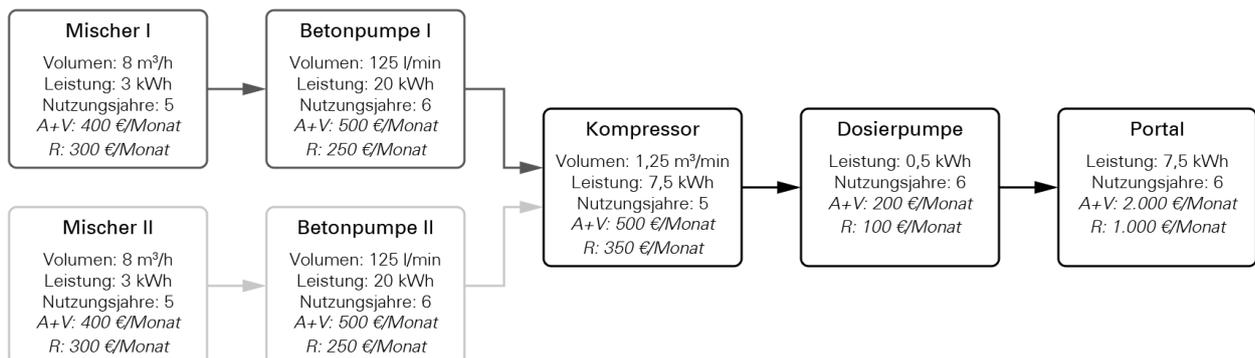


Abbildung 87: Ökonomische Prozessdaten für das Nassspritzen

Aufgrund der detaillierten Abbildung der Prozessabläufe wird es möglich, die Betriebsstoffkosten der einzelnen Geräte direkt zuzuordnen und nicht wie üblich über die Gemeinkosten der Baustelle zu berücksichtigen. Angesetzt werden hierbei die Kosten der elektrischen Energie für den Betrieb der Maschinen, berechnet anhand der Maschinenleistung und der Betriebsdauer. Basis bildet ein durchschnittlicher Strompreis von 0,29 €/kWh.

10.2.4 Lohnkosten

Die Lohnkosten beinhalten sämtliche Kosten, die sich aus einer Beschäftigung eines Arbeitnehmers ergeben [70]. Der in der Praxis angesetzte Mittellohn schließt neben den tariflichen Löhnen auch weitere Lohnzusatzkosten wie z.B. Sozialkosten oder Lohnnebenkosten ein. Die tariflichen Löhne finden sich landesspezifisch in den Lohntabellen für das Baugewerbe. Für die weitere Betrachtung sind die Lohngruppe 2 des Fachwerkers (z.B. Fertigteilmacher) und die Lohngruppe 4 des Baumaschinenführers von Relevanz, deren gesetzliche Tariflöhne nach [74] wie folgt sind:

- GTL - Lohngruppe 2: 14,95 €/h
- GTL - Lohngruppe 4: 20,95 €/h



Die weiteren Lohnzusatzkosten können in der Mittellohnberechnung detailliert aufgeführt und für den jeweiligen Einzelfall kalkuliert werden. Da im Rahmen der ökonomischen Analyse der Gradientenwand eine erste Abschätzung eines möglichen Markteinführungspreises erfolgen soll, wird auf eine detaillierte Berechnung der Lohnnebenkosten verzichtet. Pauschal wird ein Zuschlag von 100 % auf den GTL angenommen, da dies eine realistische Größenordnung darstellt [70]. Es ergeben sich folgende Mittellöhne für die weiteren Berechnungen:

- ASL - Lohngruppe 2: 29,90 €/h
- ASL - Lohngruppe 4: 41,90 €/h

Für die anteiligen Lohnkosten an einer Leistung sind zusätzlich die entsprechenden Arbeitszeitrichtwerte zu berücksichtigen. Hierfür stehen dem Bauwesen die sogenannten ARH-Tabellen (Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau) [75] zur Verfügung, deren Richtwerte aus Zeitmessungen auf Baustellen in Deutschland ermittelt werden konnten. Sie enthalten die erforderlichen Angaben zu Schalungs-, Bewehrungs- und Betonarbeiten.

- Schalarbeiten: 0,2 h/m²
- Bewehrungsarbeiten: 15 h/t

10.2.5 Einzelkosten der Entwurfsvarianten in der Herstellung

Die Berechnung der Einzelkosten der beiden Entwurfsvarianten wird positionsweise bestimmt und bezieht sich auf einen Quadratmeterpreis einer hergestellten Wand. Zunächst erfolgt die positionsbezogene Einheitspreisermittlung der mikrogradierten Sandwichwand (Abbildung 88 und Tabelle 10-3), anschließend die der mesogradierten Wand (Abbildung 89 und Tabelle 10-4).

Die Herstellkosten des Sandwichaufbaus belaufen sich auf 311,44 €, wobei der überwiegende Kostenanteil von 87,41 % auf die Herstellung der wärmedämmenden Betonschicht aus Aerogel entfällt. Auf Grund dieses hohen Anteils haben die anderen Positionen nur eine untergeordnete Bedeutung für die Herstellkosten, die in Summe 39,20 € betragen. Die Netto-Angebotssumme dieses Wandaufbaus unter Berücksichtigung von AGK sowie W&G kann mit 358,00 € angegeben werden.

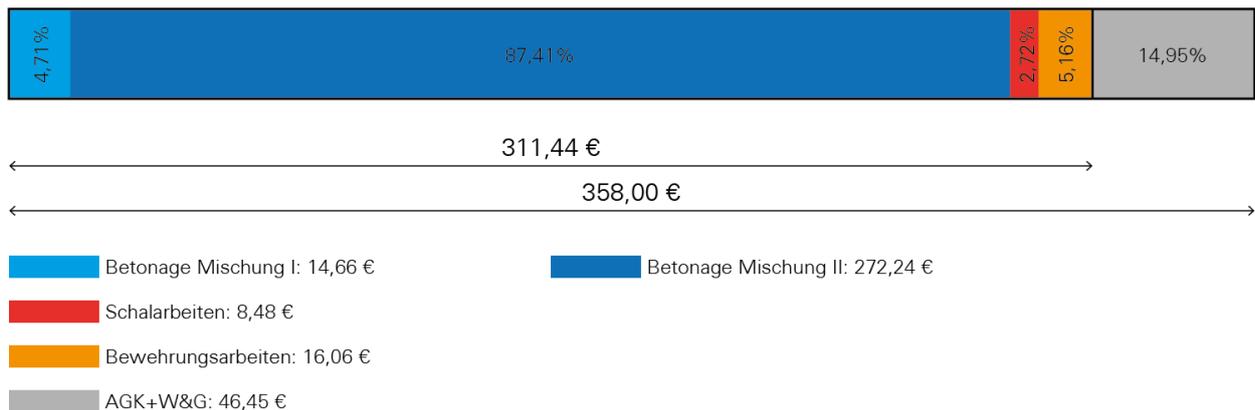


Abbildung 88: Prozentuale Kostenverteilung für die Herstellung von 1 m² der mikrogradierten Sandwichwand

Tabelle 10-3: Positionsbezogene Einheitspreisermittlung für die Herstellung von 1 m² der mikrogradierten Sandwichwand

Pos. Nr.	Beschreibung Menge u. Einzelkostenentwicklung	Kostenarten ohne Umlagen je Einheit		
		Lohn [h]	Soko [€]	Geräte [€]
1	Betonage Mischung I a) Baustoffkosten 2 x 0,05 m x 1,00 m ² x 136 €/m ³ b) Betriebsstoffkosten Betriebsdauer 2 x 0,05 m x 1,00 m ² / 7,5 m ³ /h = 0,0133 h Mischer: 0,0133 h x 3 kWh x 0,29 €/kWh Betonpumpe: 0,0133 h x 20 kWh x 0,29 €/kWh Portal: 0,0133 h x 7,5 kWh x 0,29 €/kWh c) Gerätekosten Mischer + Pumpe 2 x 0,05 m x 1,00 m ² x 1,31 €/m ³ Portal: 0,0133 h x 18,75 €/h d) Lohnkosten Maschinenführer: 0,0133 h x 41,90 €/h	0,56 €	13,60 €	0,01 € 0,08 € 0,03 € 0,13 € 0,25 €
2	Betonage Mischung II a) Baustoffkosten 1 x 0,14 m x 1,00 m ² x 1934 €/m ³ b) Betriebsstoffkosten Betriebsdauer 1 x 0,14 m x 1,00 m ² / 7,5 m ³ /h = 0,0187 h Mischer: 0,0187 h x 3 kWh x 0,29 €/kWh Betonpumpe: 0,0187 h x 20 kWh x 0,29 €/kWh Portal: 0,0187 h x 7,5 kWh x 0,29 €/kWh c) Gerätekosten Mischer + Pumpe 1 x 0,14 m x 1,00 m ² x 1,31 €/m ³ Portal: 0,0187 h x 18,75 €/h d) Lohnkosten Maschinenführer: 0,0187 h x 41,90 €/h	0,78 €	270,76 €	0,02 € 0,11 € 0,04 € 0,18 € 0,35 €
3	Schalarbeiten a) Rüst- und Schalstoffe Verbrauchsstoffe und Gerätekosten b) Lohnkosten Fachwerker: 0,2 h/m ² x 29,90 €/h	5,98 €		2,50 €



4	Bewehrungsarbeiten a) Baustoffkosten (Q257 A) 2 x 4,12 kg/m ² x 1,00 m ² x 1,50 €/kg b) Lohnkosten Betriebsdauer 2 x 4,12 kg/m ² x 1,00 m ² x 15 h/t = 0,1236 h Fachwerker: 0,1236 h x 29,90 €/h	3,70 €	12,36 €	
---	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------	---------	--

Die mesogradierte Wand weist deutlich niedrigere Herstellkosten auf, was in erster Linie auf den Verzicht von Aerogel und Mikrohohlkugeln zurückzuführen ist. Bei dieser Variante wird die Wärmedämmung durch die Hohlkörper aus Beton sichergestellt, deren Stückpreis zu 5 Cent pro Kugel angenommen wurde. Vergleicht man Kunststoffkugeln, so liegen diese preislich bei 3 Cent pro Stück. Die reinen Materialkosten einer Betonhohlkugel betragen etwa 2 Cent, sodass der angenommene Stückpreis plausibel erscheint. Es ergibt sich für die Betonarbeiten inklusive Einbau der Hohlkugeln ein Kostenanteil von rund 70 % an den Herstellkosten. Schalarbeiten von 10 % und Bewehrungsarbeiten von 20 % decken sich recht gut mit den bekannten Kostenstrukturen von Betonfertigteilen [72]. Mit der Zulage von AGK sowie W&G ergibt sich eine Netto-Angebotssumme pro Quadratmeter mesogradierter Wand von 95,09 €.

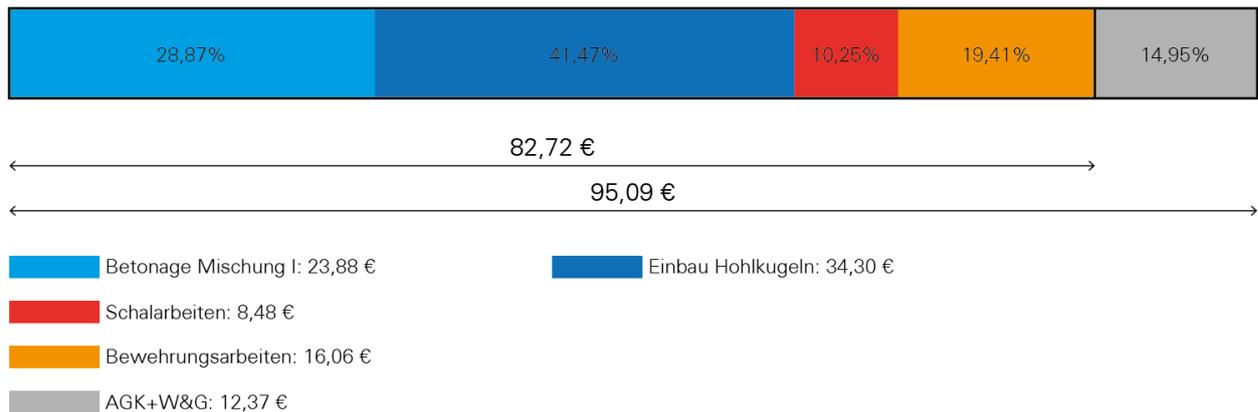


Abbildung 89: Prozentuale Kostenverteilung für die Herstellung von 1 m² der mesogradieren Wand

Tabelle 10-4: Positionsbezogene Einheitspreisermittlung für die Herstellung von 1 m² der mesogradieren Wand

Pos. Nr.	Beschreibung Menge u. Einzelkostenentwicklung	Kostenarten ohne Umlagen je Einheit		
		Lohn [h]	Soko [€]	Geräte [€]
1	Betonage Mischung I a) Baustoffkosten 0,12 m x 1,00 m ² x 136 €/m ³ + 0,26 x 0,165 m * 1,00 m ² x 136 €/m ³ b) Betriebsstoffkosten Betriebsdauer (0,12 m + 0,26 x 0,165 m) x 1,00 m ² / 7,5 m ³ /h = 0,0217 h Mischer: 0,0217 h x 3 kWh x 0,29 €/kWh Betonpumpe: 0,0217 h x 20 kWh x 0,29 €/kWh		22,15 €	0,02 € 0,13 € 0,05 €



	Portal: 0,0217 h x 7,5 kWh x 0,29 €/kWh c) Gerätekosten Mischer + Pumpe (0,12 m + 0,26 x 0,165 m) x 1,00 m ² x 1,31 €/m ³ Portal: 0,0217 h x 18,75 €/h d) Lohnkosten Maschinenführer: 0,0217 h x 41,90 €/h			0,21 € 0,41 € 0,91 €
2	Einbau Hohlkugeln a) Baustoffkosten 250 x 0,05 €/Kugel b) Betriebsstoffkosten Betriebsdauer 250 x 5 sek/Kugel = 0,347 h Portal: 0,347 h x 7,5 kWh x 0,29 €/kWh c) Gerätekosten Portal: 0,347 h x 18,75 €/h d) Lohnkosten Maschinenführer: 0,347 h x 41,90 €/h		12,50 €	0,75 € 6,51 €
3	Schalarbeiten a) Rüst- und Schalstoffe Verbrauchsstoffe und Gerätekosten b) Lohnkosten Fachwerker: 0,2 h/m ² x 29,90 €/h			2,50 € 5,98 €
4	Bewehrungsarbeiten a) Baustoffkosten (Q257 A) 2 x 4,12 kg/m ² x 1,00 m ² x 1,50 €/kg b) Lohnkosten Betriebsdauer 2 x 4,12 kg/m ² x 1,00 m ² x 15 h/t = 0,1236 h Fachwerker: 0,1236 h x 29,90 €/h		12,36 €	3,70 €

10.3 Einzelkosten der Gradientenwand in der Errichtungsphase

10.3.1 Fertigteilkosten

Die Fertigteilkosten sind in diesem Fall die zuvor bestimmten Netto-Angebotssummen der beiden Entwurfsvarianten und betragen:

- Mikrogradierte Sandwichwand: 358,00 €/m²
- Mesogradierte Wand: 95,09 €/m²

10.3.2 Transport- und Montagekosten

Die Transport- und Montagekosten von Fertigteilen werden beeinflusst durch das Element selbst in Form seiner Größe und seines Gewichts sowie die zurückzulegenden Transportwege [31]. In der Regel gilt hierbei, je kleiner die Elemente und je größer die Stückzahl, desto höher der Aufwand. [72] empfiehlt für Wandelemente im Wohnungsbau eine Länge von maximal 7,25 m und ein Gewicht von unter 10 t. Sowohl die mikrogradierte Wand mit einem Elementgewicht von 1 t/lfdm als auch die mesogradierte Wand mit 1,25 t/lfdm unterschreiten bei der empfohlenen Wandlänge das zulässige Maximalgewicht eines Elements. Für die weitere Betrachtung der Transport- und Montagekosten wird die maximale Elementlänge von 7,25 m gewählt, sodass sich folgende Elementmassen ergeben:

- Mikrogradierte Sandwichwand: 7,25 t/Element
- Mesogradierte Wand: 9,06 t/Element

Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass ein Transportfahrzeug jeweils zwei Elemente befördern kann, sodass für den Transport der mikrogradierten Sandwichwand ein Fahrzeug mit bis zu 16 t zulässigen Liefergewichts erforderlich ist, bei der mesogradierten Wand eines mit bis zu 20 t. Unter der Annahme eines maximalen Lieferbereichs von 100 km ergeben sich nachfolgende Transportkosten gemäß [76]:

- Mikrogradierte Sandwichwand: 447 €/Transport = 10,28 €/m²
- Mesogradierte Wand: 487 €/Transport = 11,20 €/m²

Grundsätzlich unterscheidet der Fertigteilbau zwei Montagearten, die vertikale und die horizontale (geschossweise) Montage (Abbildung 90) [72]. Die vertikale Montage ist gekennzeichnet durch ein feldweises Montieren der Elemente von unten nach oben, meist durch einen Mobilkran. Bei der horizontalen Montage werden die Elemente geschossweise durch einen Turmdrehkran montiert. Diese ist daher für den Geschosswohnungsbau von Vorteil. Der erforderliche Turmdrehkran steht meist über die gesamte Bauzeit zur Verfügung, sodass dieser für die erhöhten Lasten der Fertigteile ausreichend dimensioniert sein muss.

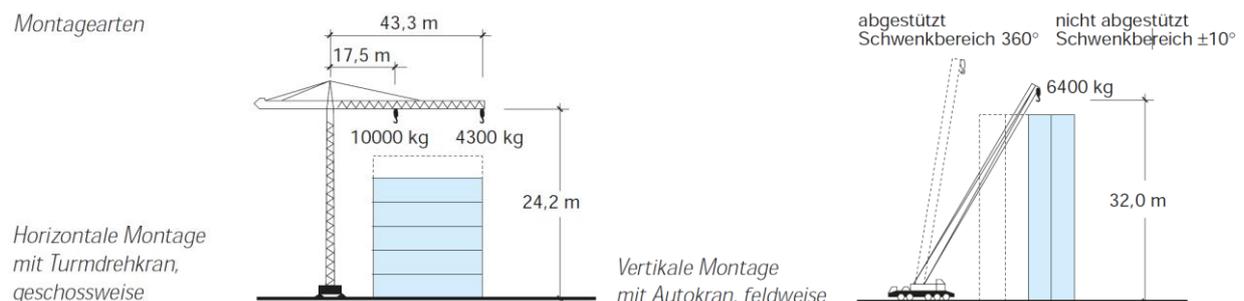


Abbildung 90: Montagearten im Fertigteilbau [72]



Die BKI gibt im Bereich der Baustelleneinrichtung Gerätekosten für einen Kran zwischen 38 € und 150 € pro Stunde an. Aufgrund des hohen Eigengewichts der Fertigteile kann davon ausgegangen werden, dass ein Kran mit großem Tragmoment erforderlich ist. Deshalb wird bei den Gerätekosten der höchste Kostensatz von 150 €/h für die Bilanzierung gewählt. Gemäß [31] errichtet eine Arbeiterkolonne von 5 Mann [72] zwei Wandelemente in der Stunde. In Abhängigkeit der Abmessungen der Wandelemente können die Gerätekosten für die Montage wie folgt bestimmt werden:

- Gerätekosten: $150 \text{ €/h} * 0,5 \text{ h/Element} / 21,75 \text{ m}^2\text{/Element} = 3,45 \text{ €/m}^2$

Mit den genannten Arbeitszeitrichtwerten lassen sich ebenfalls die Lohnkosten für die Montage berechnen. Diese gliedern sich in die Montagearbeiter der Lohngruppe 2 und den Baumaschinenführer der Lohngruppe 4.

- ASL - Lohngruppe 2: $29,90 \text{ €/h} * 2,5 \text{ Mann h/Element} / 21,75 \text{ m}^2\text{/Element} = 3,44 \text{ €/m}^2$
- ASL - Lohngruppe 4: $41,90 \text{ €/h} * 0,5 \text{ h/Element} / 21,75 \text{ m}^2\text{/Element} = 0,96 \text{ €/m}^2$

10.3.3 Einzelkosten der Entwurfsvarianten im fertigen Gebäude

Um eine vergleichbare Grundlage zu den Baukosten nach BKI zu schaffen, müssen für die Gradientenwand alle Prozessschritte bis zur fertigen Errichtung einer Wand im Gebäude berücksichtigt werden. Die Einzelkosten setzen sich zusammen aus den Fertigteilkosten und den anteilmäßig für Transport und Montage anfallenden Kosten. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass das Fertigteilwerk auch die Errichtung des Gebäudes durchführt, müssen zusätzliche AGK und W&G der Baufirma berücksichtigt werden. Die prognostizierten Baukosten für einen Quadratmeter der mikrogradierten Wand betragen rund 430 € (Abbildung 91), dagegen sind die Kosten für einen Quadratmeter mesogradierten Wand mit rund 130 € (Abbildung 92) deutlich niedriger sind.

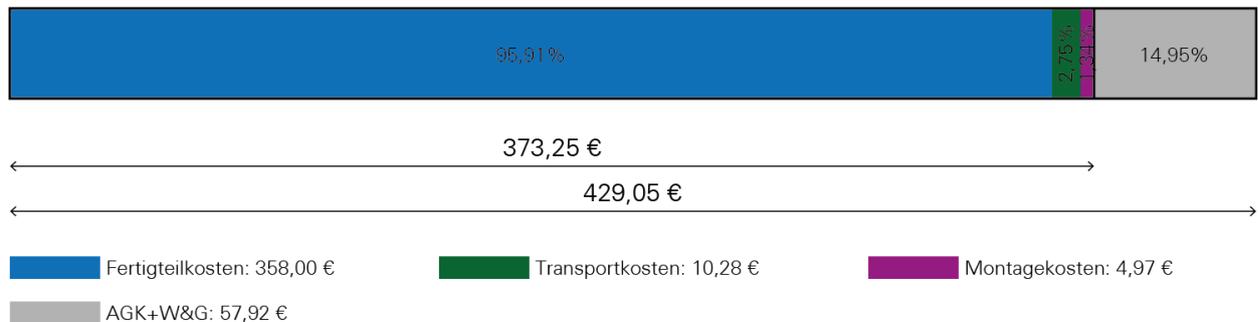


Abbildung 91: Prozentuale Kostenverteilung für die Errichtung von 1 m² der mikrogradierten Wand

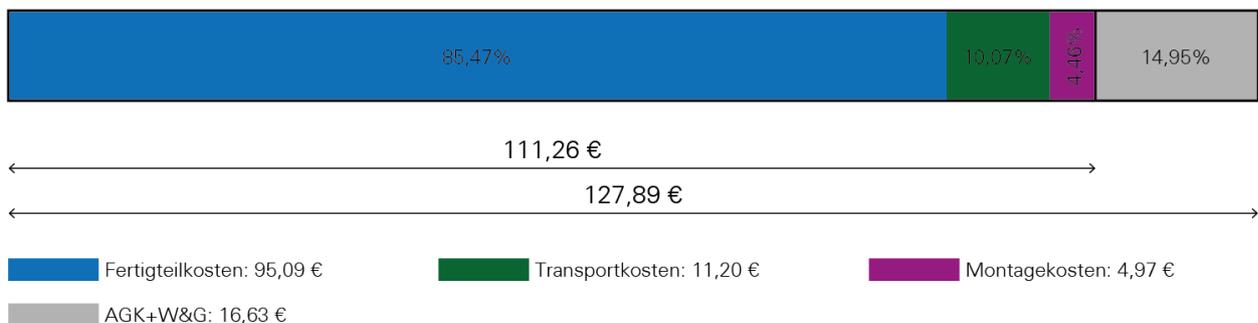


Abbildung 92: Prozentuale Kostenverteilung für die Errichtung von 1 m² der mesogradierten Wand



10.4 Marktanalyse

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und zur Abschätzung der Marktfähigkeit der entwickelten gradierten Wandbauteile muss zunächst eine Vergleichsbasis geschaffen werden. Für die Vergleichsbasis werden unterschiedliche Wandaufbauten ausgewählt, die ähnliche Eigenschaften wie eine gradierte Wand aufweisen. Prinzipiell sind dies Stahlbetonwände mit WDVS sowie Mauerwerkswände mit und ohne WDVS. Für diese tragenden und wärmedämmenden Außenwände finden sich in der BKI [71] Kalkulationsrichtwerte, um deren Preis zu bestimmen. In der weiteren Untersuchung werden die in Tabelle 10-5 aufgeführten Wandsysteme für den Vergleich betrachtet. Diese umfassen drei Wärmedämmverbundsysteme die sich im Typ der tragenden Wand (Ortbeton, Betonfertigteil und Kalksandstein-Mauerwerk) unterscheiden sowie zwei tragende und wärmedämmende Mauerwerkswände aus Leichthochlochziegel bzw. Porenbetonstein. Bei allen Vergleichsaufbauten wird von einer durchschnittlichen Gesamtwandstärke von ca. 36 cm ausgegangen, wobei die Wände aus Beton höhere Lasten abtragen können als die Mauerwerkswände. Der mittlere Einheitspreis der Aufbauten mit Wärmedämmverbundsystem liegt zwischen 220 € und 390 € und ist damit über dem mittleren Einheitspreis von 159 € bis 179 € für die wärmedämmenden Mauerwerkswände

Tabelle 10-5: Einheitspreise vergleichbarer Wandsysteme pro m² Wandfläche

Beschreibung	€/Einheit		
	von	Mittelwert	bis
Ortbetonwand mit WDVS	270,00 €	320,00 €	390,00 €
Stahlbetonwand	160,00 €	190,00 €	230,00 €
Wärmedämmverbundsystem	110,00 €	130,00 €	160,00 €
Betonfertigteilwand mit WDVS	220,00 €	270,00 €	330,00 €
Betonfertigteilwand	110,00 €	140,00 €	170,00 €
Wärmedämmverbundsystem	110,00 €	130,00 €	160,00 €
Kalksandsteinwand mit WDVS	168,00 €	218,00 €	280,00 €
Kalksandstein-Mauerwerk	58,00 €	88,00 €	100,00 €
Wärmedämmverbundsystem	110,00 €	130,00 €	160,00 €
Wärmedämmende Mauerwerkswand	126,00 €	159,00 €	188,00 €
Leichthochlochziegel	85,00 €	110,00 €	130,00 €
Außenputz	41,00 €	49,00 €	58,00 €
Wärmedämmende Mauerwerkswand	151,00 €	179,00 €	208,00 €
Porenbetonstein	110,00 €	130,00 €	150,00 €
Außenputz	41,00 €	49,00 €	58,00 €

Stellt man die prognostizierten Quadratmeterpreise der beiden Wandentwürfe den Einheitspreisen standardmäßig eingesetzter Wandsysteme gegenüber, so fällt auf, dass der mikrogradierte Aufbau derzeit noch 110 € bis 160 € teurer ist als WDVS mit Beton. Im Vergleich zu den wärmedämmenden Mauerwerkswänden ist der mikrogradierte Aufbau mit einem Preisunterschied von 270 € momentan noch keine Alternative. Ökonomisch vorteilhafter ist dagegen der mesogradierte Wandaufbau. Schon jetzt liegt der prognostizierte Preis der mesogradierten Wand unterhalb der Preise aller vergleichbaren Wandsysteme. Selbst bei einer Verdopplung der Kosten von Herstellung und Einbau der Hohlkörper liegt diese Entwurfsvariante immer noch im Preisniveau wärmedämmender Mauerwerkswände.

Neben dem reinen Einheitspreisvergleich der unterschiedlichen Wandaufbauten kann bei beiden Wänden aus Gradientenbeton der zusätzliche Gewinn an Nutzfläche berücksichtigt werden. Bei gleichen Außenabmessungen des Gebäudes wird ein Nutzflächengewinn zwischen 0,08 und 0,125 m²/lfdm

Wand durch den gradierten Aufbau erreicht. Um die Vergleichbarkeit zum Einheitspreis sicherzustellen, wird der Gewinn auf eine Quadratmeterwandfläche unter der Geschosshöhe von 3,00 m bezogen. Der bezogene Nutzflächengewinn beträgt dann 0,025 m² bis 0,042 m². Unter Ansatz eines Verkaufspreises von 5.000 €/m² für Neubauten, was unter dem aktuellen Durchschnittspreis von 6.000 € für Stuttgart liegt [77], wird durch den Einsatz von Gradientenbeton ein Gewinn an nutzbarer Grundfläche von 125 € bis 200 € pro Quadratmeter Wand erzielt. Wird dieser Zugewinn beim Aerogel-Wandaufbau mitberücksichtigt, so stellt auch diese Entwurfsvariante zum jetzigen Stand eine potentielle Alternative zu herkömmlichen Wandsystemen dar.

11 Demonstrator (AP 6, ILEK/ISYS)

Nach den Untersuchungen im Forschungsprojekt stehen zwei Technologien zur Verfügung, mit denen eine multifunktionale Wand aus gradiertem Beton realisierbar ist, die den Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Bauphysik gerecht wird. Mit beiden Technologien kann eine deutliche Masseneinsparung gegenüber einer Stahlbetonwand mit WDVS erzielt werden, die je nach Entwurfsvariante zwischen 40 % und 60 % liegt. Um beide Technologien gegenüberstellend zu bewerten und für die Umsetzung in einem großmaßstäblichen Demonstrator zu validieren, wurden Wandausschnitte mit beiden Technologien hergestellt (Abbildung 93). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl mit der Mikrogradierung als auch mit der Mesogradierung die Herstellung der Wände im schichtweisen Gießen möglich ist.



Abbildung 93: Mesogradierter Wandaufbau (links) und mikrogradierter Wandaufbau (rechts) ausgestellt bei der Messe Bau 2019 in München

Es zeigt sich allerdings, dass bei dem Aufbau mit Mesogradierung eine Vielzahl an Kugeln, im Fall eines Quadratmeters eine Anzahl von 250 Stück, erforderlich ist, deren Fertigung mit der derzeitigen Kapazität der vorhandenen Zentrifuge ca. 100 Stunden benötigen würde. Für das Musterbauteil im Maßstab 1:1 mit mindestens drei Quadratmetern Fläche liegt die Produktionszeit damit bei über 300 Stunden. Aus diesem Grund wurde zum jetzigen Stand der Forschung auf die Herstellung einer mesogradierten Wand verzichtet. Durch die zukünftige Weiterentwicklung des Herstellungsverfahrens für die Fertigung mineralischer Hohlkörper lassen sich höhere Produktionsraten erwarten, weshalb zu gegebener Zeit ein entsprechender Aufbau realisiert werden soll.



Der Sandwichaufbau mit Mikrogradierung stellt eine vielversprechende Lösung für gewichtsminimale und sortenreine Wände aus Beton dar, die mit der derzeit in Fertigteilwerken vorhandenen Maschinenteknik umsetzbar wäre. Es muss lediglich sichergestellt sein, dass zwei Betone separat hergestellt und in kontrollierten Schichtdicken in die Schalung gegossen werden. Auch ökonomisch weist diese Entwurfsvariante im Gebäude angewandt Vorteile gegenüber den standardmäßig eingesetzten WDVS auf. Dieses Potential kann durch eine erwartungsgemäße Reduktion der Rohstoffkosten (insbesondere von Aerogel) zukünftig weiter ausgebaut werden. Aus diesen Gründen wird der Demonstrator mit der Mikrogradierung ausgeführt.

Das Funktionsmuster im Maßstab 1:1 hat eine Dimension von 3,00 m Höhe, 1,25 m Breite und 25 cm Dicke. Die Maße orientierten sich an den Standardelementen des Schalungssystems StarTec der Firma Meva (Abbildung 94), das einen problemlosen und schnellen Schalungsaufbau ermöglichte. Der Sandwichaufbau des Demonstrators besteht aus zwei hochfesten 5,5 cm starken Deckschichten aus der Mischung M_{INS}(HC) des Kooperationspartners HeidelbergCement AG. Dazwischen befindet sich der 14 cm dicke Dämmkern aus Aerogelbeton M_{II}SG(AM) mit dem Granulat P300 der Firma Cabot und Mikrohohlkugeln der Firma Sika. Zur Sicherstellung des Schichtverbundes wurden TZ-Schubgitter aus Glasfaser (Q121/121-AAE-38) der Firma Solidian eingesetzt, welche die schwind- und temperaturabhängigen Dehnungen aufnehmen. Über die Bauteilhöhe wurden vier dieser Gitter im Abstand von 75 cm angeordnet (Abbildung 94), sodass der entsprechende Nachweis ($A_{Ed} = 4.300 N < 5.000 N = A_{Rd}$) eingehalten ist. Die beiden Deckschichten wurden mit je einer Lage des textilen Glasfasergeleges bewehrt, um die Schubkräfte flächig in die Deckschichten einzuleiten. Zusätzlich wurden die für ein vorgefertigtes Wandelement erforderlichen konstruktiven Details eingebaut (Abbildung 94). Hierbei hat die Firma Peikko einen Wandschuh, das TENLOC®-Verriegelungssystem und Sandwichtransportanker bereitgestellt, die an die Randbedingungen des Sandwichaufbaus angepasst wurden.



Abbildung 94: Schalung mit eingelegter Bewehrung und Einbauteilen vor dem Betonieren



Die Herstellung des Wandbauteils fand am Versuchsstand des Spritzbetonmanipulators im schichtweisen Gießen statt. Der Frischbeton der unteren und oberen Deckschicht wurde zu je drei Chargen in einem 60 l Zwangsmischer bereitgestellt. Der Dämmkern aus Aerogelbeton konnte in dem Zwangsmischer problemlos aufgeschossen werden, wofür insgesamt neun Chargen à 60 l erforderlich waren. In einem ersten Schritt wurde die untere 5,5 cm dicke Deckschicht betoniert (Abbildung 95, links). Nach kurzer Ansteifzeit wurde der Dämmkern in die leicht erstarrte, aber noch frische Betonschicht gegossen und manuell verdichtet (Abbildung 95, Mitte). Zuletzt wurde die Bewehrung der oberen Deckschicht an den Schubgittern fixiert und die Deckschicht betoniert sowie abschließend geglättet (Abbildung 95, rechts).



Abbildung 95: Schichtweise Herstellung der Sandwichwand: Herstellung der unteren Deckschicht (links), Herstellung des Dämmkerns aus Aerogelbeton (Mitte) und Herstellung der oberen Deckschicht (rechts)

Nach einer einwöchigen Aushärtezeit konnte das Wandbauteil erfolgreich ausgeschalt werden. Nachdem die Randschalungen entfernt waren, wurde das Bauteil durch die eingebauten Halteanker von der Schalung abgehoben. Es bestätigt sich, dass die gewählten Transportdetails ausreichend dimensioniert waren und im Sandwich funktionierten. Eine Delamination der Schichten konnte nicht festgestellt werden, was den gewählten Ansatz zur Auslegung der Schubgitter verifiziert. Durch die Herstellung des Funktionsmusters (Abbildung 96) konnten die Entwurf- und Herstellungsmethoden für die Fertigung rein mineralischer, vorgefertigter Wandbauteile validiert und bestätigt werden. Mit dem hergestellten Demonstrator wurde eine Gewichtsreduktion gegenüber herkömmlichen Massivwänden mit WDVS von rund 60 % erreicht bei gleicher konstruktiver und bauphysikalischer Funktionalität und gleichem architektonischen Erscheinungsbild.



Abbildung 96: Ansicht (links) und Isometrie (rechts) des Funktionsmusters einer mikrogradierten Sandwichwand

12 Zusammenfassung und Ausblick (ILEK)

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Grundlagen zur Werksfertigung von multifunktional gradierten Wandbauteilen erforscht. Dies umfasst die materialspezifischen Anforderungen, die herstellungstechnischen Rahmenbedingungen sowie die Entwurfs- und Berechnungsmethoden für die Anwendung der Gradierung in Außenwänden.

Basierend auf einer Recherche zum derzeitigen Stand von Forschung und Technik im Bereich wärmedämmender Wandsysteme aus Beton sowie dem aktuellen Forschungsstand des Gradientenbetons konnten die Anforderungen und Entwurfsziele an eine multifunktional gradierte Außenwand festgelegt werden. Die gradierte Wand sollte in ihrer Tragfähigkeit und ihrer Wärmedämmeigenschaft optimiert werden und eine Wandstärke von 36,5 cm sowie eine flächenbezogene Masse von 500 kg/m² nicht überschreiten. Zudem sollte die Außenwand ebenfalls die relevanten Schall- und Brandschutzanforderungen erfüllen. Um diesen Aspekten gerecht zu werden, wurden zu Beginn des Projekts die normativen Regelungen für die Wandbauteile zusammengetragen, um die Randbedingungen für den Entwurf und die Berechnung der Wandbauteile festlegen zu können. Aus der Material- und Herstellungstechnologie gradiertem Beton ergaben sich zusätzliche Randbedingungen für den Entwurf. Die bereits entwickelten Herstellungsverfahren wie das schichtweise Gießen sowie das Trocken- und Nassspritzverfahren wurden in Abhängigkeit der erreichbaren Eigenschaftsspektren analysiert sowie deren Einsetzbarkeit zur Herstellung multifunktional gradiertem Wandbauteile bewertet. Dabei stellte sich heraus, dass sowohl das Gießverfahren als auch das Nassspritzverfahren unter Weiterentwicklung der wärmedämmenden Betonmischungen potentiell einsetzbar sind. Mit Hilfe der vorhandenen automatisierten



Herstellungsplattform wurde das Nassspritzverfahren weitergehend untersucht und erforscht, da bei diesem eine unmittelbare Überführung der Fertigung ins Werk möglich ist. Der Gesamtprozess konnte deutlich weiterentwickelt werden, was die Bereitstellung neuer, pumpbarer Leichtbetonrezepturen sowie die Bestimmung verfahrensrelevanter Prozessparameter zur Bauteilherstellung betrifft. Trotz umfangreicher Untersuchungen zur Nassspritztechnologie weist das schichtweise Gießen verfahrensbedingte Vorteile auf, sodass auch Wärmedämmbetone mit sehr niedriger Dichte verarbeitet werden können. Parallel zur Weiterentwicklung der Material- und Herstellungstechnologie wurde ein verfahrensunabhängiger Entwurfsansatz zur Bestimmung der optimalen Dichteverteilung im Bauteilinneren aufgestellt. Als Zielfunktion wird die Minimierung des Bauteilgewichts unter Einhaltung der Nebenbedingung des Wärmeschutzes festgelegt. In einem nachgelagerten Entwurfsschritt werden bei diesem Vorgehen die sekundären Ziele wie Schall- oder Brandschutz überprüft und gegebenenfalls die Materialverteilung angepasst. Als optimales Ergebnis des analytischen Entwurfsansatzes ergibt sich stets ein Sandwichaufbau bestehend aus zwei hochfesten, tragenden Deckschichten und einem wärmedämmenden Kern. Lediglich die Wandstärke unterscheidet sich in Abhängigkeit der eingesetzten Gradierung. So werden unter Einsatz der Mikrogradierung (Aerogeldämmkern) mit dem Herstellungsverfahren des schichtweisen Gießens Wandstärken zwischen 22 cm und 26 cm erreicht bei einem Flächengewicht von maximal 280 kg/m². Bei der sogenannten Mesogradierung übernehmen drei Lagen von Hohlkugeln aus Beton die Wärmedämmung. Damit wird ein Flächengewicht der Wand von rund 350 kg/m² bei Wanddicken von 28 cm erzielt. In skalierten Bauteilversuchen wurde die Tragfähigkeit der Wandbauteile experimentell geprüft, um sowohl die analytischen Entwurfsansätze als auch die numerischen Berechnungsmethoden zu validieren. Es konnte eine hinreichende Genauigkeit zwischen Berechnung und Versuchen nachgewiesen und die formulierten Entwurfsansätze bestätigt werden. Des Weiteren wurden Ansätze zur konstruktiven Detailausbildung aufgezeigt, die eine Fügung von einzelnen vorgefertigten Betonelementen ermöglichen. Konzeptionell wurden Fügedetails für Wand-Wand-, Wand-Decke- und Wand-Fundament-Anschluss ausgeführt. Diese beinhalten sowohl existierende Lösungen, die auf die vorliegenden Randbedingungen adaptiert wurden, als auch neue Konzepte basierend auf den Vorarbeiten am ILEK. Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts eine Kostenkalkulation für die beiden Entwurfsvarianten der Mikro- und Mesogradierung durchgeführt und mit den am Markt eingesetzten Lösungen verglichen. Es zeigte sich, dass die entwickelten Ansätze bereits zum jetzigen Forschungsstand eine Alternative zu herkömmlichen Wandsystemen darstellen. Durch die Herstellung einer Demonstratorwand im Realmaßstab konnten die erzielten Ergebnisse im Projekt validiert und das Potential der Technologie bestätigt werden. Als Ergebnis konnte eine Gewichtsreduktion gegenüber herkömmlichen Massivwänden mit WDVS von rund 60 % erreicht werden bei gleicher Leistungsfähigkeit und sortenreiner Rezyklierfähigkeit. In den kommenden Projekten gilt es, die Technologie dahingehend zu erforschen, dass sie im Wettbewerb bestehen kann und in der Praxis eingesetzt wird. Hierzu müssen in erster Linie die Herstellungsprozesse skaliert werden, um die erforderlichen Produktionsraten, die im Bauwesen vorherrschen, zu erreichen. Zudem müssen weitere Untersuchungen zum zeitabhängigen Verhalten und der Dauerhaftigkeit gradierter Betone durchgeführt werden. Letztlich können diese Erkenntnisse dazu beitragen, eine bauaufsichtliche Zulassung für die Technologie zu erwirken, die eine Einführung in den Markt ermöglicht.



13 Verzeichnisse

13.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau eines Wärmedämmverbundsystems [4].....	11
Abbildung 2:	Sandwichwand im Betonbau [9]	11
Abbildung 3:	Einfamilienhaus aus Infraleichtbeton [10]	12
Abbildung 4:	Gradierungsmaßstab: Mikrogradierung (links), Mesogradierung (mittig) und Kombination von Mikro- und Mesogradierung (rechts)	13
Abbildung 5:	Eigenschaftsänderungen der Betongemische durch Dichteanpassung [21]	14
Abbildung 6:	Zentrifuge (links) zur Herstellung von Betonhohlkugeln (rechts) [23]	15
Abbildung 7:	Geschichteter Porositätsgradient [19].....	15
Abbildung 8:	Konzept (oben) und Ergebnis (unten) des gradierten Sprühens mit der 2-Düsen-Technologie [21]	16
Abbildung 9:	Rotortrockenspritzmaschinen (links) und Nassspritzmaschinen (rechts) [21]	17
Abbildung 10:	Applikationssystem (links) mit Stewart-Gough-Plattform (rechts) [21]	17
Abbildung 11:	Gradientenlayout bestimmt durch die inneren Schnittkräfte im Bauteil (oben) und durch die Topologieoptimierung (unten)	18
Abbildung 12:	Konzeptioneller Aufbau einer multifunktionalen Gradientenwand.....	19
Abbildung 13:	Einwirkungen auf das Referenzsystem und Betrag der Einwirkung in Abhängigkeit von der Geschoszahl	20
Abbildung 14:	Entwicklung der Schwindverformung [30].....	23
Abbildung 15:	Temperaturverlauf in einem Betonsandwichelement (oben) und Änderung des Mittelwertes der Temperatur der Vorsatzschale (unten) [31]	25
Abbildung 16:	Betondruckfestigkeits-Dichte-Diagramm in Abhängigkeit des gradierten Herstellungsverfahrens	30
Abbildung 17:	Maximal zulässige Wärmeleitfähigkeit zum Erreichen einer Wandstärke von 36,5 cm	31
Abbildung 18:	Kornrohdichte verschiedener Leichtzuschläge [39].....	32
Abbildung 19:	Sprühstand im Technikum von HeidelbergCement (links) und Sprühprobe der Mischung MII _{NS,HC} (L) (rechts)	33
Abbildung 20:	Verhältnis zwischen Druckfestigkeit und Trockenrohdichte mineralisierter Schäum [41] (links); Erwartungswerte für die Wärmeleitfähigkeit von ofentrockenen Mineralschäumen [42] (rechts).	37
Abbildung 21:	Balken aus porösem mineralisiertem Schaum (links); Hohlzylinder mit eingefallener Schaumfüllung (rechts).	37
Abbildung 22:	U-Profil (link) und TZ-Profil (rechts) als Schubbewehrung (Quelle: Solidian)	39
Abbildung 23:	Unterschiedliche Vorfertigungsgrade des Bewehrungssystems	40
Abbildung 24:	Verlauf der Mischungsentwicklung für die beiden Nassspritzbetone MI _{NS} (IWB) und MII _{NS} (IWB)	44
Abbildung 25:	Fördereinheit WM Variojet FU der Firma Werner Mader GmbH (links) mit unterschiedlichen Schnecken inklusive Schneckenmantel, Labor-Zwangsmischer CEM 60 S ELBA (mittig) und Zwangsmischer WM Jetmix 125 (rechts)	45
Abbildung 26:	Rohdichte-Festigkeitsdiagramm für die Leichtbetonmischung MII _{NS} (IWB)-4.2 und MII _{NS} (HC) bei Förderung durch die Schnecke KP20+ und einem Schlauchdurchmesser von Ø 35 mm sowie durch die Schnecke KP45 und den Schlauchdurchmesser von Ø 50 mm (vP = vor dem Pumpen, nSn = nach der Schnecke, nSl = nach dem Schlauch)	46
Abbildung 27:	Unterschiedliche Konfigurationen für den Aufstellungsort der Nass-Spritzmörtel sowie für die Länge und Führung der Förderleitung	47
Abbildung 28:	Verlauf der Temperatur an einzelnen Versuchstagen innerhalb des Zeitraums von Juni bis August 2018 sowie das entsprechende Ausbreitmaß für die Mischung MI _{NS} (IWB)-3.1 und die Mischung MII _{NS} (IWB)-4.2	48
Abbildung 29:	Genereller Aufbau (oben) des Versuchsablaufs zur Analyse der Einflussfaktoren des Nassspritzverfahrens für die Mischung MI _{NS} (IWB)-3.1. Zunächst wird eine charakteristische Bahn für die aktuelle Prozesskonfiguration von rechts nach links appliziert (mittig). Anschließend werden Probekörper nach DIN EN 196-1 hergestellt (unten).....	51



Abbildung 30: Blick von oben auf die Spritzschalung: Spritzbahnen für die drei untersuchten Drehzahlen der Nassspritzmaschine bei 0.8 bar Druckluft und einem Düsenabstand von 0.15 m. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen. 52

Abbildung 31: Einfluss der Drehzahl der Nassspritzmaschine auf den geförderten Massenstrom (links) und die prozentuale Menge an Rückprall (rechts)..... 53

Abbildung 32: Vermessene Spritzstreifen bei einem Düsenabstand von 15 cm und 0.8 bar Luftdruck (links) für drei unterschiedliche Drehzahlen der Nassspritzmaschine. Einfluss der Drehzahl auf die Beton-Rohdichte, die Biegezug- und die Druckfestigkeit (rechts)... 53

Abbildung 33: Spritzbahnen für vier unterschiedliche Luftdrücke bei einer Nassspritzmaschinen-Drehzahl von 2.19 U/s und einem Düsenabstand von 0.15 m. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen. 54

Abbildung 34: Vermessene Spritzstreifen bei einem Düsenabstand von 15 cm und einer Drehzahl von 2.19 U/s (links) für zwei unterschiedliche Luftdrücke. Einfluss des Luftdrucks auf die prozentuale Menge an Rückprall (rechts). 54

Abbildung 35: Einfluss des Luftdrucks auf die Beton-Rohdichte, die Biegezug- und die Druckfestigkeit..... 55

Abbildung 36: Spritzbahnen für vier untersuchte Düsenführungsgeschwindigkeiten bei 0.8 bar Druckluft und einem Düsenabstand von 0.15 m. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen. 55

Abbildung 37: Vermessene Spritzstreifen für vier unterschiedliche Düsenführungsgeschwindigkeiten bei einer Drehzahl von 2.19 U/s, einem Düsenabstand von 0.15 m und einem Luftdruck von 0.8 bar (links). Einfluss der Führungsgeschwindigkeit auf die applizierte Betonmasse (rechts). 56

Abbildung 38: Vermessene Spritzstreifen für unterschiedliche Düsenabstände bei einer Drehzahl von 2.19 U/s und einem Luftdruck von 0.8 bar (links). Einfluss des Düsenabstands auf die Rückprallmenge (rechts). 56

Abbildung 39: Spritzbahnen für drei Rotationsgeschwindigkeiten der kreisförmigen Düseneigenbewegung bei 0.8 bar Druckluft, 0.15 m Düsenabstand und einer NSM-Drehzahl von 2.19 U/s. Die Spritzbahn wurde von oben nach unten aufgetragen. .. 57

Abbildung 40: Vermessene Spritzstreifen für unterschiedliche Frequenzen der kreisförmigen Düseneigenbewegung. 57

Abbildung 41: Herstellung von vier Probekörper der Abmessungen 1200x100x100 mm. Schematische Trajektorie für eine Bauteilschicht (oben links), Einlegen der Bewehrung (oben rechts), Spritz-auftrag einer mittleren Schicht (unten links) und Herstellung der letzten Bauteilschicht (unten rechts). 58

Abbildung 42: Vergleich zwischen Sollprofil und gemessener Schichtstruktur gemittelt über vier Probekörper (oben) und für einen Probekörper mit einer großen Zwischenschicht (unten)..... 58

Abbildung 43: Prozesse des Vorfertigungs- und Automatisierungsgrads bei der Bauteilherstellung. Erster Herstellungsschritt unten, letzter Herstellungsschritt oben 60

Abbildung 44: Vereinfachung des mehrkriteriellen Optimierungsproblems 63

Abbildung 45: Wärmewiderstand und E-Modul in Abhängigkeit der Rohdichte für die Betonmischungen des schichtweisen Gießens 66

Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Wandstärke, Wärmedurchlasswiderstand und Volumenanteil der Betonmischung MII_{SG}(AM)..... 67

Abbildung 47: Zusammenhang zwischen Wandstärke, Schlankheit und Volumenanteil der Betonmischung MII_{SG}(AM)..... 68

Abbildung 48: Optimierungsbereich zur Bestimmung der minimalen Wandstärke 68

Abbildung 49: Optimierungsergebnis der minimalen Wandstärke (links) mit zugehöriger Materialverteilung (rechts) 69

Abbildung 50: Sandwichaufbau 69

Abbildung 51: Materialumverteilungsstrategie zur Steifigkeitsoptimierung 72

Abbildung 52: Masseneinsparpotential bei Steifigkeitsoptimierung der Deckschicht 72

Abbildung 53: Geometrie des zu optimierenden T-Querschnitts..... 73

Abbildung 54: Querschnitte der steifigkeitsoptimierten Wand 74

Abbildung 55: Schwinddehnung für die Betonmischungen der Gießtechnik nach 50 Jahren bei einer Schichtdicke von 20 cm 75



Abbildung 56: Schrumpfen (links) und Trocknungsschwinden (rechts) für unterschiedliche Betonfestigkeiten in Abhängigkeit der Schichtstärke	76
Abbildung 57: Schwinddehnungen in Abhängigkeit des Betonalters	76
Abbildung 58: Näherung für die Ankerkräfte A und die Zwangsmomente mT infolge von Temperaturunterschied ΔT nach [58]	77
Abbildung 59: Definition der Entwurfsrandbedingungen für die Wandauslegung mit Mesogradierung	80
Abbildung 60: Optimierungsergebnis zur Bestimmung der minimalen Wanddicke in Abhängigkeit von Kugelpackung und Wärmeleitfähigkeit des umschließenden Betons	80
Abbildung 61: Optimaler Kugeldurchmesser in Abhängigkeit von der Anzahl an Kugellagen für die minimale Wandstärke je Packungsdichte	81
Abbildung 62: Durch Konvektion gesteigerte relative Wärmeleitfähigkeit bezogen auf die reine Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Rayleigh-Zahl nach [60]	82
Abbildung 63: Entwurfsvarianten für die Wandauslegung mit Mesogradierung mit kubisch primitiver Packung (links) und kubisch dichtester Packung (rechts)	83
Abbildung 64: Skalierung der Bauteilgeometrie	85
Abbildung 65: Ausschnitt aus der Probekörperherstellung	86
Abbildung 66: Bauteilprüfung zu Beginn (links) und am Ende (rechts)	87
Abbildung 67: Struktur eines mehrschichtigen Gradientenaufbaus	88
Abbildung 68: Korrelation zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte [39]	90
Abbildung 69: Mit Epoxydharz abgedichtetes, gradiertes Wandbauteil (links und mittig) und Trocknungsverhalten nach 335 Tagen (rechts)	91
Abbildung 70: Ergebnisse des Wasseraufnahmeversuchs – Massendifferenz bezogen auf die wasseraufnehmende Fläche über der Zeit für jeweils drei Zylinder (Z1-Z3) aus Normalbeton MI (links) und aus Leichtbeton MII _{ns} (B) (rechts)	92
Abbildung 71: THB-Gerät und Leichtbetonprüfkörper während des Messvorganges (links) und Schwindrinne mit Leichtbetonprobekörper (rechts)	93
Abbildung 72: Schichtenaufbau der 1: 6,6 skalierten Wandelemente	93
Abbildung 73: Skalierte Wandelemente (links: 1:6,6 skaliertes Element beim Wiegen, rechts 1:2 skaliertes Element in der Herstellung)	94
Abbildung 74: Schwindmaß von MI (oben) und MII _{ns} (B) (unten)	96
Abbildung 75: Kategorisierung der Verbindung nach geometrischer oder konstruktiver Ausbildung	96
Abbildung 76: a) Exemplarische Verteilung von Kräften zwischen den Wandelementen bei einer Wandebene b) reine Druckbeanspruchung des Wandquerschnitts bei zentrischer Lasteinleitung c) Biegebeanspruchung des Wandquerschnitts bei exzentrischer Lasteinleitung	97
Abbildung 77 Implantat (links) zur Fügung eines UHPC-Balkens an ein gelenkiges Auflager. Im gezeigten Versuchsaufbau konnte eine Prüfkraft von 41 kN erreicht werden [65]. .	98
Abbildung 78: Exemplarische Ausbildung eines Anschlussdetails: Rippendecke-Wand mit Implantat	98
Abbildung 79: a) Wandschuh (Quelle: Peikko Deutschland), b) Anker (Quelle: Peikko Deutschland), c) Wandschuh in Sandwichaufbau	99
Abbildung 80: a) Detail des Implantats [66], b) Implantat in Sandwichaufbau	100
Abbildung 81: a) POWERCON (Quelle: H-Bau Technik GmbH), b) Schwalbenschwanzverbindung in Sandwichaufbau	101
Abbildung 82: a) TENLOC (Quelle: Peikko Deutschland GmbH), b) Schwalbenschwanzverbindung in Sandwichaufbau	101
Abbildung 83: Transportanker in Sandwichaufbau	103
Abbildung 84: Lebenszyklusmodell nach DIN EN 15804 [69]	104
Abbildung 85: Kalkulation der Angebotssumme der Gradientenwand für die einzelnen Lebenszyklusphasen	104
Abbildung 86: Ökonomische Prozessdaten für das schichtweise Gießen	109
Abbildung 87: Ökonomische Prozessdaten für das Nassspritzen	109
Abbildung 88: Prozentuale Kostenverteilung für die Herstellung von 1 m ² der mikrogradierten Sandwichwand	110
Abbildung 89: Prozentuale Kostenverteilung für die Herstellung von 1 m ² der mesogradierten Wand	112
Abbildung 90: Montagearten im Fertigteilbau [72]	114



Abbildung 91: Prozentuale Kostenverteilung für die Errichtung von 1 m ² der mikrogradierten Wand	115
Abbildung 92: Prozentuale Kostenverteilung für die Errichtung von 1 m ² der mesogradierten Wand	115
Abbildung 93: Mesogradierter Wandaufbau (links) und mikrogradierter Wandaufbau (rechts) ausgestellt bei der Messe Bau 2019 in München	117
Abbildung 94: Schalung mit eingelegter Bewehrung und Einbauteilen vor dem Betonieren	118
Abbildung 95: Schichtweise Herstellung der Sandwichwand: Herstellung der unteren Deckschicht (links), Herstellung des Dämmkerns aus Aerogelbeton (Mitte) und Herstellung der oberen Deckschicht (rechts)	119
Abbildung 96: Ansicht (links) und Isometrie (rechts) des Funktionsmusters einer mikrogradierten Sandwichwand	120



13.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Anforderungen an eine tragende Außenwand [26].....	18
Tabelle 4-2:	Knickbeiwerte für Eulerfall I – IV nach [29]	21
Tabelle 4-3:	Beiwerte <i>aas</i> , <i>ads1</i> und <i>ads2</i> in Abhängigkeit des Zementtyps.....	24
Tabelle 4-4:	Anforderungen an die Schalldämmung von Wänden nach [29]	27
Tabelle 4-5:	Mindestdicken für tragende Betonwände (* <i>Werte gelten für Wände mit beidseitigem Putz</i>)	28
Tabelle 5-1:	Eigenschaften der Betone für das schichtweise Gießen [19]	29
Tabelle 5-2:	Anforderungskatalog für die Mischungsentwicklung	31
Tabelle 5-3:	Entwickelte Leichtbetone und deren Eigenschaften.....	35
Tabelle 5-4:	Verbesserte, im Labor entwickelte Leichtbetone verschiedener Zuschläge und deren Eigenschaften	35
Tabelle 5-5:	Laborweiterentwicklung der Mischung MIII _{L,IWB} (L) mit dem Zuschlag Blähglas und Vergleich mit der am Versuchsstand verwendeten Mischungen MIII _{NS,IWB} (L), die die tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort berücksichtigt.....	36
Tabelle 5-6:	Gewählte textile Bewehrung von der Firma solidian	38
Tabelle 5-7:	Gewählte Mikrobewehrung	39
Tabelle 6-1:	Vergleich der Eigenschaften möglicher Herstellungsverfahren.....	41
Tabelle 6-2:	Anpassung der Rezepturen aus den Laborversuchen MI _{NS} (IWB)-1.0 und MII _{NS} (IWB)-1.0 auf die Erfordernisse der Verfahrenstechnik und Bedingungen am Versuchsstand für das Nassspritzen.	43
Tabelle 6-3:	V Versuchsergebnisse zur Untersuchung auf Verdichtung und Kornbruch	46
Tabelle 6-4:	Rückprallmenge für die untersuchten Schalungsböden	59
Tabelle 6-5:	Untersuchung für unterschiedliche Bewehrungssysteme.....	62
Tabelle 7-1:	Unterschiedliche Modellierungsansätze zum Nachweis der Tragfähigkeit.....	65
Tabelle 7-2:	Zusammenfassung der linear-elastischen Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit ..	70
Tabelle 7-3:	Zusammenfassung der erweiterten Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit	71
Tabelle 7-4:	Zusammenfassung der thermischen Simulationsergebnisse.....	71
Tabelle 7-5:	Flächenträgheitsmoment des untersuchten Querschnitts	73
Tabelle 7-6:	Zusammenfassung der erweiterten Simulationsergebnisse zur Tragfähigkeit	74
Tabelle 7-7:	Zusammenfassung der thermischen Simulationsergebnisse der Variante 2 mit T-Querschnitt	74
Tabelle 7-8:	Packungsdichten mit zugehöriger Kugelverteilung und Hohlraumvolumen.....	79
Tabelle 7-9:	Zusammenfassung der thermischen Simulationsergebnisse des mesogradierten Wandaufbaus mit kubisch primitiver Packung	84
Tabelle 8-1:	V Versuchsergebnisse der Probekörpervariante 1	88
Tabelle 8-2:	V Versuchsergebnisse der Probekörpervariante 2 mit T-Querschnitt	89
Tabelle 8-3:	Rohdichten und daraus resultierende rechnerische Wärmeleitfähigkeiten an verschiedenen Zeitpunkten der Untersuchungen.....	91
Tabelle 8-4:	Wasseraufnahmekoeffizient für die untersuchten Probekörper aus Normal- und Leichtbeton	92
Tabelle 8-5:	Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Probestalter	93
Tabelle 8-6:	Aufbau und Wärmeleitkoeffizient von skalierten Wandelementen.....	94
Tabelle 10-1:	Zusammenstellung der Rohstoffpreise	105
Tabelle 10-2:	Kosten pro m ³ Beton für die bislang im Projekt untersuchten bzw. eingesetzten Mischungen.....	107
Tabelle 10-3:	Positionsbezogene Einheitspreisermittlung für die Herstellung von 1 m ² der mikrogradierten Sandwichwand.....	111
Tabelle 10-4:	Positionsbezogene Einheitspreisermittlung für die Herstellung von 1 m ² der mesogradierten Wand	112
Tabelle 10-5:	Einheitspreise vergleichbarer Wandsysteme pro m ² Wandfläche	116



13.3 Literaturverzeichnis

- [1] W. Riedel, *Wärmedämm-Verbundsysteme: von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung*, 2., überarb. Aufl. Waldshut-Tiengen: Baulino-Verlag, 2010.
- [2] H.-H. Neumann, *Praxis-Handbuch Wärmedämm-Verbundsysteme: Baustoffkunde, Verarbeitung, Schäden, Sanierung; mit 109 Tabellen*. Köln: Müller, 2009.
- [3] H. Luik, *WDVS: Systeme, Verarbeitung, Details; mit 52 Tabellen*. Köln: Müller, 2015.
- [4] Energieberatung Leppig GmbH, „Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieberatung-leppig.de/index.php/know-how/energetisch-sanieren/waende/waende-wissen>. [Zugegriffen: 05.03.2019].
- [5] M. Horstmann, „Zum Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textilbewehrtem Beton“, Dissertation, RWTH Aachen, 2010.
- [6] Å. Holmberg und E. Plem, *Behaviour of load-bearing sandwich-type structures*. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1965.
- [7] F. A. Müller, „Sandwichelemente mit Deckschichten aus Hochleistungsbeton und einem Kern aus extrudiertem Polystyrol“, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2015.
- [8] H. N. Schneider, C. Schätzke, C. Feger, M. Horstmann, und D. Pak, „Modulare Bausysteme aus Textilbeton-Sandwichelementen“, in *4th Colloquium on Textile Reinforced Structures, 03.-05.06.2009, Dresden*, 2009, S. 565–576.
- [9] „Passivhausdämmung für Betonfertigteile“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ais-online.de/firma/kingspan-insulation/neuheit/neu-passivhausdaemmung-fuer-betonfertigteile/14872655/>. [Zugegriffen: 05.03.2019].
- [10] M. Schlaich und M. E. Zareef, „Infraleichtbeton“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 103, Nr. 3, S. 175–182, 2008.
- [11] M. Schlaich und A. Hückler, „Infraleichtbeton 2.0“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 107, Nr. 11, S. 757–766, 2012.
- [12] K.-C. Thienel, *Vorlesungsskript Werkstoffe des Bauwesens - Leichtbeton*. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2006.
- [13] K. Lehmphul, *Häufig gestellte Fragen und Antworten zu Hexabromcyclododecan (HBCD)*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2014.
- [14] J. Rödel, „Verfahren zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen, Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens und mittels des Verfahrens hergestellte Gradientenwerkstoffe“, Patent DE 44 35 146 A 1, 1996.
- [15] M. B. Bever und P. E. Duwez, „Gradients in composite materials“, *Materials Science and Engineering*, Bd. 10, Nr. 1, S. 1–8, 1972.
- [16] B. Kieback, A. Neubrand und H. Riedel, „Processing techniques for functionally graded materials“, *Materials Science and Engineering A*, Bd. 362, Nr. 1–2, S. 81–105, 2003.
- [17] P. Elsner, „Gradierte Werkstoffeigenschaften - eine Herausforderung für die Fertigungstechnik“, *Futur - Vision, Innovation, Realisierungen*, Bd. 7, Nr. 2, S. 16–19, 2005.
- [18] W. Sobek, „Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume“, in *Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach*, S. Scheerer und U. van Stipriaan, Hrsg. Dresden: Institut für Massivbau, 2016, S. 62–76.
- [19] P. Heinz, M. Herrmann und W. Sobek, „Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen“, Universität Stuttgart, ILEK, Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau, 2011.
- [20] M. Herrmann und W. Sobek, „Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierter Elementdecken“, Universität Stuttgart, ILEK, Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau, 2014.



- [21] M. Wörner et al., „Gradientenbetontechnologie: von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 111, Nr. 12, S. 794–805, 2016.
- [22] E. Fehling, M. Schmidt, T. Teichmann, K. Bunje, R. Bornemann und B. Middendorf, *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC): Forschungsbericht DFG FE 497/1-1*. Kassel: Kassel University Press, 2005.
- [23] D. Schmeer und W. Sobek, „Weight-optimized and mono-material concrete components by the integration of mineralized hollow spheres“, in *Interfaces: architecture - engineering - science, IASS Symposium, September 25-28, 2017, Hamburg*, 2017.
- [24] M. Herrmann, „Gradientenbeton – Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.
- [25] W. Sobek, „Zum Entwerfen im Leichtbau“, *Bauingenieur*, Bd. 70, Nr. 7/8, S. 323–329, 1995.
- [26] N. A. Fouad, Hrsg., *Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen*, 4., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [27] U. Neck, *Baulicher Brandschutz mit Beton*. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1979.
- [28] DIN EN 1992-1-1:2011-01, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2011.
- [29] C. F. Kollbrunner und M. Meister, *Knicken, Biegedrillknicken, Kippen: Theorie und Berechnung von Knickstäben; Knickvorschriften*, 2., umgearb. und stark erw. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 1961.
- [30] K. Zilch und G. Zehetmaier, *Bemessung im konstruktiven Betonbau: nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und DIN EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*, 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010.
- [31] A. Steinle, H. Bachmann und M. Tillmann, „Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau“, *Beton-Kalender*, Bd. 105, Teil 1, S. 237–467, 2016.
- [32] H. Arndt, *Wärmeschutz und Feuchte in der Praxis: funktionssicher und energiesparend bauen*, 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin; Wien; Zürich: Beuth, 2014.
- [33] P. Häupl et. al., *Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima*, 8. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [34] DIN 4109-1:2018-01, *Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen*. 2018.
- [35] DIN 4109-2:2018-01, *Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen*. 2018.
- [36] DIN 18005-1, Beiblatt 1:1987-05, *Schallschutz im Städtebau: Berechnungsverfahren - Schalltechnische Orientierungswerte für die städtebauliche Planung*. 1987.
- [37] DIN EN 1520:2011-06, *Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung*. 2011.
- [38] DIN 12620:2008-07, *Gesteinskörnungen für Beton*. 2008.
- [39] T. Faust, *Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin: Ernst, 2003.
- [40] J. Achtziger und H. Zehendner, „Wärmedämmstoffe“, *Bauphysik-Kalender*, Bd. 1, S. 187–222, 2001.
- [41] A. Gilka-Bötzow, *Stabilität von ultraleichten Schaumbetonen: Betrachtung instationärer Porenstrukturen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [42] C. Baumert und H. Garrecht, „Mineralschaum für Anwendungen in der Fertigteilindustrie“, *BetonWerk International*, Nr. 3, S. 60–66, 2015.
- [43] S. Hauser, „DUCON® – Mikrobewehrter Hochleistungsbeton“, *Beton-Kalender*, Bd. 106, Teil 2, S. 491–517, 2017.



- [44] M. Schnellenbach-Held und M. Prager, „Mikrobewehrter Ultrahochleistungsbeton: Trag- und Verformungsverhalten“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 106, Nr. 11, S. 770–778, 2011.
- [45] D. Busse und M. Empelmann, „Dünnwandige, mikrobewehrte Betonbauteile unter Querkraftbeanspruchung“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 111, Nr. 12, S. 840–850, 2016.
- [46] B. Maidl, *Handbuch für Spritzbeton*. Berlin: Ernst, 1992.
- [47] K. Guthoff, „Einflüsse automatischer Düsenführung auf die Herstellung von Spritzbeton“, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1991.
- [48] W. Siegel, *Pneumatische Förderung: Grundlagen, Auslegung, Anlagenbau, Betrieb*, 1. Aufl. Würzburg: Vogel, 1991.
- [49] U. von Diecken, „Möglichkeiten zur Reduzierung des Rückpralls von Spritzbeton aus verfahrenstechnischer und betontechnologischer Sicht“, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1989.
- [50] R. Kemmler und E. Ramm, „Modellierung mit der Method der Finiten Elemente“, *Beton-Kalender*, Bd. 90, Teil 2, S. 143–208, 2001.
- [51] Y. Deger, *Die Methode der Finiten Elemente: Grundlagen und Einsatz in der Praxis*, 8. Aufl. Renningen: expert-Verlag, 2017.
- [52] W. Rust, *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Geometrie, Material*, 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [53] C. Barth und W. Rustler, *Finite Elemente in der Baustatik-Praxis: mit vielen Anwendungsbeispielen*, 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin; Wien; Zürich: Beuth, 2013.
- [54] M. Herrmann und W. Haase, „Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 108, Nr. 6, S. 382–394, 2013.
- [55] M. Zhou, „Topology optimization for shell structures with linear buckling responses“, in *6th World Congress on Computational Mechanics, September 05-10, 2004, Beijing, China*, 2004.
- [56] D. G. Stephenson und G. P. Mitalas, „Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layers slabs“, *ASHRAE Transactions*, Bd. 77, Nr. 2, S. 117–126, 1971.
- [57] E. Beißner und S. Eiling, „Ermittlung des Aufbaus und der Stoffkennwerte von Außenbauteilen mit Hilfe von In-situ-Messungen und FEM-Berechnungen“, *Bautechnik*, Bd. 86, Nr. 2, S. 94–98, 2009.
- [58] G. Utescher, „Der Tragsicherheitsnachweis für dreischichtige Außenwandplatten (Sandwichplatten) aus Stahlbeton“, *Bautechnik*, Bd. 50, Nr. 5, S. 163–171, 1973.
- [59] G. G. Szpiro, *Die Keplersche Vermutung: wie Mathematiker ein 400 Jahre alte Rätsel lösten*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011.
- [60] E. Schmidt, „Versuche zum Wärmeübergang bei natürlicher Konvektion“, *Chemie Ingenieur Technik*, Bd. 28, Nr. 3, S. 175–180, 1956.
- [61] J. Pawlowski, *Die Ähnlichkeitstheorie in der physikalisch-technischen Forschung: Grundlagen und Anwendung*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1971.
- [62] DIN EN ISO 7500-1:2016-05, *Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung*. 2016.
- [63] H. S. Müller und U. Wiens, „Beton“, *Beton-Kalender*, Bd. 105, Teil 1, S. 1–168, 2016.
- [64] „Leichtbeton gepumpt - Praxisversuch im Steinbruch Mannersdorf von Lafarge Perlmooser, 08.05.2006“, Cooperative Leichtbeton, Wien, 2006.
- [65] B. Kromoser, O. Gericke und W. Sobek, „Implants for load introduction into thin-walled CFRP-reinforced UHPC beams“, *Composite Structures*, Bd. 194, S. 178–187, 2018.
- [66] J. Mittelstädt, „Zur Einleitung lokaler Lasten in dünnwandige Bauteile aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton mittels Implantaten“, Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.



- [67] O. Gericke, W. Haase und W. Sobek, „Production of curved concrete sandwich panels using a frozen sand formwork“, in *Interfaces: architecture - engineering - science, IASS Symposium, September 25-28, 2017, Hamburg*, 2017.
- [68] E. Leimböck, U. R. Klaus und O. Hölckermann, *Baukalkulation und Projektcontrolling: unter Berücksichtigung der KLR Bau und der VOB*, 13., überarb. u. aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [69] DIN EN 15804:2014-07, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. 2014.
- [70] G. Drees und W. Paul, *Kalkulation von Baupreisen: Hochbau, Tiefbau, schlüsselfertiges Bauen; mit kompletten Berechnungsbeispielen*, 12., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin; Wien; Zürich: Beuth, 2015.
- [71] Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, *BKI-Baukosten 2015 Neubau*. Stuttgart: BKI, 2015.
- [72] Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V., *Betonfertigteile für den Wohnungsbau*, 2., überarb. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2002.
- [73] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie, *BGL Baugeräteliste 2015: technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten*, 1. Aufl. Gütersloh: Bauverlag, 2015.
- [74] Zentralverband Deutsches Baugewerbe, *Lohn- und Gehaltstabelle mit Vergütung für Auszubildende für das Baugewerbe - TV Lohn/West*, Stand 01.05.2018. Berlin, 2018.
- [75] Tarifvertragsparteien der deutschen Bauwirtschaft, *Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau (ARH): Gesamtausgabe Hochbau*, Stand 2015. Neu-Isenburg: Zeittechnik-Verlag, 2015.
- [76] Wallner & Neubert Gesellschaft m.b.H., „Frachtkosten Betonwaren“, in *Preiskatalog 2018*, Mödling, 2018.
- [77] S. Hahn, „Immobilienatlas Stuttgart: Rekordpreise für Wohnungen“, *stuttgarter-nachrichten.de*, 11-Juni-2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.immobilienatlas-stuttgart-rekordpreise-fuer-wohnungen.9247baac-3e27-4872-8a48-6c537fa4456c.html>. [Zugegriffen: 28.01.2019].